

PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA DE MINAS GERAIS
Programa de pós-graduação em engenharia mecânica

**AVALIAÇÃO DO DESGASTE DA FERRAMENTA DE
METAL DURO REVESTIDA COM TiN NO
FRESAMENTO DO AÇO ABNT4140 TEMPERADO E
REVENIDO, UTILIZANDO DUAS FRESAS DE
DIÂMETROS DIFERENTES**

Vinícius Maia de Sá

Belo Horizonte
2010

Vinícius Maia de Sá

**AVALIAÇÃO DO DESGASTE DA FERRAMENTA DE
METAL DURO REVESTIDA COM TiN NO
FRESAMENTO DO AÇO ABNT4140 TEMPERADO E
REVENIDO, UTILIZANDO DUAS FRESAS DE
DIÂMETROS DIFERENTES**

Dissertação apresentada ao
Programa de Pós-Graduação em
Engenharia Mecânica da Pontifícia
Universidade Católica de Minas
Gerais, como parte dos requisitos
para obtenção do título de Mestre
em Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. Dr. José Rubens Gonçalves Carneiro

**Belo Horizonte
2010**

FICHA CATALOGRÁFICA

Elaborada pela Biblioteca da Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais

S111a Sá, Vinícius Maia de.
Avaliação do desgaste da ferramenta de metal duro revestida com TiN no fresamento do aço ABNT 4140 temperado e revenido, utilizando duas fresas de diâmetros diferentes / Vinícius Maia de Sá. Belo Horizonte, 2010.
81 f.:il.

Orientador: José Rubens Gonçalves Carneiro
Dissertação (Mestrado) – Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica
Bibliografia.

1. Fresagem (Trabalho em metal). 2. Usinagem. 3. Metais - Corte
4. Processos de fabricação. 5. Metais duros. I. Carneiro, José Rubens Gonçalves. II. Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica. III. Título.

CDU:621.7

Vinícius Maia de Sá

**AVALIAÇÃO DO DESGASTE DA FERRAMENTA DE
METAL DURO REVESTIDA COM TiN NO
FRESAMENTO DO AÇO ABNT4140 TEMPERADO E
REVENIDO, UTILIZANDO DUAS FRESAS DE
DIÂMETROS DIFERENTES**

Trabalho apresentado ao Programa
de Pós-Graduação em Engenharia
Mecânica da Pontifícia
Universidade Católica de Minas
Gerais como parte dos requisitos
para obtenção do título de Mestre
em Engenharia Mecânica.

Dr. José Rubens Gonçalves Carneiro (Orientador) – PUC Minas

Dr. Ivan José de Santana – CEFET/MG

Dr. Claysson Bruno Santos Vimieiro – PUC Minas

Belo Horizonte, 10 de dezembro 2010.

Dedico este trabalho primeiramente a Deus, aos meus pais, Benedito e Maria Helena, a minha esposa Aline, Cinara, Willian e Helena.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus.

Agradeço aos meus pais, Benedito e Maria Helena pelo amor, ensinamentos, confiança e o grande incentivo. À minha esposa Aline pelo amor, cumplicidade, carinho e grande apoio. À Cinara, Willian e Helena pelo carinho.

Ao programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Católica de Minas Gerais.

Ao amigo e orientador Prof. Dr. José Rubens Gonçalves Carneiro, pela orientação nesse trabalho, e pelo companheirismo constante.

Aos funcionários do laboratório de processos de fabricação da PUC MG, Pedro, Carlos e Leandro pelo apoio, amizade e ajuda constante. À secretária e amiga do programa de pós-graduação, Valéria, pelo incentivo, dedicação e carinho. Aos amigos Malange, André Bragança e Letícia pelo apoio e grande amizade.

Ao Centro de Microscopia da UFMG.

À PUC Minas como grande colaboradora para realização deste trabalho.

A todos que, de forma direta ou indireta, contribuíram para execução e finalização desse trabalho.

RESUMO

A indústria metal mecânica exige cada vez mais o desenvolvimento dos processos de fabricação, principalmente a modernização das máquinas operatrizes e a evolução constante das ferramentas de corte. Diversos componentes mecânicos são fabricados através do processo de usinagem que consiste em remover uma camada de material da superfície da peça utilizando essas ferramentas de corte. A escolha correta das ferramentas de corte e dos parâmetros de usinagem não apenas se torna uma questão de acompanhamento da tecnologia, mas uma necessidade, em razão do aumento da demanda e da redução de custo do processo com garantia da qualidade dos produtos. O aço ABNT 4140 é um aço de baixa liga para construção, utilizado em diferentes indústrias na condição de laminado ou tratado termicamente devido sua resistência mecânica, média usinabilidade, elevada temperabilidade. Este trabalho avalia a influência de duas fresas de topo de diâmetros de 20mm e 40mm, com ferramentas de corte revestida por TiN, no fresamento do aço ABNT4140 temperado/ revenido, utilizando-se fluido emulsionável. Para obtenção dos resultados, barras do aço ABNT 4140 temperadas/revenidas foram fresadas em máquina CNC utilizando velocidade de corte de 120m/min, e avanços de 0,1; 0,15 e 0,2mm/rev. O tempo de fresamento foi de até 50 minutos o que propiciou desgaste, avarias e fratura das pastilhas. Verificou-se também a rugosidade da peça para esse tempo de fresamento. O desgaste foi avaliado através de Microscópio Eletrônico de Varredura Quanta 200 - FEG – FEI - 2006 com canhão de emissão por efeito de campo.

Palavras-chave: Fresamento, ferramenta de corte, desgaste de ferramenta de corte, fluido de corte.

ABSTRACT

The metal mechanic industry increasingly requires the development of manufacturing processes, mainly the modernization of machine tools and the constant evolution of cutting tools. Various mechanical components are manufactured through the machining process, which consists of removing a layer of material of the surface of the piece using these tools. The correct choice of cutting tools and machining parameters is not just a matter of monitoring technology, but a necessity, as a result of increased demand and reducing cost with the guarantee of product quality. The ABNT 4140 steel is a low-alloy steel for construction, used in different industries provided laminated or heat-treated, due to its mechanical resistance, average machinery, and high temperability. This study evaluates the influence of two mills of diameters of 20 mm and 40 mm, with cutting tools for TiN coated, in the steel hardened milling ABNT4140 quenched/tempering using an emulsifying fluid. To obtain the results, ABNT 4140 steel bars quenched/tempered cylinders were milled on CNC machine, using cutting speed of 120 m/min and advances 0.1, 0.15 and 0, 2 mm/rev per tooth. The milling time was up to 50 minutes, bringing wear, damage and fracture of tablets. There was also the roughness of the piece for this time of milling. The wear was evaluated through scanning electronic microscope with cannon emission by field effect.

Keywords: milling, cutting tool, cutting tool wea

LISTA DE FIGURAS

| | |
|--|----|
| Figura 1 - Representação esquemática das geometrias básicas do processo de fresamento, profundidade de corte (a_p) e avanço (f_z)..... | 20 |
| Figura 2 - Microestrutura do metal duro. (Norma ISO 513 2004)..... | 24 |
| Figura 3 - Microdureza Vickers dos principais revestimentos de ferramenta de corte. (Abele, E. et. al., 2002). | 26 |
| Figura 4 - Alguns tipos de desgaste e as variáveis de medição do desgaste em ferramentas de usinagem (Norma ISO 3585, 1993)..... | 28 |
| Figura 5 - Principais áreas de desgaste de uma ferramenta de corte (Deamley et al 1982). | 29 |
| Figura 6 - Desgaste de cratera na superfície de saída de uma ferramenta de corte (Introdução aos processos de usinagem 2010)..... | 30 |
| Figura 7 - Desgaste de entalhe na superfície de saída de uma ferramenta de corte (Introdução aos processos de usinagem 2010)..... | 30 |
| Figura 8 - Desgaste de flanco na superfície de saída de uma ferramenta de corte (Introdução aos processos de usinagem 2010)..... | 31 |
| Figura 9 - Comportamento do desgaste de flanco de uma ferramenta ao longo de sua vida T (Lenz et al 1978)..... | 31 |
| Figura 10 - Mecanismo de desgaste (Machado et al 1999) | 32 |
| Figura 11 - Mecanismo de difusão ocorrido na superfície de saída da ferramenta (Iscar, 2001)..... | 33 |
| Figura 12 - Mecanismo de abrasão na ferramenta de corte (Iscar, 2001) | 34 |
| Figura 13 - Ferramenta com APC na aresta de corte (Iscar, 2001) | 34 |
| Figura 14 - Desgaste por oxidação da aresta de corte da ferramenta (Iscar, 2001).35 | |
| Figura 15 - Sentidos práticos da aplicação do fluido de corte(Machado, A.R. et. al. 1999) | 38 |
| Figura 16 - Representação dos efeitos externos e efeitos internos da superfície (Oliveira, C.J., 2004)..... | 40 |
| Figura 17 - Textura de uma superfície mostrando efeitos de rugosidade (A), ondulações (B) e erro de forma (C). (Oliveira, C.J., 2004). | 41 |
| Figura 18 - Esquema de um instrumento de controle de uma superfície (Oliveira, C.J., 2004). | 42 |

| | |
|---|----|
| Figura 19 - Representação do perfil de rugosidade R_a , para um comprimento de amostragem (l) (Martins, P.S., 2008). | 43 |
| Figura 20 - Parâmetro de rugosidade R_z (Martins, P.S.,2008). | 44 |
| Figura 21 - Parâmetro de rugosidade R_t (Martins, P.S., 2008). | 44 |
| Figura 22 - Centro de usinagem Discovery 560, utilizado no fresamento do aço ABNT4140 temperado/revenido. | 47 |
| Figura 23 - Fresas de diâmetros de 20mm e 40mm montadas com três pastilhas de corte intercambiáveis e fixadas por mandris de encaixe sob interferência no centro de usinagem. | 48 |
| Figura 24 - Pastilha de metal duro, revestida por TiN,utilizada nos experimentos de fresamento..... | 48 |
| Figura 25 - Desenho representativo do percurso da fresa durante o corte e posições de leituras do rugosímetro..... | 49 |
| Figura 26 - Rugosímetro Taylor Hobson - Surtronic 3+ em funcionamento, evidenciano a medição de rugosidade | 50 |
| Figura 27 - Microscópio de medição Mitutoyo, modelo TM-505 e série 176 | 50 |
| Figura 28 - Medidor de excentricidade com relógio comparador milesimal | 51 |
| Figura 29 - Microscópio eletrônico de varredura | 52 |
| Figura 30 - Microestrutura do aço ABNT 4140 laminado a quente e temperado/revenido – (a) Aumento 100 X, (b)Aumento 500x - Ataque: Nital 4%. | 53 |
| Figura 31 - Avaliação do desgaste das ferramentas de corte, em relação ao volume retirado, nas três posições, revestida com TiN, com velocidade de corte de 120 m/min, e avanço de 0,1 mm/rev, fresamento com fluido de corte..... | 54 |
| Figura 32 - Avaliação do desgaste das ferramentas de corte, em relação ao volume retirado, nas três posições, revestida com TiN, com velocidade de corte de 120 m/min, e avanço de 0,15 mm/rev, fresamento com fluido de corte..... | 55 |
| Figura 33 - Avaliação do desgaste das ferramentas de corte, em relação ao volume retirado nas três posições, revestida com TiN, com velocidade de corte de 120 m/min, e avanço de 0,20 mm/rev, fresamento com fluido de corte. | 56 |
| Figura 34 - Análise de rugosidade R_a na posição 1 das superfícies usinadas para velocidade de corte de 120m/min, avanços de corte de 0,1, 0,15 e 0,20mm/ver, com fluido de corte. | 57 |

| | |
|--|----|
| Figura 35 - Análise de rugosidade R_a na posição 2 das superfícies usinadas para velocidade de corte de 120m/min, avanços de corte de 0,1, 0,15 e 0,20mm/ver, com fluido corte..... | 58 |
| Figura 36 - Análise de rugosidade R_a na posição 3 das superfícies usinadas para velocidade de corte de 120m/min, avanços de corte de 0,1, 0,15 e 0,20mm/ver, com fluido de corte. | 59 |
| Figura 37 - Avaliação do desgaste das ferramentas de corte, em relação ao volume retirado na posição 1, revestida com TiN, com velocidade de corte de 120 m/min, e avanços de 0,1, 0,15, 0,20 mm/rev, fresamento com fluido de corte..... | 59 |
| Figura 38 - Análise da variação do batimento das ferramentas de corte, para velocidade de corte 120m/min, avanço de 0,1mm/rev, com fluido de corte. | 60 |
| Figura 39 - Análise da variação do batimento das ferramentas de corte, para velocidade de corte 120m/min, avanço de 0,15mm/rev, com fluido de corte. | 61 |
| Figura 40 - Análise da variação do batimento das ferramentas de corte, para velocidade de corte 120m/min, avanço de 0,20mm/rev, com fluido de corte..... | 61 |
| Figura 41 - Foto da ferramenta de corte após corte transversal para verificar espessura do revestimento (a) e (b), material do revestimento (c) e material do substrato(b) | 62 |
| Figura 42 - Foto do desgaste da ferramenta de corte de diametro de 20mm na usinagem do aço ABNT 4140 temperado e revenido com fluido de corte com velocidade de corte 120m/min, avanço 0,20mm/ver, tempo de 1min de usinagem, ampliação de 100x (a), e ampliação 5000x (b)..... | 63 |
| Figura 43 - Foto do desgaste da ferramenta de corte de diametro de 20mm na usinagem do aço ABNT 4140 temperado e revenido com fluido de corte com velocidade de corte 120m/min, avanço 0,20mm/ver, tempo de 3min de usinagem, ampliação de 70x (a), e ampliação 1000x (b)..... | 63 |
| Figura 44 - Foto do desgaste da ferramenta de corte de diametro de 20mm e análise em EDS na usinagem do aço ABNT 4140 temperado e revenido com fluido de corte com velocidade de corte 120m/min, avanço 0,20mm/ver, tempo de 5min de usinagem, ampliação de 100x (a), e ampliação 5000x (b), EDS(c)..... | 64 |
| Figura 45 - Foto do desgaste da ferramenta de corte de diametro de 20mm na usinagem do aço ABN 4140 temperado e revenido com fluido de corte com velocidade de corte 120m/min, avanço 0,20mm/ver, tempo de 10min de usinagem, ampliação de 150x (a), e ampliação 250x (b)..... | 65 |

- Figura 46 - Foto do desgaste da ferramenta de corte de diametro de 20mm na usinagem do aço ABNT4140 temperado e revenido com fluido de corte com velocidade de corte 120m/min, avanço 0,20mm/ver, tempo de 30min de usinagem, ampliação de 100x (a), e ampliação 1000x (b).....66
- Figura 47 - Foto do desgaste da ferramenta de corte na usinagem do aço ABNT 4140 temperado e revenido com fluido de corte com velocidade de corte 120m/min, avanço 0,20mm/ver, tempo de 50min de usinagem, ampliação de 100x (a) e (b).....66
- Figura 48 - Foto do desgaste da ferramenta de corte de diametro de 40mm na usinagem do aço ABNT 4140 temperado e revenido com fluido de corte com velocidade de corte 120m/min, avanço 0,20mm/ver tempo de 1min de usinagem, ampliação de 100x(a) e 5000x(b).....67
- Figura 49 - Foto do desgaste da ferramenta de corte de diametro de 40mm e análise na usinagem do aço ABNT 4140 temperado e revenido com fluido de corte com velocidade de corte 120m/min, avanço 0,20mm/ver, tempo de 3min de usinagem, ampliação de 50x (a) e 100x(b).....68
- Figura 50 - Foto do desgaste da ferramenta de corte de diametro de 40mm na usinagem do aço ABNT 4140 temperado e revenido com fluido de corte com velocidade de corte 120m/min, avanço 0,20mm/ver, tempo de 10min de usinagem, ampliação de 100x (a) e 500x(b).....68

LISTA DE TABELAS

| | |
|---|----|
| Tabela 1 – Classificação do metal duro segundo norma ISO 513/2004..... | 23 |
| Tabela 2 – Parâmetros de corte utilizados no fresamento do aço ABNT 4140 laminado e temperado/revenido..... | 47 |
| Tabela 3 – Análise química da barra de aço ABNT 4140 em percentagem em peso | 53 |

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

| | |
|------------|--|
| ABNT | Associação Brasileira de Norma Técnica |
| APC | Aresta postiça de corte |
| a_p | Profundidade de corte |
| a_e | profundidade radial de usinagem |
| b | Largura de usinagem |
| CIM | Fabricação Integrada por Computador |
| CVD | Deposição química de vapor |
| D | Diâmetro da fresa |
| EP | Extrema pressão |
| F_c | Força de corte |
| F_f | Força de avanço |
| F_p | Força passiva |
| f | Avanço |
| f_m | Avanço da fresa |
| f_z | Avanço de corte por dente |
| HRc | Dureza Rockwell C |
| ISO | <i>“International Organization for Standardization”</i> (Organização Internacional de Padronização) |
| IV | Índice de viscosidade |
| KF | Distância da aresta a borda da cratera |
| KB | Largura da cratera |
| KT | Profundidade de cratera |
| l | Comprimento da amostragem |
| l_n | Comprimento de avaliação |
| M | Classe de material da ferramenta de corte |
| MQL | Mínimas quantidades de lubrificantes |
| N_1 | Rotação da fresa |
| n | Numero de medidas |
| PVD | Deposição física de vapor |
| R_a | Rugosidade média aritmética dos desvios da superfície |
| R_q | Rugosidade média quadrática |
| R_t | Altura máxima de rugosidade |
| R_z | Média dos cinco maiores picos e maiores vales de um perfil |
| t | Tempo |
| VB | Desgaste do flanco médio (mm) |
| VB_{max} | Desgaste de flanco máximo (mm) |
| V_c | Velocidade de corte |
| Y1 | Comprimento de cada pico e vale |

SUMÁRIO

| | |
|---|-----------|
| 1. INTRODUÇÃO | 16 |
| 1.1 Justificativa | 18 |
| 1.2 Objetivos..... | 18 |
| 1.2.1 <i>Objetivos gerais</i> | 18 |
| 1.2.2 <i>Objetivos específicos</i> | 18 |
| 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA | 19 |
| 2.1 Fresamento como processo de usinagem | 19 |
| 2.2 Materiais da ferramenta de corte | 22 |
| 2.2.1 <i>Revestimentos para ferramentas</i> | 24 |
| 2.3 Desgaste da ferramenta de corte | 27 |
| 2.3.1 <i>Tipos de desgaste</i> | 28 |
| 2.4 Mecanismos de desgaste | 32 |
| 2.5 Fluidos de corte | 35 |
| 2.5.1 <i>Classificação dos fluidos de corte</i> | 36 |
| 2.5.2 <i>Aplicação dos fluidos de corte</i> | 37 |
| 2.6 Integridade superficial | 40 |
| 2.6.1 <i>Parâmetros de rugosidade</i> | 42 |
| 3. PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS | 46 |
| 3.1 Materiais e Métodos Experimentais..... | 46 |
| 4. RESULTADOS E DISCUSSÕES | 53 |
| 4.1 Análise química e metalográfica do material | 53 |
| 5. CONCLUSÕES | 70 |
| ANEXOS | 70 |
| REFERÊNCIAS | 76 |

1. INTRODUÇÃO

O aço é uma liga metálica formada essencialmente por ferro e carbono, com percentuais deste último variando entre 0,008 e 2,11%. Distingue-se do ferro fundido, que também é uma liga de ferro carbono, mas com teor de carbono entre 2,11% e 6,67%. A classificação mais comum é de acordo com a composição química. Dentre os sistemas de classificação química, o SAE é o mais utilizado e adota a notação ABXX em que AB se refere ao elemento de liga, adicionados intencionalmente, e XX ao percentual em peso de carbono multiplicado por cem.

O aço é atualmente a mais importante liga metálica, sendo empregue de forma intensa em numerosas aplicações tais como máquinas e ferramentas. Apresenta uma interessante combinação de propriedades mecânicas que podem ser modificadas dentro de uma ampla faixa, variando-se os componentes da liga e as suas quantidades mediante a aplicação de tratamentos.

Nesta pesquisa, trabalharemos com a usinagem do aço ABNT 4140, que é um aço cromo-molibidênio, de temperabilidade média, que combina alta resistência com elevada tenacidade. Indicado para virabrequins, eixos, pinos e bielas.

A usinagem é um processo de fabricação que tem por objetivo conferir forma, dimensões e acabamento em um material bruto por meio da ação de uma ferramenta pela remoção controlada do cavaco (FERRARESI, 1977). A usinagem tem papel fundamental no processo de manufatura. Em países industrializados, os custos que representam a parcela da usinagem correspondem a mais de 15% do valor desse produto final (TRENT, 2000).

Dentre os processos de usinagem, um dos mais importantes é o processo de fresamento. Este processo é extremamente versátil e gera alta taxa de remoção de material, sendo utilizado em larga escala nas indústrias.

A ferramenta denominada fresa possui múltiplas arestas cortantes que removem a cada rotação uma quantidade de material na forma de cavacos. Pelo fato da ferramenta e peça se movimentarem em mais de uma direção ao mesmo tempo, podem ser obtidas superfícies com várias orientações. No fresamento, há dois movimentos a se considerar: rotação da ferramenta e avanço da peça.

É considerado como parâmetro de usinagem a velocidade do corte, cujo significado é a velocidade periférica da ponta da ferramenta na peça. Outro parâmetro é o avanço, que constitui no deslocamento que a ferramenta de corte ou a peça faz em uma volta da peça ou da ferramenta. Por fim, a profundidade de corte também é considerada como parâmetro. É a profundidade ou largura de penetração medida no plano de trabalho numa direção perpendicular à direção de avanço.

Algumas ferramentas utilizadas no fresamento recebem tipos diferentes de revestimentos, pois tendem a proteger a ferramenta contra o desgaste direto, diminuem o atrito entre a ferramenta e a peça, possibilitam maiores valores para velocidade de corte e uma redução na força de corte (KARAGOS et. al., 1996).

A utilização do fluido está sendo muito utilizada na indústria, principalmente no processo de fresamento, pois tende a facilitar a operação do corte. Os fluidos são utilizados com função de refrigerar, lubrificar, proteger contra a oxidação e limpar a região da usinagem. Isto pode acarretar uma melhor qualidade de superfície da peça, aumentar a produção, reduzir o custo de usinagem através do entendimento mais global do processo de desgaste da ferramenta que opera sob diferentes condições de usinagem (LIN et. al., 2001).

Este trabalho é dividido nos seguintes itens: **Revisão Bibliográfica** que apresenta uma revisão dos principais e mais importantes temas relacionados ao desgaste de ferramenta de corte na usinagem por fresamento. **Resultado e Discussão**, que compreende a realização dos testes, análises e conclusão do trabalho. E por fim as **Referências Bibliográficas**.

1.1 Justificativa

Estudar como se comporta o desgaste de duas ferramentas de corte, com diâmetros de 20mm e 40mm em relação ao volume de material retirado, para tempos de 5 minutos chegando ao tempo máximo de 50 minutos de usinagem do aço ABNT4140. Avaliar parâmetros de usinagem como avanço e velocidade de corte para se obter condições que promovem a redução do desgaste da ferramenta e melhora do acabamento superficial da peça através da medição da rugosidade.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivos gerais

Avaliar o desgaste da ferramenta de corte de metal duro revestida com TiN e a rugosidade da superfície usinada no fresamento do aço ABNT4140 temperado/revenido a fim de se conseguir bons resultados ligados a redução de custo e ganho na produção industrial.

1.2.2 Objetivos específicos

- Avaliar a influência dos parâmetros de corte, como o avanço e velocidade de corte no desgaste da ferramenta no fresamento do aço ABNT4140 temperado/revenido;
- Avaliar a influência do diâmetro da fresa no fresamento do aço ABNT4140 temperado e revenido, e, também, na vida da ferramenta de corte de metal duro revestida com TiN;

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Fresamento como um processo de usinagem

Tradicionalmente, a usinagem é caracterizada pela submissão de um material bruto à ação de uma máquina e/ou ferramenta para ser trabalhado. É um processo utilizado na fabricação de diversos componentes, visando atender à crescente demanda dos mais variados setores da indústria. Para tanto, precisa produzir peças cada vez mais complexas, com tolerância dimensional e tolerância geométrica bem definidas, bom acabamento superficial, baixo custo e, além disso, atentar para as questões ambientais.

Tal processo envolve fenômenos como deformação plástica, fratura, impacto, desgaste, pontos de contato intermitentes, contínuos e formação de cavacos. Geração de calor e elevada temperatura de corte são características fundamentais, que podem ser medidas indiretamente através de sensores.

Atualmente, observam-se melhorias nesse processo, tais como precisão de movimentos obtidos e diminuição de vibrações mecânicas com o aumento da rigidez, em função da evolução da máquina ferramenta. Tal evolução tecnológica encontra sua expressão máxima na usinagem a elevadas velocidades de corte, com melhoramento em acabamento superficial ocorrido em máquinas com os recursos de comando numérico.

No campo da usinagem, o aspecto a ser ressaltado neste trabalho é o fresamento – movimento de corte realizado por meio de uma ferramenta chamada fresa. A fresa é provida de arestas cortantes dispostas simetricamente em torno de um eixo. O corte se dá pela rotação da fresa ao redor de seu próprio eixo e pelo movimento de avanço feito pela peça que está fixada na mesa da máquina, o qual obriga a peça a passar sob a ferramenta em rotação, que lhe dá forma e dimensão desejadas (DINIZ et. al., 2000). O fresamento é usado para produção de formas curvadas e/ou cavidades, dependendo da posição do eixo-árvore da máquina. Assim, podem ser utilizados planos de trabalho horizontal ou vertical.

A Figura 1 mostra a geometria básica do processo de fresamento, onde se observam as variáveis do processo como: profundidade de corte a_p , direção de avanço, velocidade de corte e rotação (INTRODUÇÃO AOS PROCESSOS DE USINAGEM 2010).

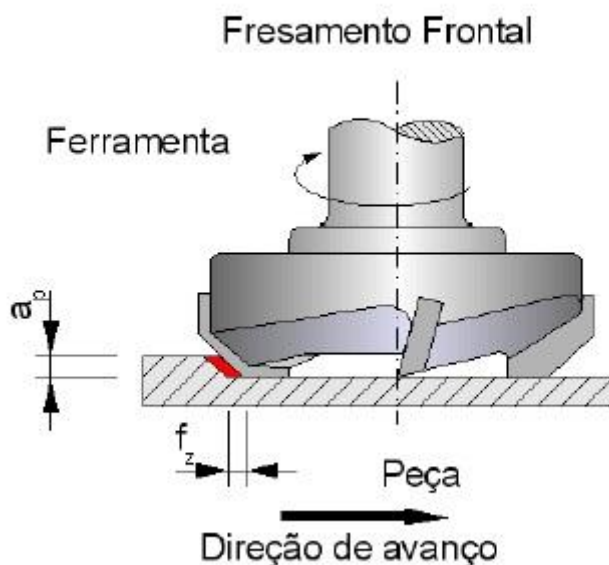


Figura 1 - Representação esquemática das geometrias básicas do processo de fresamento, como profundidade de corte (a_p) avanço (f_z), (INTRODUÇÃO AOS PROCESSOS DE USINAGEM 2010).

Os principais métodos de fresamento são frontal, tangencial e de topo. O fresamento frontal é utilizado para produção de superfícies planas. O plano de trabalho é horizontal, contendo as direções de corte e o avanço paralelos à superfície a ser usinada.

Quando o plano de trabalho é perpendicular à superfície usinada (ou seja, vertical) tem-se o fresamento tangencial. O eixo da fresa fica, portanto, paralelo à peça. A finalidade desse tipo de fresamento é a produção de rasgos profundos e superfícies complexas, além das superfícies planas, (SOUTO, 2007).

METALS HANDBOOK (1989) aponta certas vantagens do fresamento frontal em relação ao tangencial. São elas: melhor relação de remoção de material por potência consumida, maior rigidez da fresa, força de corte melhor distribuída, maior eficiência de corte e menor tempo requerido para mudança de ferramenta.

Por fim, o fresamento de topo caracteriza-se pela combinação entre o fresamento frontal e o tangencial. O corte ocorre nos dois planos de trabalho, paralelo e perpendicular, em relação ao eixo de rotação da fresa. A relação entre o diâmetro da fresa e o seu comprimento é pequena nesse fresamento, o que afeta a rigidez do sistema de fixação. Isso pode acarretar danos à máquina ferramenta e à peça usinada, exigindo controle dos parâmetros de corte tais como avanço, velocidade e profundidade de corte.

No processo de fresamento, a fresa e suas características merecem destaque. Algumas dessas características são: o número de arestas, o ângulo de hélice, o material e tipo de cobertura. As fresas mais comuns são de canto vivo, esféricas e de ranhura. O número de dentes também é importante, pois influencia a taxa de remoção do metal.

Parâmetros de usinagem como velocidade de corte e avanço, juntamente com geometria da ferramenta e principalmente condições da máquina como alinhamento e fixação da ferramenta, influenciam no acabamento superficial e nas tolerâncias através do fresamento de topo (SILVA, 2010 apud Todd ; Allen ; Alting, 1994).

O cavaco é exatamente esta porção de material da peça retirada pela ferramenta. Sempre apresenta forma geométrica irregular (FERRARESI, 1977). A quantidade de cavaco produzida no processo de fresamento é um dos critérios utilizados para se medir a usinabilidade de um material. Essa quantificação também pode ser feita através do número de componentes produzidos por hora, do custo de usinagem do componente ou da qualidade final da superfície trabalhada (TRENT, et. al., 2000).

O fresamento é um processo extremamente complexo e tem diversas variáveis envolvidas, podendo afetar diretamente o seu resultado. Como exemplo, podemos citar a geometria e o tipo da ferramenta, o material e estrutura da peça, a rigidez da máquina, os parâmetros de corte e os tipos de fresamento. A relação entre todas essas variáveis nem sempre fica bastante clara, mas precisa ser analisada a fim de determinar as melhores condições de corte que, por sua vez, trarão os melhores resultados (WU et. al., 1999). No fresamento de uma superfície plana Filho, et. al. 1999 estudaram a influência das posições relativas da ferramenta e da peça no acabamento superficial e na vida da ferramenta.

2.2 Materiais da Ferramenta de corte

A definição do material a ser empregado em uma ferramenta envolve uma série de fatores: material a ser usinado, sua dureza, tipo de cavaco, forma e dimensão da ferramenta de usinagem. Qual o processo de usinagem, ou seja corte interrompido, corte contínuo, acabamento ou desbaste, condições da máquina em termos de rigidez e, por fim, sistema de refrigeração das ferramentas também são fatores a serem considerados.

Na usinagem, os materiais mais usados como ferramentas são o aço rápido e o metal duro. As ferramentas de aço rápido são na verdade aços liga cujos elementos de liga principais são W, Mo, Cr, V, Co e Nb fazendo com que estes aços obtenham maior resistência ao desgaste, maior tenacidade e dureza a quente. O principal uso do aço rápido continua a ser na fabricação de varias ferramentas de corte como serras, fresas, brocas, bits de usinagem. A grande utilização deste material se dá por apresentar um custo relativo baixo. Aliando estas características a um revestimento, temos uma grande aplicabilidade deste material nas indústrias.

Metal duro é o nome dado a uma liga de carboneto de tungstênio, produzido por metalurgia do pó. O produto é obtido pela prensagem e sinterização de uma mistura de pós de carboneto e outros materias de menor ponto de fusão, chamados aglomerantes (cobalto, cromo, níquel ou uma combinação deles).

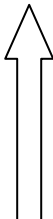
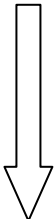
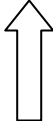
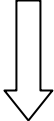
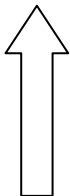
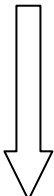
Após a prensagem, o composto já tem consistência suficiente para ser usinado na forma desejada, ou bem próximo dela. Ocorre a seguir o processo de sinterização, aquecimento a uma temperatura suficiente para fundir o aglomerante, que preenche os vazios entre os grãos dos carbonetos. O resultado é um material de dureza elevada, dependendo do teor de aglomerante e do tamanho de grão do carboneto. As maiores durezas são conseguidas com baixos teores de aglomerante e tamanho de grão reduzido. Por outro lado maior tenacidade é obtida aumentando o teor de aglomerante e/ou aumentando o tamanho de grão.

A grande aplicação dos metais duros, fabricados no processo de metalurgia do pó, deve-se ao fato deles possuírem a combinação de resistência ao desgaste, resistência mecânica e tenacidade em altos níveis.

O grande sucesso do metal duro se dá na indústria, pois permite maiores velocidades de avanço e de corte no processo de usinagem, ganhando em produção.

A Tabela 1 classifica os metais duros em grupos, designados pelas letras P, M, K.

Tabela 1
Classificação do metal duro

| Designação ISO | Dureza e resistência ao desgaste | Tenacidade |
|----------------|---|---|
| P 01 |  |  |
| P 10 | | |
| P 20 | | |
| P 25 | | |
| P 30 | | |
| P 40 | | |
| P 50 | | |
| M 10 |  |  |
| M 20 | | |
| M 30 | | |
| M 40 | | |
| K 01 |  |  |
| K 05 | | |
| K 10 | | |
| K 20 | | |
| K 30 | | |
| K 40 | | |

Fonte: Classificação do metal duro segundo norma ISO 513/2004

De acordo com esta classificação, o grupo K foi o primeiro tipo de material duro a ser desenvolvido. O metal duro desta classe é composto de carbonetos de tungstênio aglomerados pelo cobalto, também conhecida por classe dos ferros fundidos, portanto são usadas na usinagem de materiais frágeis, que formam cavacos curtos tendo assim menor atrito entre cavaco e a região de superfície de saída, sendo assim não muito resistentes ao desgaste de cratera (DINIZ; MARCONDES; COPPINI; et. al., 2000).

O grupo P, devido sua constituição obtendo metais duros de elevado teor de $TiC+TaC$, é atribuído a esta classe uma elevada dureza a quente e resistência ao desgaste. Tem como característica a usinagem de materiais que produzem cavacos contínuos, que por formarem uma área de atrito maior com a superfície de saída tendem a desgastar bastante a ferramenta.

O grupo M é um grupo com propriedades intermediárias e aplicações múltiplas, utilizados em aços resistentes a altas temperaturas, resistentes a corrosão normalmente aços inoxidáveis.

A vida de uma ferramenta é uma das mais importantes considerações econômicas na usinagem dos metais. Condições de corte onde ocorrem quebras, desgaste excessivo e avarias faz com que a ferramenta de corte não produza mais elevando assim o custo na produção. (BOOTHROYD et. al., 2006)

2.2.1 Revestimentos para ferramentas

Revestir uma ferramenta tem como objetivo maior aliar características múltiplas às ferramentas de corte dando uma performance bem superior a uma ferramenta sem revestimento na usinagem de materiais ferrosos. A grande influência deste revestimento se dá em razão da grande proteção contra os desgastes, redução do atrito no corte, fazer cortes a seco e aumentar sua vida útil. Os revestimentos são adicionados tendo como base da ferramenta o metal duro.

A Figura 2 representa a composição de uma ferramenta de metal duro com múltiplos revestimentos.

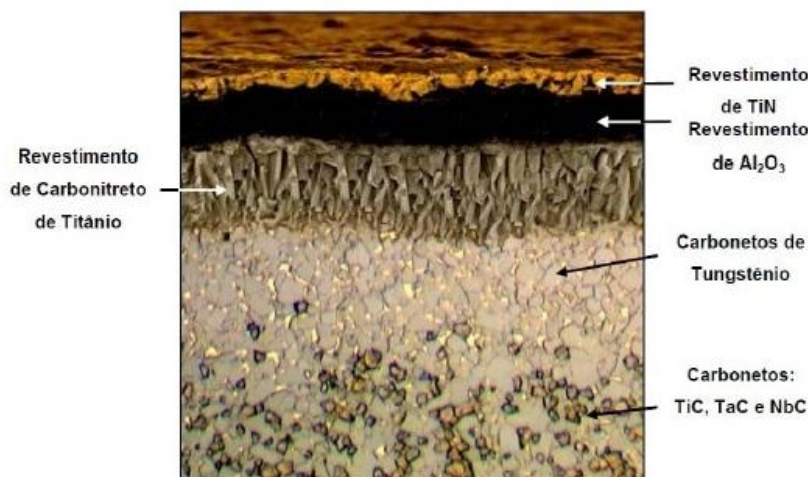


Figura 2 – Microestrutura do metal duro (NORMA ISO 513 2004).

A resultante de se revestir uma ferramenta de corte é obter propriedades mecânicas como resistência ao desgaste, dureza a quente e tensões compressivas. Como propriedades físicas, tem-se a estabilidade química, boa adesão e resistência à corrosão, tanto a temperatura ambiente quanto à temperaturas elevadas (BOUZAKIS et. al., 1999).

Existem vários modos de se fazer o revestimento de ferramentas, entre eles o processo CVD (deposição química a vapor) que consiste em depositar material sólido a partir de uma fase gasosa. Neste processo, o substrato é colocado num reator aquecido à temperatura superior a 1000°C que recebe alimentação através de gases. O princípio do processo é a reação química entre os gases. O produto desta reação é um material sólido que condensa sobre todas as superfícies dentro do reator formando uma película de revestimento desejada sobre o substrato. De acordo com Eskildsen, S.S. et. al. (1999), os revestimentos depositados por CVD tem espessura de 5 e 20µm.

O Processo PVD (deposição física a vapor) é uma técnica de deposição de filmes finos metálicos ou cerâmicos através da vaporização destes materiais em camaras especiais. De forma geral este processo envolve controle de aquecimento, potencial e pressão. O processamento PVD é feito sob alto vácuo e temperaturas que variam entre 150°C e 500°C. O Material de revestimento sólido de alta pureza (metais como titânio, cromo, e alumínio) é evaporado por calor ou bombardeado com ions (deposição catódica). Ao mesmo tempo, é introduzido um gás reativo como nitrogênio formando um composto com vapor metálico que se deposita nas ferramentas na forma de um revestimento fino e altamente aderente.

No PVD, assim como no CVD, as espécies precursoras da reação encontram-se na fase de vapor. Apesar de similares, os processos CVD e PVD não competem entre si. Ao contrário disso, nas plataformas mais modernas de produção de filmes ultrafinos, os processos são empregados de forma íntegra potencializando as vantagens que cada um tem intrinsecamente e consequentemente minimizando os fatores desfavoráveis. No processo PVD se encontram crateras profundas (diâmetros de 5 - 40µm), estruturas cônicas com diâmetros de 1µm, poros e bolhas que se apresentam ao longo do revestimento. Isso foi estudado por Panjan, et. al., (2008), utilizando microscopia de varredura e microscopia de força atômica e perfilometria.

Através dos processos de deposição, são utilizados diversos revestimentos como o carboneto de titânio (TiC) e carbonitreto de titânio (TiCN) que possuem excelente resistência ao desgaste por abrasão. Sua dureza é da ordem de 3000HV, tem baixa tendência de soldagem com o material da peça, dificultando o desgaste por adesão, formação de aresta postiça de corte e baixo coeficiente de dilatação térmica.

Utiliza-se também o óxido de alumínio (Al₂O₃) (processo CVD) que garante a estabilidade térmica em temperaturas elevadas, alta resistência a ataques químicos e à oxidação. Apresenta pequena resistência a choques térmicos e mecânicos.

Outro revestimento utilizado é o nitreto de titânio (TiN) (processo PVD) onde se reduz o coeficiente de atrito entre a pastilha e o cavaco. É quimicamente mais estável que o TiC, tem menor tendência a difusão com aços, suas espessuras da camada está entre 5 a 7µm. Tem uma dureza de aproximadamente de 2400HV, temperatura máxima de trabalho de 600°C e a coloração amarela (PRENGEI et. al.,1998). A Figura 3 apresenta a os valores de dureza Vickers para os principais revestimentos.

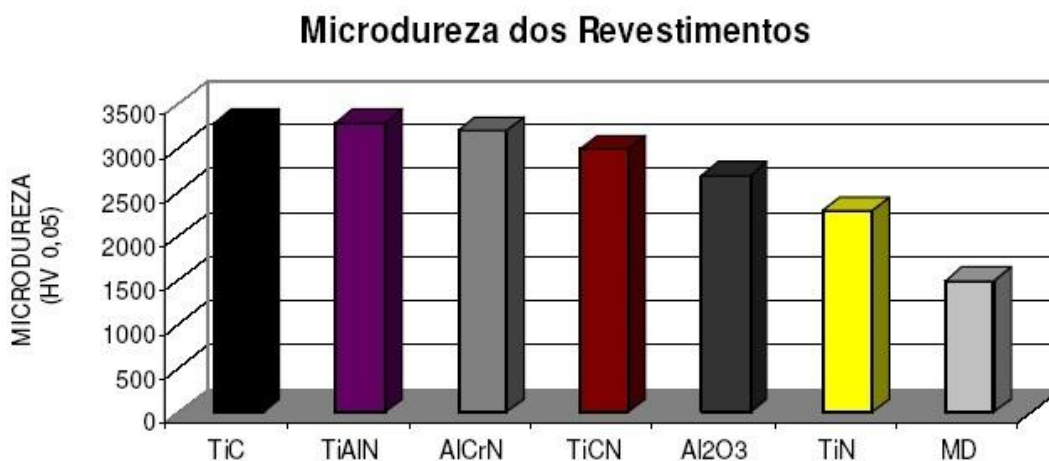


Figura 3 - Microdureza Vickers dos principais revestimentos de ferramenta de corte. (Abele et al., 2002).

Em uma inspeção final no processo de revestimento, verificam-se vários fatores para se obter um produto de qualidade, dentre eles composição química da camada, estrutura, aderência ao substrato e propriedades mecânicas (ORNELAS SANTOS, 2004).

2.3 Desgaste da ferramenta de corte

O desgaste de uma ferramenta é considerado como uma perda contínua e microscópica de partículas da ferramenta devido à ação do corte (DINIZ; MARCONDES; COPPINI; et. al., 2000). São considerados como problemas críticos na usinagem, pois prejudica a produção e diminui a qualidade final do produto. Considera-se que esta ferramenta tem-se uma vida útil que é definida como sendo o tempo em que a mesma trabalha efetivamente, sem perder o corte ou até que se atinja o critério de fim de vida (ISO 8688 -1).

O percurso de corte estabelecido através da vida da ferramenta (t) em minutos pode ser expresso pela equação:

$$Lc = Vc * \frac{t}{1000}$$

eq.(01)

Vc = Velocidade de corte

Lc = Percurso de corte

O percurso de avanço para uma vida da ferramenta pode ser expresso: (DINIZ et al. 2001)

$$Lf = f * n * t$$

eq.(02)

n = número de rotações em rpm

t = tempo

f = avanço em mm/rot.

O desgaste pode ser avaliado através de métodos diretos, nos quais se mede a geometria da ferramenta através de inspeção visual, utilizando lupas, e inspeção ótica, utilizando microscópios. Nos métodos indiretos, utiliza-se a aquisição de valores medidos como aumento das vibrações, aumento do ruído, piora da qualidade superficial da peça e aumento de forças na usinagem.

Por maior que seja a dureza e a resistência ao desgaste das ferramentas de corte e por menor que seja a resistência mecânica da peça de trabalho, a ferramenta sofrerá um processo de destruição que, mais cedo ou mais tarde, exigirá sua substituição (MACHADO et al.1999).

A figura 4 mostra alguns tipos de desgaste e suas variáveis de medição no desgaste em ferramentas de usinagem.

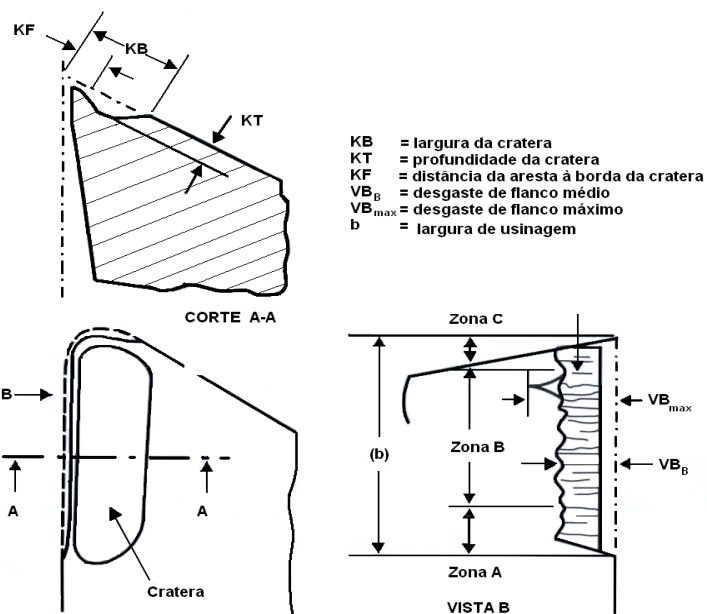


Figura 4 - Alguns tipos de desgaste e as variáveis de medição do desgaste em ferramentas de usinagem (NORMA ISO 3585, 1993).

De acordo com a norma ISO 3585, desgastes nas ferramentas de corte de aço rápido, metal duro e cerâmica são quantificados utilizando-se os parâmetros: $KT = 0,06 + 0,3 f$, onde f é avanço em mm/rev, $VB_B = 0,3$ mm, $VB_{máx} = 0,6$ mm como critério de vida da ferramenta (Figura 4).

2.3.1 Tipos de desgaste

Durante o processo de usinagem dos metais, ocorre o contato físico da ferramenta com a peça e o contato do cavaco com a ferramenta, em um determinado meio e condições dinâmicas de corte. Isto conseqüentemente acarretará mudanças na geometria e na forma original da aresta de corte da ferramenta, devido à ocorrência de desgaste progressivo.

A figura 5 demonstra as principais áreas de desgaste de uma ferramenta de corte.

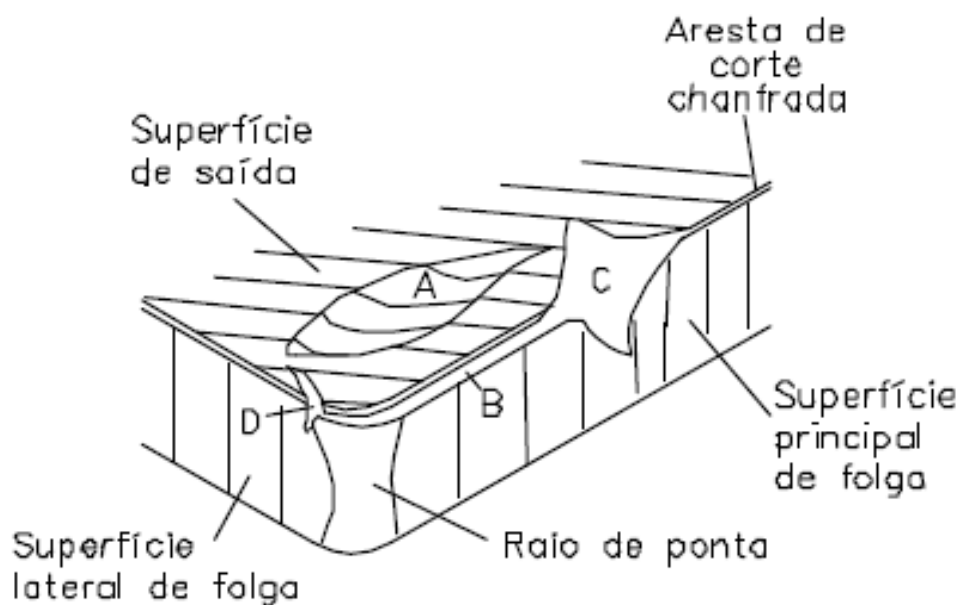


Figura 5 - Principais áreas de desgaste de uma ferramenta de corte (Dearnley e Trent e Wright, 1982).

Em cada área de desgaste de uma ferramenta é condicionado um desgaste específico como na superfície de saída, onde se origina o desgaste de cratera. O desgaste está associado às elevadas temperaturas geradas na interface cavaco ferramenta, ocorrendo devido à combinação de mecanismos de desgaste denominados difusão e adesão. A profundidade e a largura da cratera formada estão relacionadas à velocidade e ao avanço empregados durante o processo de corte (FERRARESI, 1977). Ocorrendo o crescimento do desgaste de cratera, gera-se a quebra da ferramenta quando tal desgaste se encontra com o desgaste frontal (DINIZ et. al., 2000).

A figura 6 representa o desgaste de cratera de uma ferramenta localizada na superfície de saída de uma ferramenta.

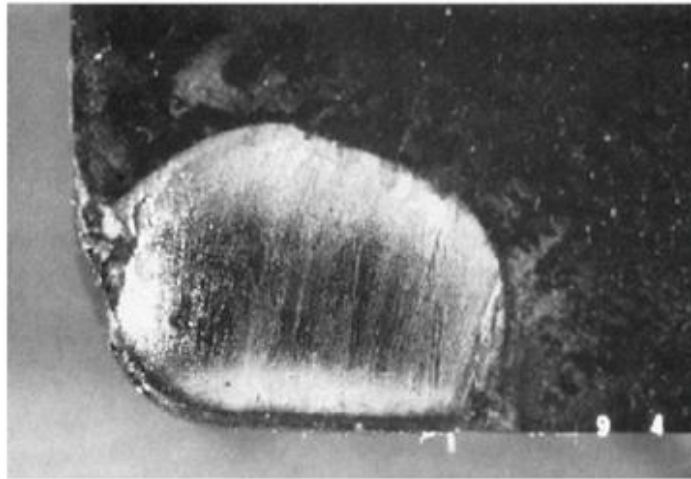


Figura 6 - Desgaste de cratera na superfície de saída de uma ferramenta (INTRODUÇÃO AOS PROCESSOS DE USINAGEM 2010).

É dado como desgaste de entalhe a avaria formada na aresta principal de corte aparecendo nas extremidades do flanco da ferramenta, tendo como prováveis características: concentrações, tensões na ferramenta e uma camada abrasiva de óxido na superfície a ser usinada (SHAW, M. C., 1984). (Figura 7)



Figura 7 - Desgaste de entalhe na superfície de saída de uma ferramenta (INTRODUÇÃO AOS PROCESSOS DE USINAGEM 2010).

Outro desgaste encontrado está localizado na superfície de folga da ferramenta, pois este apresenta perda neste ângulo de folga durante a usinagem, tendo um maior contato com a peça, aumentando assim seu atrito. Isto faz com que a peça perca suas características dimensionais e piore no seu acabamento superficial. Este desgaste é considerado o mais comum no fresamento sendo como processo definidor da falha de uma ferramenta (DINIZ et. al., 2000). (Figura 8)

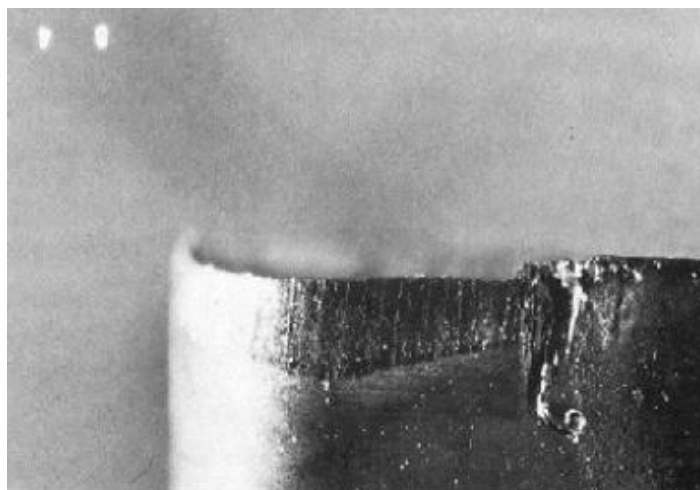


Figura 8 - Desgaste de flanco na superfície de saída de uma ferramenta (INTRODUÇÃO AOS PROCESSOS DE USINAGEM 2010).

Este desgaste é incentivado pelo aumento da velocidade de corte. A figura 9 apresenta o desgaste de flanco de uma ferramenta constando três etapas de sua evolução.

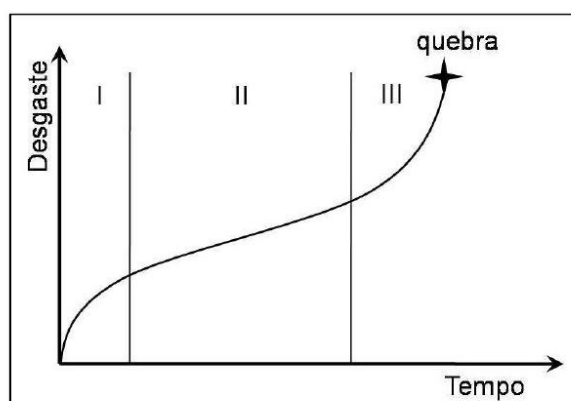


Figura 9 - Comportamento do desgaste de uma ferramenta ao longo de sua vida T (LENZ ET AL 1978).

Na primeira etapa, a curva possui alta taxa de desgaste flanco, caracterizada pela fase de acerto das arestas cortantes e adaptação do processo. A etapa II é caracterizada por um desgaste contínuo, uniforme e uma evolução menos acentuada. Com a evolução do desgaste, é atingida a etapa III, onde a ferramenta chega ao seu fim de vida, ou fase catastrófica por motivos de alto desgaste ou falha, devendo assim ser substituída (LENZ et. al., 1978).

2.4 Mecanismos de desgaste

É considerado como mecanismo de desgaste todo fenômeno distinto capaz de provocar ou causar um desgaste de uma ferramenta de corte. A difusão, abrasão, oxidação e adesão são mecanismos que promovem desgastes através de deformação plástica por cisalhamento, ocorridos na usinagem de metais com alto ponto de fusão em ferramentas de aço rápido. Ocorre também a deformação por altas tensões de compressão ou entalhe cujo processo ocorre na usinagem dos materiais de alta dureza (TRENT et al., 2000).

A figura 10 mostra alguns destes mecanismos ocorridos na usinagem.

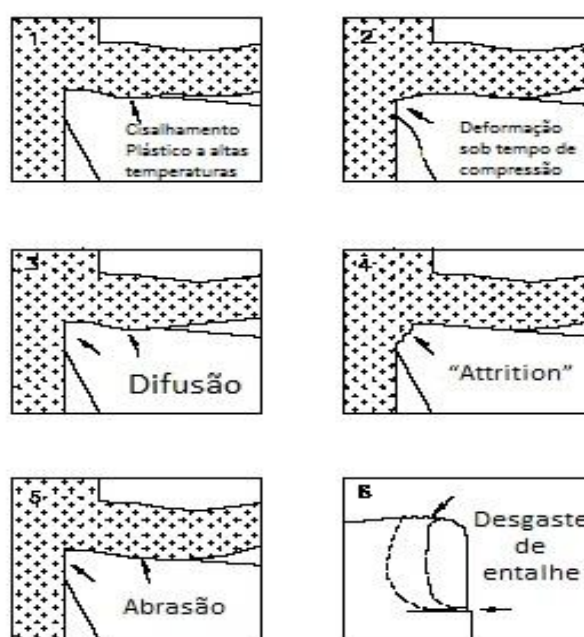


Figura 10 - Mecanismos de desgaste (MACHADO et. al., 1999)

Será predominantemente uma ou outra forma de desgaste sobre as demais, apesar de normalmente trabalharem em conjunto, pois dependem da natureza do material usinado ou das condições de usinagem (FERRARESI, 1977).

O processo de difusão é um fenômeno microscópico ativado pela temperatura na zona de corte. É um processo característico de altas velocidades, responsável pelo desgaste da cratera. A difusão do estado sólido consiste na transferência de átomos de um metal a outro. Depende da temperatura, da duração do contato e da afinidade física química dos dois metais envolvidos. As temperaturas associadas ao desgaste difusivo situam-se em torno de 850 °C a 1200 °C que não promove a fusão do material (TRENT et al., 2000). (Figura 11)



Figura 11 - Mecanismo de difusão ocorrido na superfície de saída da ferramenta (ISCAR, 2001)

Mecanismos como a abrasão são dados como uma das principais causas de desgaste da ferramenta, tanto o frontal quanto o desgaste de cratera. Este desgaste é mais provável de ocorrer em baixas velocidades de corte tendo a peça alta dureza. Em ferramentas de metal duro, que possui quantidades muito grandes de carboneto de tungstênio (WC) em sua composição, o desgaste abrasivo é pouco eficiente no que diz respeito à degradação da ferramenta (MACHADO et al.1999). (Figura 12)



Figura 12 - Mecanismo de abrasão na ferramenta de corte (ISCAR, 2001).

Quando se trabalha durante a usinagem em velocidades relativamente baixas, onde duas superfícies metálicas são postas em contato sob cargas moderadas e baixas temperaturas, forma-se entre elas um extrato metálico que provoca aderência. O fenômeno da aderência está presente na formação da aresta postiça de corte (APC) e o contato com a ferramenta torna-se menos contínuo. A utilização adequada do fluido de corte principalmente com efeito lubrificante e o recobrimento da ferramenta de corte com materiais de baixo coeficiente de atrito, como nitreto de titânio, faz com que haja uma grande influência na diminuição desse tipo de desgaste (DINIZ et. al., 2000).

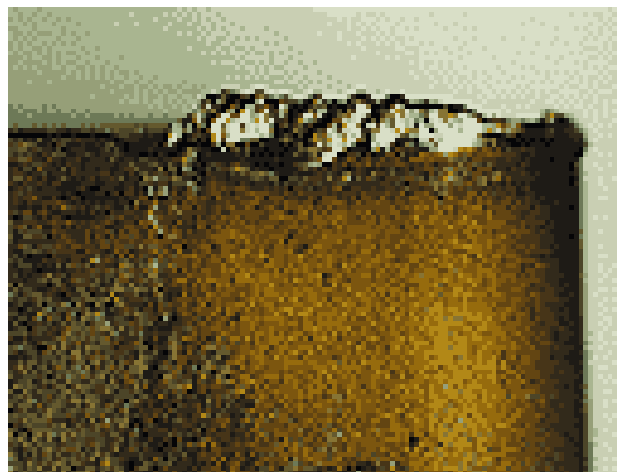


Figura 13 - Ferramenta com APC na aresta de corte (ISCAR, 2001).

Altas temperaturas e presença de ar e água contida nos fluidos de corte geram oxidação para a maioria dos metais. O desgaste gerado pela oxidação se forma especialmente nas extremidades do contato cavaco-ferramenta devido ao acesso do ar nesta região, sendo esta uma possível explicação para o surgimento do desgaste de entalhe.

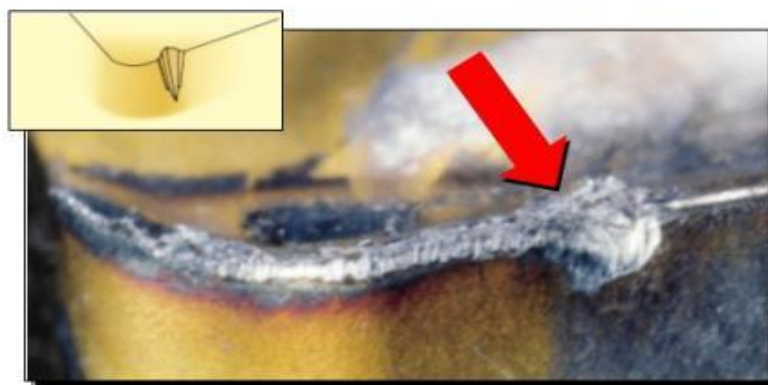


Figura 14 - Desgaste por oxidação da aresta de corte da ferramenta (ISCAR, 2001).

2.5 Fluidos de corte

Fluidos de corte são aqueles líquidos e gases aplicados na ferramenta e no material que está sendo usinado a fim de facilitar a operação de corte. Frequentemente são chamados lubrificantes ou refrigerantes em virtude das suas principais funções na usinagem. Usando o fluido corretamente podem-se obter muitos benefícios, observados na qualidade e na produtividade (EUGENE et. al., 1998).

A seleção do fluido de corte adequado depende do tipo de serviço a executar. Com o avanço das experiências, notou-se que o fluido de corte pode contribuir de muitas maneiras para a melhoria do corte, exercendo funções como refrigerar, lubrificar, reduzir o desgaste da ferramenta, remoção de cavacos, proteger contra corrosão e melhorar o acabamento superficial. Utiliza-se como refrigerante, pois tal ação ocorre pela retirada do calor do conjunto peça/ferramenta após este ser gerado durante a usinagem, trabalhando no sentido de aumentar a vida da ferramenta.

Ainda tendo ação refrigerante, o fluido de corte pode beneficiar também a peça, onde acabamento superficial ou tolerância dimensional são críticas.

O fluido de corte como lubrificante permite uma redução do coeficiente de atrito entre o cavaco e a ferramenta e ferramenta e peça, o que facilita o fluxo de cavaco reduzindo a força e a potência de corte e, conseqüentemente, a temperatura (DINIZ et. al., 2000).

Na usinagem a baixas velocidades de corte, o fluido tem como função a lubrificação, já que para que este efeito ocorra, o fluido tem que penetrar nas interfaces cavaco/ferramenta, tendo como função refrigerante a altas velocidades de corte (SANTOS et. al., 2003).

Quanto à capacidade do fluido de corte limpar os cavacos da zona de corte, depende da viscosidade e vazão do mesmo, além da operação de usinagem e do tipo do cavaco sendo formado (MACHADO et. al., 2000).

A seleção correta de um fluido de corte dependerá de uma série de fatores como aspectos econômicos, tipo de máquina, descarte, problemas à saúde humana, meios de controle, métodos de aplicação e compatibilidade do metal com o fluido. Dentre os aspectos considerados, não existe um fluido que atenda a todos estes requisitos. Então procura-se definir as prioridades na operação de usinagem a ser desempenhada, verificando, dentre os fluidos existentes, aqueles que mais se adequam aos aspectos prioritários definidos.

2.5.1 Classificação dos fluidos de corte

A seleção de um fluido de corte adequado depende do tipo de serviço a ser executado. A classificação é feita por grupos, tendo em primeiro lugar o ar. O ar, algumas vezes, é utilizado como fluido de corte e tem como função expulsar o cavaco da região do corte utilizado em fresamento de rasgos e cavidades.

Classifica-se também, em segundo lugar, os aquosos, que têm a água como primeira substância usada como fluido de corte, com grande capacidade de refrigeração. Porém não tem poder de lubrificação, provocando a corrosão de materiais metálicos. As emulsões classificadas como aquosas são uma pequena porcentagem de óleo emulsificável dispersos em pequenas gotículas na água. São especialmente adequadas para operações de usinagem em que o requisito principal é a refrigeração.

Microemulsões ou fluidos semi-sintéticos são formadores de emulsões. Estes fluidos são composições de fluidos sintéticos que contêm somente uma pequena porcentagem de óleo mineral emulsionável, variando de 5% a 30% do total do fluido concentrado, o qual é adicionado a fim de proporcionar uma emulsão estável, translúcida e composta de minúsculas gotículas de óleo.

Os fluidos sintéticos são soluções químicas constituídas de materiais (sais) orgânicos e inorgânicos dissolvidos em águas, não contendo óleo mineral. Possuem elevada resistência à oxidação do fluido, oferecem boa proteção anticorrosiva e a refrigeração.

Em outra classificação, existem os óleos onde seu calor específico é cerca da metade da água e, por isso, têm capacidade menor de refrigeração. Por outro lado, suas qualidades lubrificantes são bem melhores, o que resulta em menor quantidade de calor gerado. Quanto mais baixa a viscosidade desses óleos, maior é seu poder de refrigeração. Os óleos leves são, por isso, indicados em operações de usinagem a altas velocidades, onde o calor deve ser rapidamente dispersado.

Os óleos mais viscosos são utilizados onde se tem velocidade de corte menor, avanço e profundidade de corte maiores, tendo como resultado uma alta taxa de remoção de cavaco e alta geração de calor. Necessita-se então de um óleo que adira à ferramenta, formando uma película de óxido que diminui o coeficiente de atrito e, conseqüentemente, a geração de calor (DINIZ et. al., 2000).

2.5.2 Aplicação do fluido de corte

De acordo com Ebbrell (1999), a aplicação correta dos fluidos na região de corte é de grande importância, pois possibilita o aumento da capacidade de sua lubrificação e refrigeração, além de promover a remoção do cavaco mais facilmente. A aplicação correta promove menores dispersões dos fluidos na região de corte, mas para isso é necessário levar em conta o tipo e posicionamento do local, o que tem grande influência no processo de corte.

Existem três direções possíveis de aplicação do fluido de corte: (a) aplicação convencional de fluido na forma de jorro à baixa pressão na superfície superior do cavado; (b) aplicação de fluido entre a superfície de saída e a parte inferior do cavaco e (c) aplicação do fluido entre a superfície de folga da ferramenta e a peça. (Figura 15)

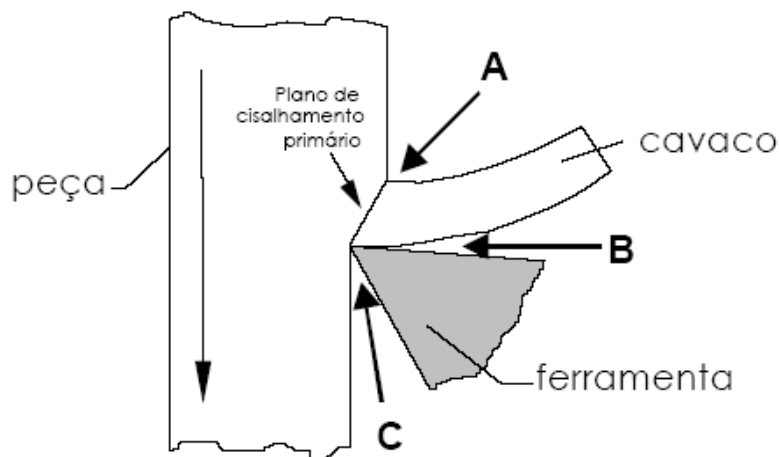


Figura 15 - Sentidos práticos da aplicação do fluido de corte (MACHADO et. al., 1999)

De acordo com estas direções, existem inúmeras combinações para sua aplicação, como o sistema a alta pressão cujo objetivo principal é melhorar a quebra do cavaco. Um jato de fluido, a alta pressão ($48,1 \text{ kgf/cm}^2$ à vazão de $15,1 \text{ l/min}$) é jogado em duas direções: na primeira, sobre o cavaco, na direção sobre-cabeça (A). Na outra, contra o cavaco na superfície de saída da ferramenta conforme direção B (Figura 15). Machado (1999), utilizando este método no torneamento e aplicando o jato nas direções A e B, obteve bons resultados usinando ligas aero-espaciais, como titânio e de níquel, que possuem difícil controle do cavaco pelos métodos convencionais. Este método também foi utilizado no processo de fresamento por Kovacevic et. al. (1995).

Com o objetivo de reduzir o contato cavaco-ferramenta, foi desenvolvido um sistema em que o fluido passa pelo interior da ferramenta através de canais à alta pressão que chegará até a superfície de saída. Neste sistema, a ferramenta de corte mantém seu interior e a superfície de saída da ferramenta constantemente sob resfriamento, mantendo-se fria. O cavaco é resfriado depois de ser deformado no plano primário, o que no caso do método sobre-cabeça acontece simultaneamente (o resfriamento e a deformação). Isto tende a reduzir a temperatura nesta região e aumentar a resistência ao cisalhamento do material da peça, aumentando as forças de usinagem (ISCAR, 2001).

Outro sistema de aplicação é através do jorro do fluido a baixa pressão ou por gravidade. É o mais utilizado, pois tem fácil manuseio e aplicação. O fluido é jorrado sobre a cabeça contra a superfície do cavaco e na superfície de saída da ferramenta. O cavaco é arrastado para fora da interface devido ao fluido que vai a seu encontro (SANTOS et. al., 2003).

Utiliza-se também a vazão extremamente baixa de fluido (MQF – Mínima Quantidade de Fluido) que é a pulverização de uma pequena quantidade de óleo, na forma de névoa, juntamente com a aplicação de ar comprimido tendo como objetivo aumentar a capacidade de lubrificação.

Diversos estudos demonstram uma melhor empregabilidade da alta pressão do fluido de corte em processos de torneamento, contrariando os métodos convencionais, que utilizam baixa pressão. A penetração do fluido na interface cavaco-ferramenta não é muito eficaz se o jato for aplicado à baixa pressão, o que pode elevar demasiadamente a temperatura na zona de corte. Aumentando-se a pressão, é possível reduzir a quantidade de fluido injetada. Além disso, a utilização do fluido a alta pressão traz outros benefícios como: aumento da lubrificação, redução da temperatura da interface cavaco-ferramenta e a peça, que ocorre também pela diminuição do contato entre o cavaco e a ferramenta (KAMINSKI, A. e EZUGWU, B., ambos citados por DINIZ et. al., 2007).

A redução significativa da temperatura de corte com a aplicação de alta pressão foi comprovada por Machado et. al. (1997). Foram realizadas experiências com uso do fluido de corte à alta pressão (14,5 Mpa) direcionado para ferramenta no torneamento de Ti6Al4V e de Inconel 901. Estes resultados foram comparados aos obtidos com aplicação convencional do fluido de corte, tendo apresentado melhor eficácia. Além disso, a usinagem da liga de titânio contribuiu para o aumento significativo da vida da ferramenta, em todas as condições de corte testadas.

Resultado semelhante foi obtido por Ezugwu et. al. (citado por (DINIZ et. al., 2007) ao usinar Inconel 718 em velocidades diferentes de corte e sob as pressões de corte diferentes até 20,3 Mpa. Foi utilizada ferramenta cerâmica reforçada, que teve sua vida útil aumentada com o aumento da pressão do fluido, em todas as velocidades de corte. Apenas quando a pressão aumentou de 15 a 20,3 Mpa, este resultado diferiu. Nestas condições, a vida da ferramenta diminuiu rapidamente em função do entalhe. Segundo os autores, este desgaste excessivo deve-se à erosão da ferramenta cerâmica ocasionada pela refrigeração a alta pressão.

2.6 Integridade superficial

Devido à ação de ferramentas de corte ou processos de fabricação tendo como mecanismo a retirada de material, a superfície da peça é caracterizada pela textura superficial e pelas transformações metalúrgicas em sua região superficial (FIELD et. al., 1972). Através de um processo de fabricação, podem ocorrer alterações na superfície ou em uma camada subsuperficial da ordem de grandeza de micrometros conhecida como integridade superficial. Uma superfície por mais bem acabada sempre apresenta irregularidades.

Segundo Field et. al. (1972), o estudo da integridade superficial pode ser dividido em três níveis. O conjunto de informações que permitem a caracterização da natureza da camada superficial da peça é feito por meio da textura, da macro e microestrutura e microdureza. O conjunto padrão inclui informações a respeito do comportamento da peça usinada, como resistência à fadiga, a corrosão sob tensão e as tensões residuais. O conjunto completo contém os dois primeiros e ainda informações complementares sobre a resistência e a fadiga, e resultados de ensaios mecânicos como tração e tensão de ruptura.

A figura 16 mostra os efeitos externos e efeitos internos da superfície.

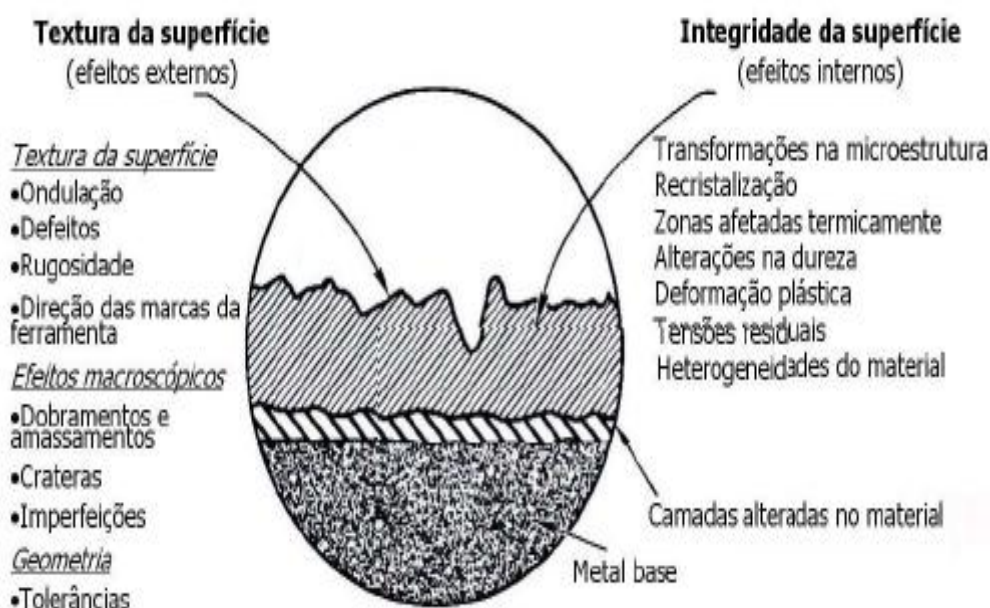


Figura 16 - Representação dos efeitos externos e efeitos internos da superfície (OLIVEIRA, 2004).

Dangal (citado por DINIZ, 2000) define as características de uma superfície em três níveis: erros de forma, ondulação e rugosidade. (Figura 17)

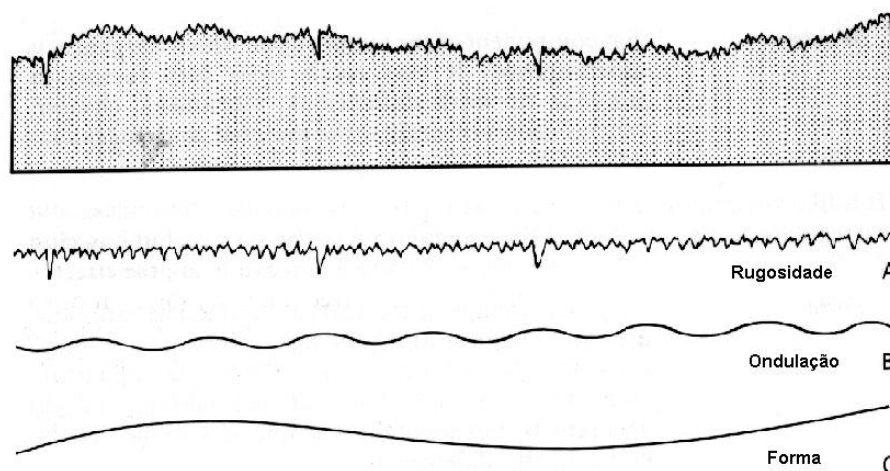


Figura 17 - Textura de uma superfície mostrando efeitos de rugosidade (A), ondulações (B) e erro de forma (C). (OLIVEIRA, 2004).

Erros de forma são considerados macro geométricos, verificáveis por meio de instrumentos convencionais como micrômetros, relógios comparadores e projetores de perfis. Ondulações decorrem de irregularidades superficiais ou erros geométricos cujos espaçamentos estão em uma escala dimensional maior que as irregularidades consideradas como rugosidades. Pode ser causada por vibrações e deflexões da ferramenta e/ou peça, devido a forças de corte. A rugosidade superficial se distingue da ondulação pelo espaçamento, que nesta última é maior. É considerado um conjunto de irregularidades, pequenas saliências e reentrâncias que caracterizam uma superfície resultante do processo de corte. A geometria de uma ferramenta de corte e a rigidez do conjunto podem afetar a rugosidade superficial (NALBANT et. al., 2007).

A medição da textura de uma superfície pode ser feita por contato ou óticas. No primeiro caso, utiliza-se um apalpador que percorre a superfície deslocando-se de acordo com a topografia da região. Os deslocamentos são ampliados e registrados e, então, é determinado o perfil da superfície que, quando é quantificado, atribui um valor equivalente a uma unidade de comprimento, geralmente na ordem de μm . (Figura 18)

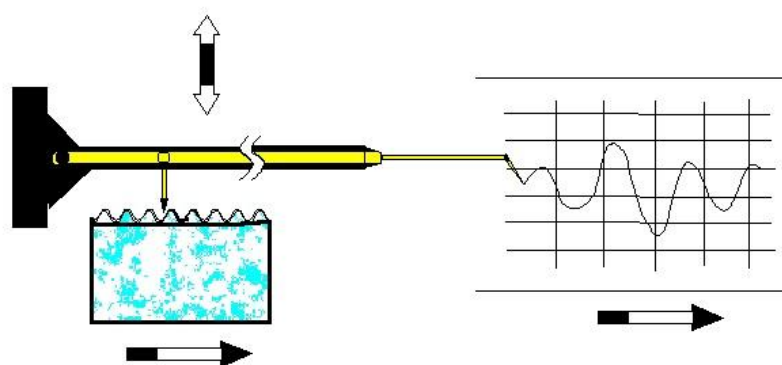


Figura 18 - Esquema de um instrumento de controle de uma superfície (OLIVEIRA, 2004).

Os instrumentos que utilizam o princípio ótico funcionam com base no princípio em que a topografia de uma superfície influencia o comportamento de um feixe luminoso que incide sobre ela.

Segundo Chevrier et. al. (2003), um dos fatores importantes na avaliação da qualidade da peça é a rugosidade superficial, por que influencia as características funcionais da peça tais como resistência à fadiga, compatibilidade e atrito funcional.

O principal objetivo da análise quantitativa da rugosidade é a identificação de uma coleção de parâmetros suficientes para caracterização do acabamento superficial. (CHEVRIER et. al., 2003)

2.6.1 Parâmetros de rugosidade

Para dar acabamento adequado às superfícies é necessário, portanto, determinar o nível em que elas devem ser usinadas, ou seja, deve-se adotar um parâmetro que possibilite avaliar a rugosidade.

A rugosidade média (R_a) é a média aritmética dos valores absolutos das ordenadas de afastamento (Y_n) e dos pontos de perfil de rugosidade em relação à linha média dentro de um percurso de medição.

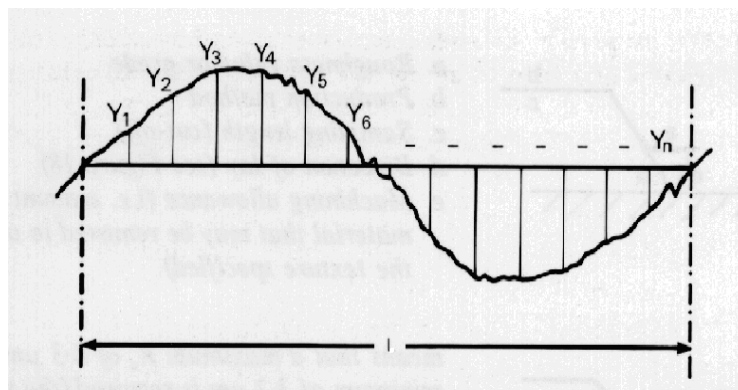


Figura 19 - Representação do perfil de rugosidade Ra, para um comprimento de amostragem (l) (MARTINS, 2008)

Essa grandeza pode corresponder à altura de um retângulo cuja área é igual à soma absoluta das áreas delimitadas pelo perfil de rugosidade e pela linha média, tendo por comprimento o percurso de medição (l) representada matematicamente. A expressão corresponde à equação 03:

$$R_a = \frac{|y_1| + |y_2| + \dots + |y_n|}{n}$$

eq.(03)

A rugosidade Ra tem como aplicação em superfícies em que o acabamento apresenta sulcos bem orientados como no fresamento e em superfícies com pouca responsabilidade.

Outro parâmetro utilizado é a rugosidade (Rz) considerada como rugosidade de profundidade onde o valor anotado é a distância vertical entre o pico mais alto e o mais profundo vale dentro de uma amostragem de comprimento (cut off).

A rugosidade de profundidade (Rz) é a média aritmética dos Rzi em amostragens consecutivas, ou seja, é a soma dos valores absolutos das ordenadas dos pontos de maior afastamento acima e abaixo da linha média.

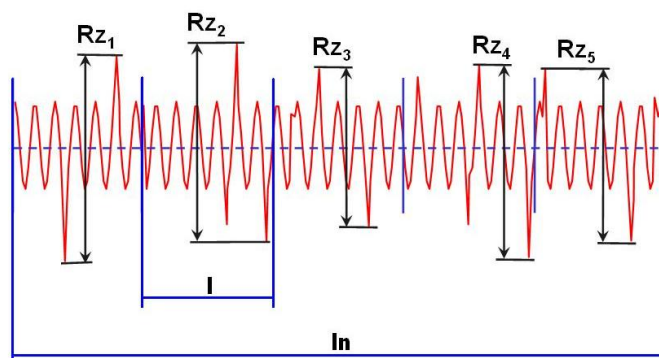


Figura 20 - Parâmetro de rugosidade Rz (MARTINS, 2008).

onde:

l_n = comprimento de avaliação

l = Comprimento de amostragem (cut-off).

Este parâmetro é aplicado em superfícies onde o perfil é periódico e conhecido. Uma vantagem deste parâmetro é que riscos isolados serão considerados apenas parcialmente de acordo com o mesmo número de pontos isolados.

Utiliza-se também como parâmetro o (R_t) que corresponde a distância vertical entre o pico mais alto e o vale mais profundo no comprimento de avaliação (l_n).

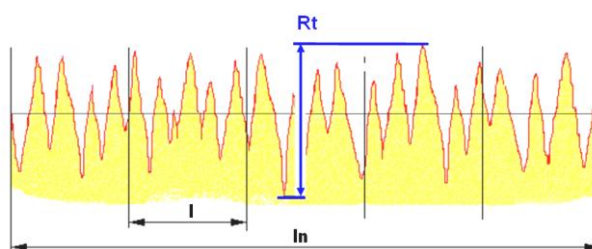


Figura 21 - Parâmetro de rugosidade R_t (MARTINS, 2008)

onde:

l_n = comprimento de avaliação

l = Comprimento de amostragem (cut-off).

O parâmetro R_t tem o mesmo emprego que o R_y , mas com maior rapidez pois considera o comprimento de amostra igual ao comprimento de avaliação.

O parâmetro de usinagem como o avanço é o fator que mais afeta a rugosidade superficial de uma peça, e para um dado raio de ferramenta, varia com o

quadrado da velocidade de avanço. Conclui-se que com o acréscimo do raio do inserto, profundidade de corte e diminuição da velocidade de avanço decrescem a rugosidade superficial (NALBANT et. al., 2007).

Afetam diretamente no consumo de energia, formas geométricas de uma ferramenta de corte como ângulo de saída radial e raio da ferramenta onde se tem a área de contato cavaco e ferramenta (RAO, 2006).

A qualidade superficial e rugosidade de uma peça tem grande importância em processo de fresamento, pois influencia nas características funcionais da peça como compatibilidade, resistência à fadiga e atrito superficial. Esta análise é a identificação de uma coleção de parâmetros suficientes para caracterizar o acabamento superficial (CHEVRIER et. al., 2003).

Todos estes mecanismos de leituras ou processos de desgaste são observados na prática. Mas certamente um prevalecerá sobre os demais, dependendo principalmente do material da peça e da ferramenta, da operação de usinagem, das condições de corte e do emprego do fluido de corte.

3. PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS

3.1 Materiais e Métodos Experimentais

O material utilizado para realização deste trabalho foi o aço ABNT4140, com dureza 25 ± 2 HRC, na forma de barras de diâmetro de 100mm e comprimento de 100mm. A análise química foi realizada utilizando espectrômetro ótico de emissão. Os corpos-de-prova do aço ABNT4140 para os ensaios mecânicos foram cortados das barras no sentido radial. O corte foi realizado em serra de fita, marca Franho, com lâmina de vídea. As amostras para análise metalográfica foram cortadas na direção radial.

Essas amostras foram fresadas e, posteriormente, preparadas em lixas, marca Norton, com granulometrias de 180, 220, 320, 400, 500, 600 e 1000 mesh. Em seguida, foi realizado polimento de acabamento em feltro impregnado com pasta de diamante de dimensão de 7, 3 e 1 μm . Para observação da microestrutura, estas amostras foram atacadas com nital 4%, e, posteriormente, analisadas em microscópio ótico marca Neophot, modelo 32, acoplado a uma estação de trabalho com analisador de imagem, marca Leco.

Esta barra foi submetida ao tratamento térmico de têmpera e revenimento em forno de martêmpera (banho de sais). A temperatura de austenitização foi de 860°C com tempo de manutenção de 1 hora nessa temperatura. Posteriormente, resfriou-se em forno de martêmpera a 140°C durante 20 minutos e, em seguida, resfriamento ao ar até a temperatura ambiente. A temperatura de revenimento foi 620°C com tempo de manutenção de 2 horas, e resfriamento no forno até a temperatura ambiente. Após o tratamento térmico, esmerilhou-se a superfície tratada para medir a dureza em durômetro Rockwell no sentido radial a cada 5mm do diâmetro externo, comprovando a dureza em $\text{HRC} = 25 \pm 2$ em toda a seção.

As operações de fresamento foram realizados no laboratório de Processos de Fabricação da PUC Minas, em um centro de usinagem de fabricação da ROMI, modelo Discovery 560 (Figura 22).



Figura 22 - Centro de usinagem Discovery 560, utilizado no fresamento do aço ABNT4140 temperado/revenido.

Fonte: fotos do autor

Os programas utilizados no CNC (anexo I) para fresamento do material foi desenvolvido no laboratório da PUC MG. Na realização dos ensaios, foi utilizada velocidade de corte (V_c) de 120m/min, pois de acordo com o fabricante Walter, a velocidade de corte pode variar de 100m/min a 140m/min para este tipo de ferramenta e com este aço tratado. Os avanços de corte (f_z) utilizados como desbaste foram de 0,1; 0,15; e 0,20 mm/rev, com profundidade de corte (a_p) constante de 1 mm (Tabela 2).

Tabela 2
Parâmetros de corte utilizados no fresamento do aço ABNT 4140 temperado/revenido

| Parâmetros de corte | |
|---------------------|------|
| V_c (m/min) | 120 |
| a_p (mm) | 1 |
| f_z (mm/rev) | 0,1 |
| | 0,15 |
| | 0,20 |

Fonte: (WALTER, 2010).

O conjunto ferramenta-porta-ferramentas tem fixação mecânica por interferência. Os diâmetros das fresas utilizadas foram de 20 e 40mm, com um canal interno para aplicação do fluido de corte. Utilizou-se duas fresas diferentes para avaliar em qual das fresas se obtém um melhor resultado de desgaste e acabamento superficial. Nas fresas, foram montadas as três (3) pastilhas de corte enumeradas de 1 a 3 com o objetivo de avaliar o desgaste nas três posições. Estas pastilhas são fixadas por parafuso, com o auxílio de uma chave fornecida juntamente com o porta-ferramenta (Figura 23 (a) e (b)).



(a)



(b)

Figura 23 - Fresas de diâmetros de 20 e 40mm montadas com três pastilhas de corte intercambiáveis e fixadas por mandris de encaixe sob interferência no centro de usinagem.

Fonte: Fotos do autor

As pastilhas utilizadas no fresamento, foram de metal duro WC-Co P-35, revestidas com TiN, fabricadas pela Walter. Empresa conceituada no mercado de usinagem com grande variedade de ferramentas de corte. O modelo APGW090308R-A57WTP35 é apropriado para aços de baixa liga e tratado termicamente (Figura 24).



Figura 24 - Pastilha de metal duro, revestida por TiN, utilizada nos experimentos de fresamento (WALTER, 2010).

Os ensaios foram realizados com fluido de corte semissintético aplicado pelo centro da ferramenta. O fluido de corte é emulsionável em água, fabricado pela Blaser Brasil, na concentração de 8% em volume. Para o sistema de aplicação do fluido pelo centro da fresa, a vazão do fluido foi constante de 15 l/min, circulando no sistema com uso de uma bomba de alta potência com pressão de 10bar.

A trajetória da fresa foi a partir de um fresamento frontal na qual as arestas cortantes ativas estão no eixo frontal da ferramenta (fresa). O eixo da fresa neste caso é perpendicular a superfície gerada, fazendo um movimento de “vai e vem” na peça a ser usinada. (Figura 25).

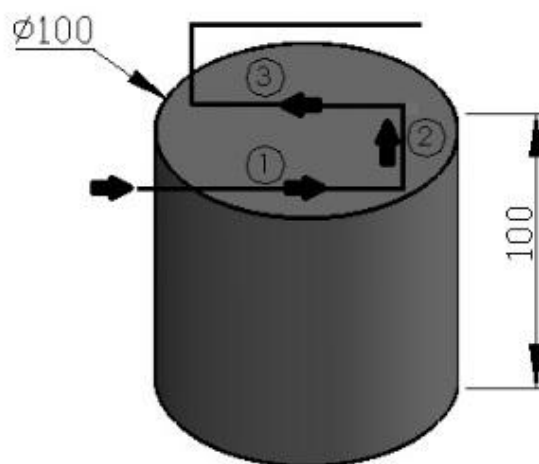


Figura 25 – Desenho representativo do percurso da fresa durante o corte e posições de leituras do rugosímetro
Fonte: Desenho do autor

Para cada fresa foi utilizado um programa diferente (ANEXO I), pois os diâmetros são de 20mm e 40mm. Neste programa a trajetória da fresa diâmetro de 20mm fez-se com que a ferramenta deslocasse no sentido radial 16mm (posição 2). E para a fresa de diâmetro de 40mm fez-se com que a ferramenta deslocasse no sentido radial 26mm (posição 2), verificando assim que a ferramenta de diâmetro de 40mm retira mais material por passadas. Porém no final de cada tempo de 5 minutos a quantidade de material retirado foi maior para a fresa de diâmetro de 20mm devido sua rotação ser maior e influenciando diretamente na velocidade de avanço.

O acabamento superficial da peça usinada foi avaliado com utilização de um rugosímetro, marca Taylor Hobson, modelo Surtronic 3+ (Anexo I). Esse rugosímetro foi fixado à mesa e, após cada intervalo de tempo de 5 minutos de fresamento,

deslizou-se o apalpador sobre a superfície da peça, nas três posições como ilustra a Figura 26.

Para perfis resultantes do fresamento e distância entre sulcos de usinagem variando de 0,1mm e 0,32mm, onde esta distancia é aproximadamente igual ao avanço recomenda-se a utilização um comprimento de amostragem (cut-off) de 0,8mm a partir do início de cada medição (ISO 4288/1996) (Figura 26).



Figura 26 - Rugosímetro Taylor Hobson – Surtronic 3+ em funcionamento, evidenciando a medição da rugosidade.

Fonte: Foto do autor

O desgaste da ferramenta de corte foi avaliado por meio de um microscópio ótico de medição, marca Mitutoyo, modelo TM-505 e série 176, aumento de 15X (Figura 27).



Figura 27 - Microscópio de medição Mitutoyo, modelo TM-505 e série 176

Fonte: Foto do autor

A cada período de 5 minutos de usinagem, a ferramenta de corte foi levada ao microscópio para avaliação do desgaste. O tempo de fresamento total foi de 50 minutos. Foi construído um dispositivo para fixação à plataforma do microscópio, e, assim, evita-se a retirada das pastilhas da fresa que provoca dano à rosca do parafuso de fixação. Após fixação da ferramenta na base do microscópio, ajusta-se a linha do visor no valor zero da escala. Em seguida, desloca-se a linha do visor até a maior espessura do desgaste no flanco. A diferença medida é o desgaste do flanco. Este microscópio trabalha com eixo de coordenadas cartesianas, sendo os valores medidos na variação das ordenadas.

Para a velocidade de corte de 120m/min, o desgaste de flanco da ferramenta de corte foi medido em cada uma das três posições de fixação da pastilha na fresa, objetivando verificar possíveis diferenças de desgaste com a posição. Acompanhou-se durante o fresamento o comportamento das pastilhas quanto ao deslocamento radial sendo medidos a cada 5 minutos em um equipamento, medidor de excentricidade da marca Carlzeiss Jena, onde através de um relógio comparador com resolução milesimal se faz a medição do batimento. (figura 28)



Figura 28 - Medidor de excentricidade com relógio comparador milesimal
Fonte: Fotos do autor

Foram feitos 3 experimentos para cada avanço de 0,1; 0,15 e 0,20mm/ver e velocidade de corte de 120m/min nos quais foram obtidos o valor médio de desgaste e o desvio padrão. O desvio padrão foi a calculado através da equação.

$$S = \sqrt{\frac{\sum (x_i - \bar{x})^2}{n-1}}$$

eq(04)

X_i = valor de cada evento individual ($X_1, X_2, X_3... X_n$)

X = média aritmética dos valores X_i

Os Valores médios e ± 1 desvio padrão foram mostrados em gráficos de desgaste contra volume retirado .

Posteriormente, as pastilhas foram analisadas em Microscópio Eletrônico de Varredura Quanta 200 - FEG – FEI - 2006 com canhão de emissão por efeito de campo para acompanhar o desgaste durante o fresamento. (Figura 29).



Figura 29 – Microscópio Eletrônico de Varredura.
Fonte: Foto do autor

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 Análise química e metalográfica do material

A análise química da barra utilizada no trabalho é mostrada na Tabela 3.

Tabela 3
Análise química da barra de aço ABNT 4140 em percentagem em peso

| C | Mn | Si | P | S | Cr | Ni | Mo | Al | Cu | Sn | V | N |
|------|------|------|-------|-------|------|------|------|-------|------|-------|-------|--------|
| 0,39 | 0,80 | 0,20 | 0,013 | 0,016 | 0,91 | 0,02 | 0,16 | 0,009 | 0,10 | 0,009 | 0,005 | 0,0066 |

Fonte: espectrômetro ótico de emissão

A Figura 30 mostra a microestrutura do aço ABNT 4140 temperado/revenido, onde se observa, respectivamente a presença de martensita revenida.

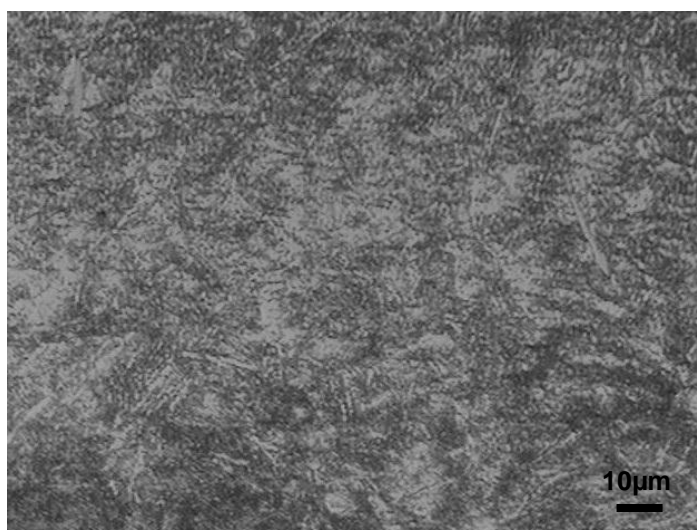
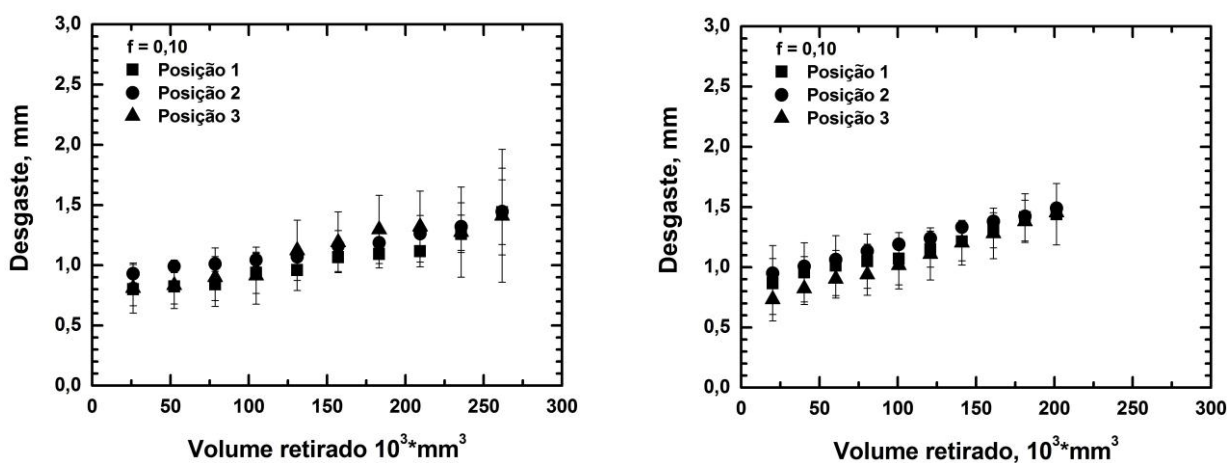


Figura 30 – Microestrutura do aço ABNT 4140 temperado/revenido - Aumento 500x - Ataque: Nital 4%.

Fonte: Foto do autor

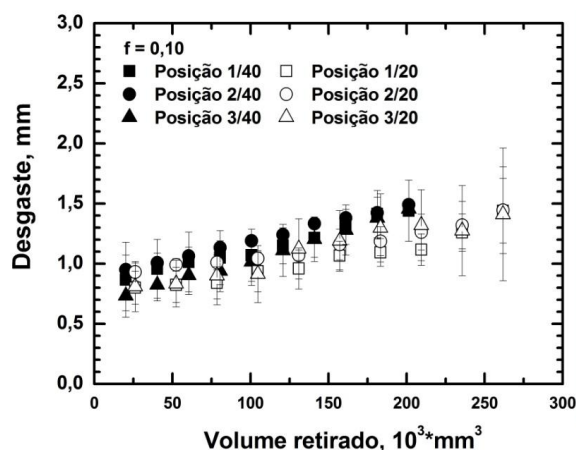
Para cada ponto plotado nos gráficos a seguir foram medidos o seu desgaste de flanco nas três posições e calculado seu volume retirado.

A Figura 31 (a) e (b) mostra a evolução do desgaste máximo de flanco da ferramenta de corte com diâmetros de 20mm (a) e 40mm (b) em relação ao volume retirado para o fresamento com fluido de corte da barra temperada e revenida. A Figura 31 (c) mostra a correlação dos desgastes. Utilizou-se velocidade de corte de 120m/min, avanço de 0,1 mm/rev e profundidade de corte de 1mm



(a)

(b)



(c)

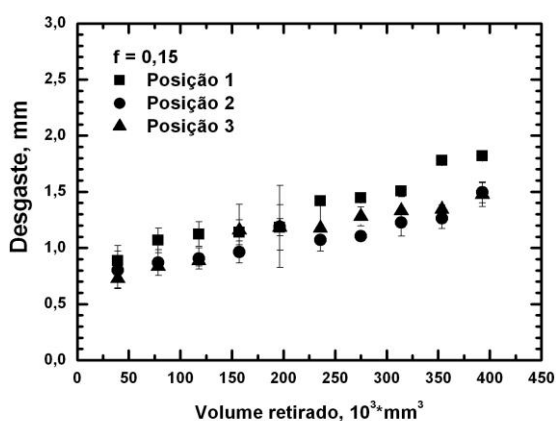
Figura 31 - Avaliação do desgaste das ferramentas de corte em relação ao volume retirado, nas três posições, revestida com TiN, com velocidade de corte de 120 m/min, e avanço de 0,1 mm/rev, fresamento com fluido de corte.

Fonte: Elaborado pelo autor

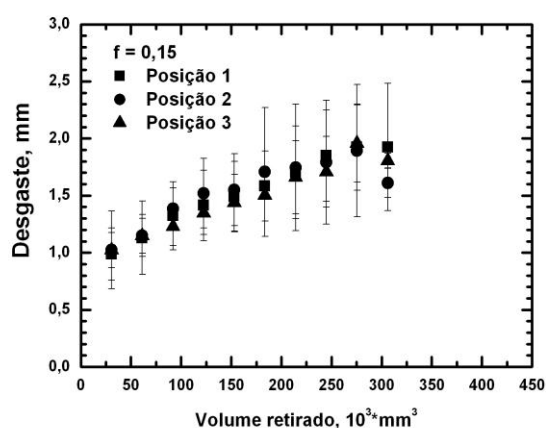
Observa-se que, quando se usinou com uma velocidade de corte de 120 m/min e avanço de 0,1 mm/rev, o desgaste de flanco de ambas as ferramentas de corte foi maior, chegando a 1,5mm acima $200 \times 10^3 \text{ mm}^3$. Porém a Figura 34 (a) nos

mostra que em função do volume de material retirado observa-se que a ferramenta de diâmetro de 20mm retira mais material em mm^3 , nota-se que a ferramenta de diâmetro de 40mm desgastou mais mesmo retirando menos material.

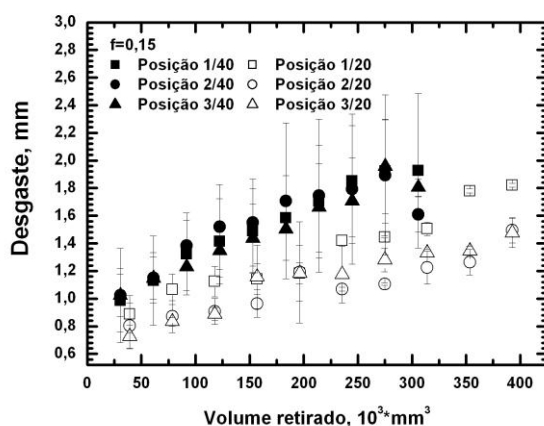
A Figura 32 (a) e (b) mostra a evolução do desgaste máximo de flanco da ferramenta de corte com diâmetros de 20 (a) e 40mm (b) em relação ao volume retirado, para o fresamento com fluido de corte da barra temperada e revenida. A Figura 32 (c) mostra a correlação dos desgastes. Utilizou-se velocidade de corte de 120m/min, avanço de 0,15mm/rev e profundidade de 1mm.



(a)



(b)



(c)

Figura 32 - Avaliação do desgaste das ferramentas de corte, em relação ao volume retirado, nas três posições, revestida com TiN, com velocidade de corte de 120 m/min, e avanço de 0,15 mm/rev, fresamento com fluido de corte.

Fonte: Elaborado pelo autor

Observa-se que, quando se usinou com uma velocidade de 120 m/min e avanço de 0,15 mm/rev, o desgaste de flanco da ferramenta de corte de diâmetro de 40mm foi maior em relação a ferramenta de diâmetro de 20mm. Nota-se que no primeiro ponto o desgaste de flanco inicia-se com 1mm, chegando a 2mm acima de

$250 \times 10^3 \text{ mm}^3$. Nota-se que a fresa de diâmetro de 20mm retirou mais material do que a fresa de diâmetro de 40mm e obteve um desgaste menor. Devido a quebra da ferramenta em um dos três testes nota-se que para o gráfico da fresa de diâmetro de 40mm o desgaste diminuiu.

A Figura 33 (a) e (b) mostra a evolução do desgaste máximo de flanco da ferramenta de corte com diâmetros de 20 (a) e 40mm (b) em relação ao volume retirado para o fresamento com fluido de corte da barra temperada e revenida. A Figura 33 (c) mostra a correlação dos desgastes. Utilizou-se velocidade de corte de 120m/min, avanço de 0,20mm/rev e profundidade de 1mm.

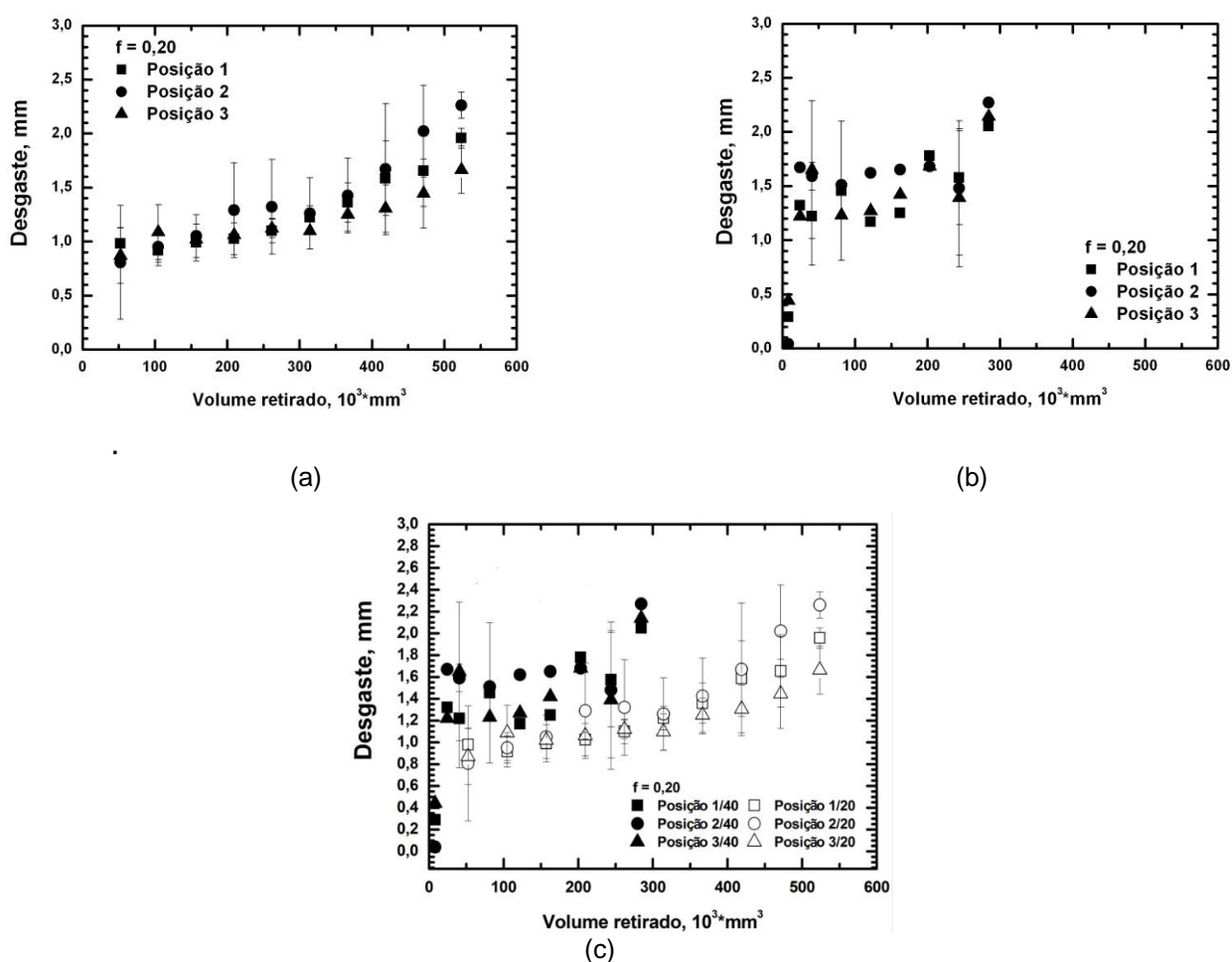


Figura 33 - Avaliação do desgaste das ferramentas de corte, em relação ao volume retirado, nas três posições, revestida com TiN, com velocidade de corte de 120 m/min, e avanço de 0,20 mm/rev, fresamento com fluido de corte.

Fonte: Elaborado pelo autor

Observa-se que, quando se usinou com uma velocidade de corte 120 m/min e avanço de 0,20 mm/rev, o desgaste de flanco da ferramenta de corte de diâmetro

de 20mm iniciou-se com 1mm de desgaste chegando a 2,3 mm com um volume de material retirado a cima $500 \times 10^3 \text{ mm}^3$.

Nota-se que para o gráfico com a fresa de diâmetro de 40mm foi necessário modificar a retirada da ferramenta para fazer medições dos desgastes pois os volumes foram menores que $50 \times 10^3 \text{ mm}^3$. Estas medidas foram necessários por motivos de alta potência da máquina e quebra prematura da ferramenta nos outros dois testes. Para este gráfico foram feitos média e desvio padrão apenas para três medições de desgaste onde se conseguiu usar. Tendo como resultado valores de desgaste de flanco maior para a fresa de diâmetro de 40mm pois obteve um volume menor de material retirado.

A Figura 34 (a) e (b) mostra os valores de rugosidade R_a , no aço ABNT 4140 temperado e revenido na posição 1 com fluido de corte, velocidade de corte 120m/min e avançosde 0,1; 0,15; 0,20mm/rev para a fresa de diâmetro de 20mm (a) e diâmetro de 40mm

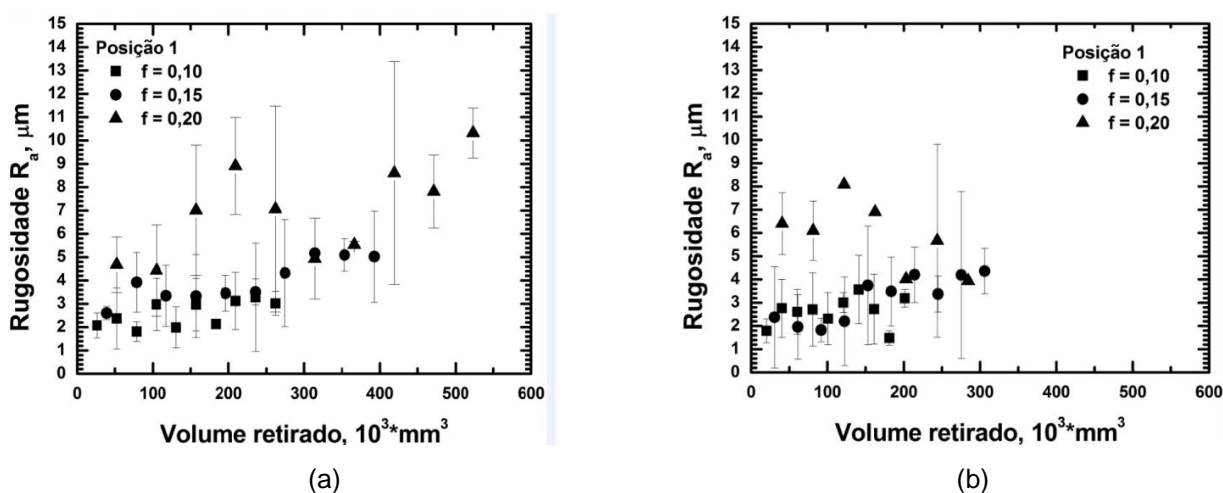


Figura 34- Análise de rugosidade R_a das superfícies usinadas para velocidade de corte de 120m/min, avanços de corte de 0,1, 0,15 e 0,20mm/rev, com fluido de corte.

Fonte: Elaborado pelo autor

Observa-se que para rugosidades R_a , os valores para a fresa de diâmetro de 20mm foram maiores para o avanço de 0,20mm/rev, em todos os tempos, chegando a 10 μm acima de $500 \times 10^3 \text{ mm}^3$, motivo pelo qual os valores de desgaste para este avanço foi maior.

Para a fresa de diâmetro de 40mm, nota-se que para volumes acima de $50 \times 10^3 \text{ mm}^3$ e avanço de 0,20mm/rev, os valores de R_a foram maiores chegando a $8 \mu\text{m}$. Tendo os valores de desgaste para este avanço valores acima de 2mm.

A Figura 35 (a) e (b) mostra os valores de rugosidade R_a , no aço ABNT 4140 temperado e revenido na posição 2 com fluido de corte, velocidade de corte 120m/min e avanços de 0,1, 0,15, 0,20mm/rev para fresa de diâmetro de 20mm (a) e diâmetro de 40mm

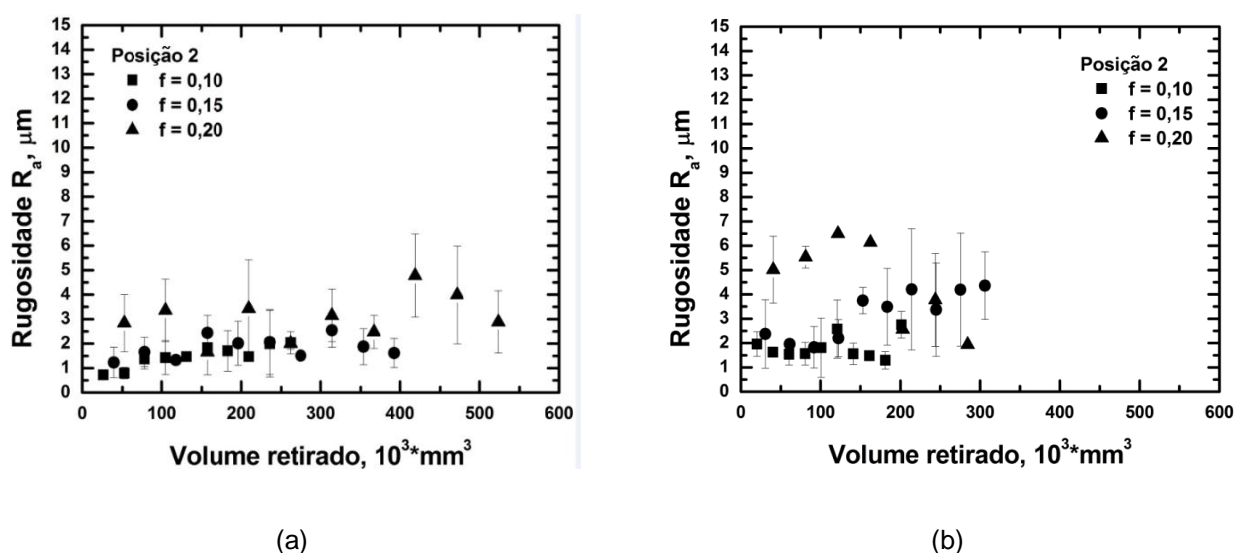


Figura 35 - Análise de rugosidade R_a das superfícies usinadas para velocidade de corte de 120m/min, avanços de corte de 0,1, 0,15 e 0,20mm/rev, com fluido corte.

Fonte: Elaborado pelo autor

Observa-se que para rugosidades R_a , os valores para a fresa de diâmetro de 20mm foram maiores para o avanço de 0,20mm/ver, acima de $400 \times 10^3 \text{ mm}^3$, chegando a $5 \mu\text{m}$. Para a fresa de diâmetro de 40mm, nota-se que para o avanço de 0,20mm/rev, chegando a $7 \mu\text{m}$ e um volume retirado acima de $150 \times 10^3 \text{ mm}^3$. Tendo os valores de desgaste para este avanço valores acima de 2mm.

A Figura 36 (a) e (b) mostra os valores de rugosidade R_a , no aço ABNT 4140 temperado e revenido na posição 3 com fluido de corte, velocidade de corte 120m/min e avanços de 0,1; 0,15; 0,20mm/rev para fresa de diâmetro de 20mm (a) e diâmetro de 40mm (b).

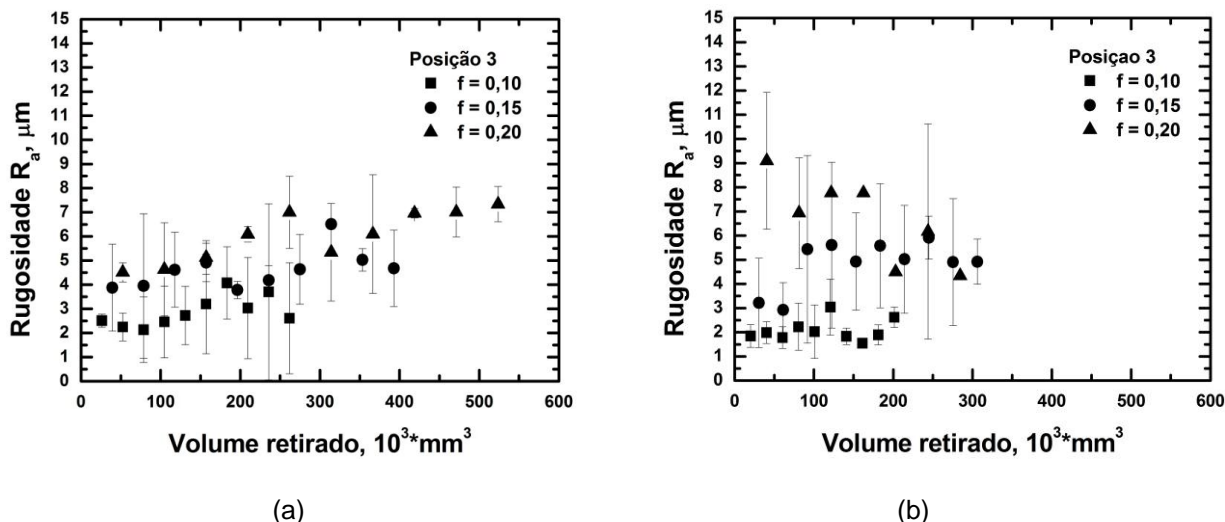


Figura 36 - Análise de rugosidade R_a das superfícies usinadas para velocidade de corte de 120m/min, avanços de corte de 0,1, 0,15 e 0,20mm/rev, com fluido de corte.

Fonte: Elaborado pelo autor

Observa-se que para rugosidades R_a , os valores para a fresa de diâmetro de 20mm foram maiores para o avanço de 0,20mm/rev, e valores superiores a $7\mu\text{m}$, motivo pelo qual os valores de desgaste para este avanço foi maior. Para a fresa de diâmetro de 40mm, nota-se que os valores foram maiores para o avanço de 0,20mm/rev, chegando a $9\mu\text{m}$. Tendo os valores de desgaste para este avanço valores acima de 2mm.

A Figura 37 (a) e (b) mostra comparação do desgaste de flanco das ferramentas de diâmetro de 20mm (a) e diâmetro de 40mm (b) na posição 1 para os avanços de 0,10; 0,15; 0,20mm/rev.

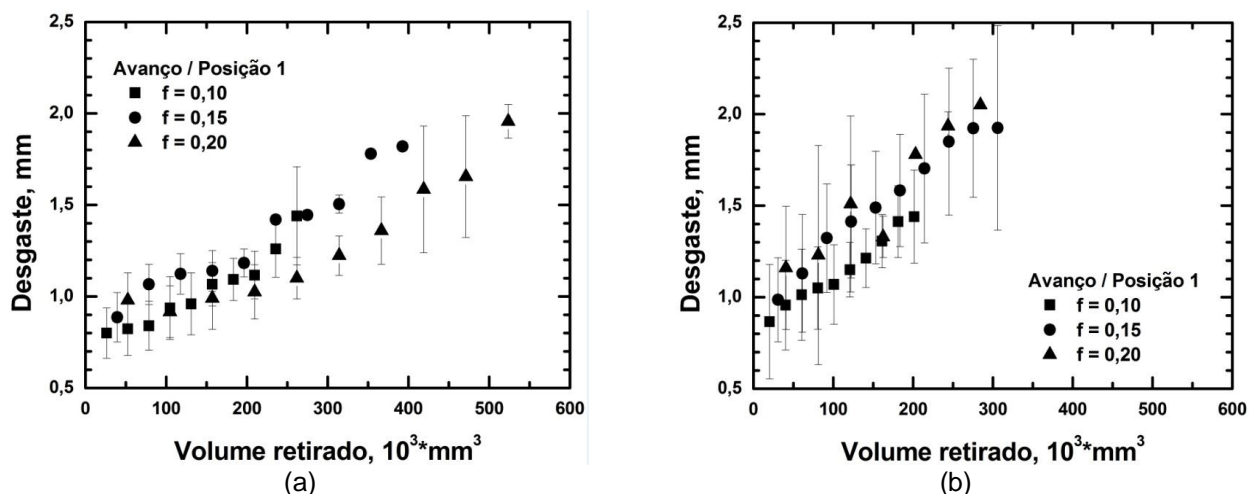


Figura 37 - Avaliação do desgaste das ferramentas de corte, na posição 1, em relação ao volume retirado, revestida com TiN, com velocidade de corte de 120 m/min, e avanços de 0,1,0,15, 0,20 mm/rev no fresamento com fluido de corte.

Fonte: Elaborado pelo autor

A figura (a) representa a evolução do desgaste comparando o avanço por posição. Nota-se que para o avanço de 0,1mm/rev tem-se uma retirada menor de material obtendo assim um desgaste menor, chegando a um valor máximo de 1,4mm com um volume retirado acima de $250 \times 10^3 \text{ mm}^3$. Já para os avanços de 0,15 e 0,20mm/rev nota-se uma inversão, mesmo com uma retirada maior de material o desgaste para o avanço de 0,2mm/rev foi menor para quase todo teste, sendo diferente na ultima medição chegando a 2,0mm. Observa-se no gráfico avanço por posição para a fresa de diâmetro de 40mm, prevalece que, para o menor avanço tem-se uma quantidade menor de material retirado e um menor desgaste durante o fresamento chegando a um desgaste de 1,4mm. Para o avanço de 0,15mm/rev obteve um desgaste de 1,9mm e para o avanço de 0,2/rev obteve um desgaste de 2,0mm

A Figura 38 (a) e (b) mostra os valores de batimento da ferramenta de diâmetro de 20mm (a) e diâmetro de 40mm (b) em relação ao volume retirado e avanços de 0,10mm/rev.

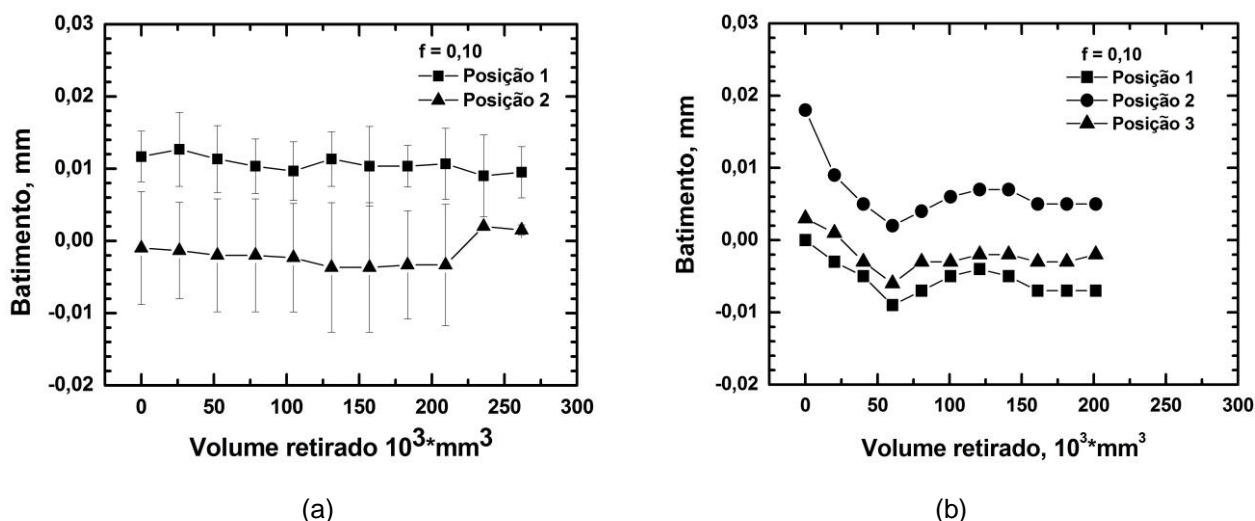
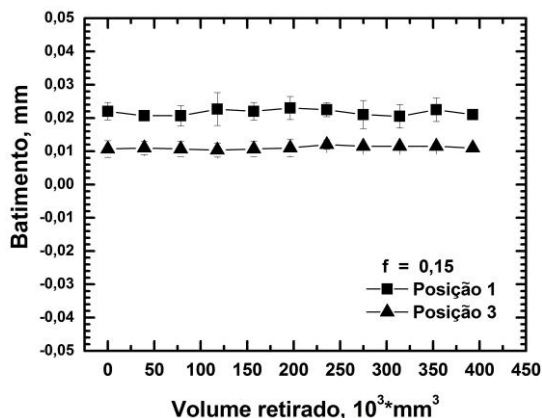


Figura 38 - Variação do batimento das ferramentas de corte, para velocidade de corte 120m/min, avanço de 0,1mm/rev, com fluido de corte.
Fonte: Elaborado pelo autor

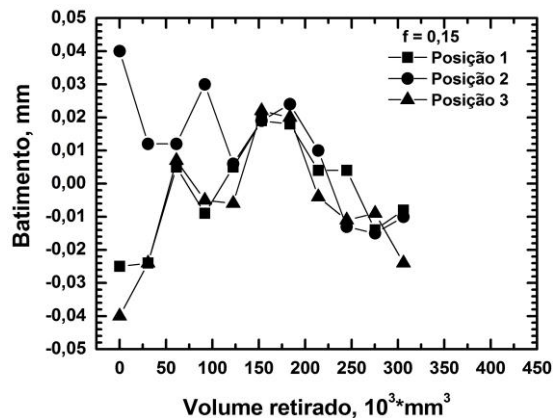
Observa-se que o batimento para a fresa de diâmetro de 20mm e avanço de 0,10mm/rev na posição 1, teve uma variação de 4 milésimos e para a posição 3 teve uma variação de 2 milésimos. Devido a fresa de diâmetro de 20mm não ter um furo central, não era possível obter o mesmo centro para as três pastilhas. Por isso não foram coletados dados para a posição 2. Observa-se que para a fresa de diâmetro de 40mm e avanço de 0,10mm/rev teve-se uma variação na posição 1 de 7milésimos.

Para a posição 2 teve-se uma variação 16 milésimos e a posição 3 uma variação de 9 milésimos.

A Figura 39 (a) e (b) mostra os valores de batimento da ferramenta de diâmetro de 20mm (a) e diâmetro de 40mm (b) em relação ao volume retirado e avanços de 0,15mm/rev.



(a)



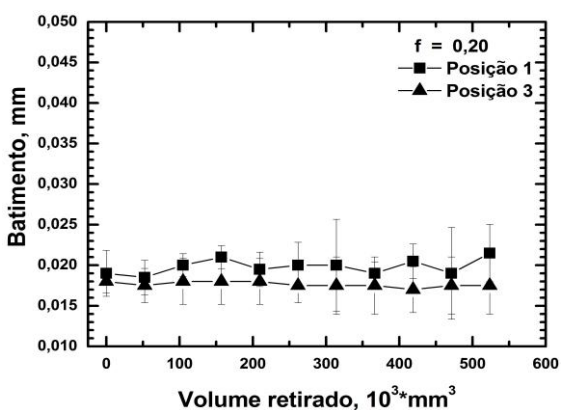
(b)

Figura 39 - Variação do batimento das ferramentas de corte, para velocidade de corte 120m/min, avanço de 0,15mm/rev, com fluido de corte.

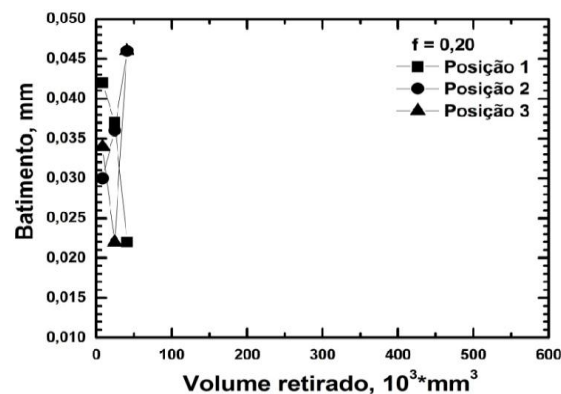
Fonte: Elaborado pelo autor

Observa-se que para a fresa de diâmetro de 20mm e avanço de 0,15mm/rev na posição 1 a variação foi de 4 milésimos e na posição 3 teve-se uma variação de 2 milésimos. Para a fresa de diâmetro de 40mm a posição 1 teve uma variação de 44 milésimos e a posição 2 teve uma variação de 55 milésimos. Para a posição 3 obteve-se uma variação de 64 milésimos.

A Figura 40 (a) e (b) mostra os valores de batimento da ferramenta de diâmetro de 20mm (a) e diâmetro de 40mm (b) em relação ao volume retirado e avanços de 0,20mm/ver



(a)

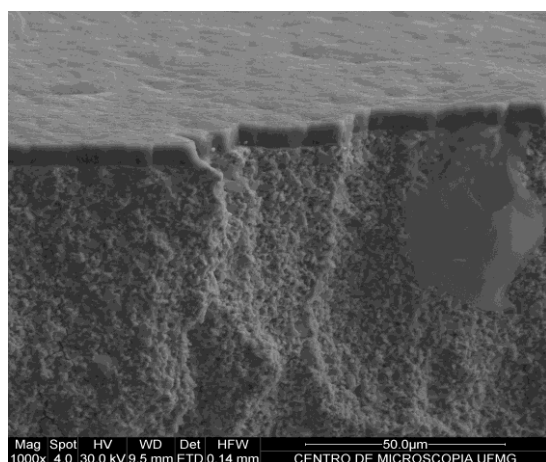


(b)

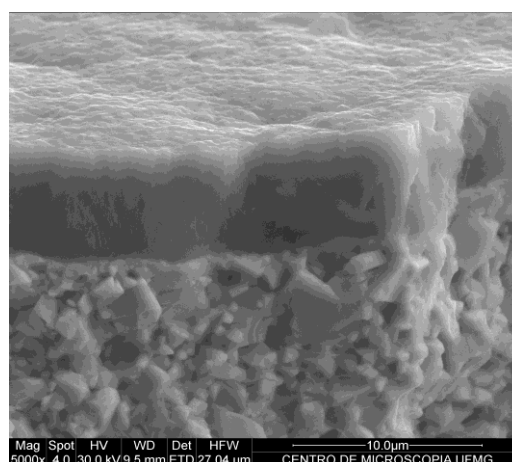
Figura 40 - Análise da variação do batimento das ferramentas de corte, para velocidade de corte 120m/min, avanço de 0,20mm/rev, com fluido de corte. Fonte: Elaborado pelo autor

Observa-se que o batimento para a fresa de diâmetro de 20mm e avanço de 0,20mm/rev teve-se uma variação de 6 milésimos na posição 1. Nota-se que na posição 2 obteve-se uma variação de 2 milésimos. Para o gráfico da fresa de diâmetro de 40mm nota-se que os maiores valores de batimento estão na posição 3 e no avanço de 0,20mm/rev, chegando a um valor de 24 milésimos. Para a posição 2 obteve-se uma variação de 16 milésimos. Observa-se também uma variação de 20 milésimos na posição 1, chegando a um valor máximo de tempo em 10 minutos de usinagem, devido a motivos de quebra prematura da ferramenta e alta potência da máquina podendo ocorrer sua parada emergencial e danificando a ferramenta.

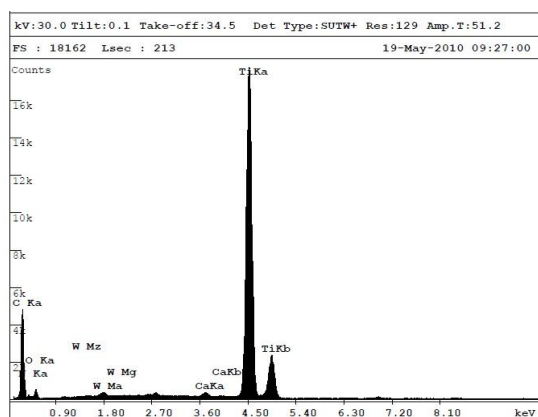
A Figura 41(a) e (b) mostra a ferramenta de corte em MEV após corte transversal para identificar e demonstrar a espessura do revestimento de aproximadamente de 4 μ m, e Figura 41 (c) o material do revestimento, e figura 41 (d) o material do substrato.



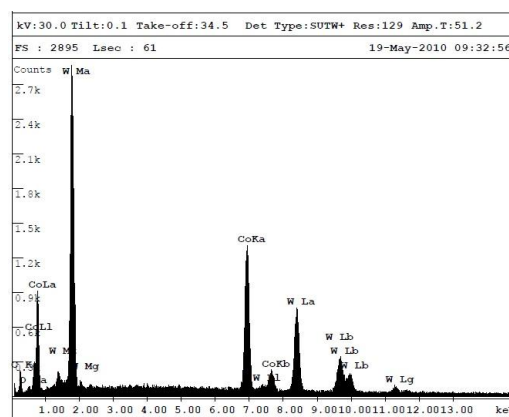
(a)



(b)



(c)



(d)

Figura 41 – Foto da ferramenta de corte após corte transversal para verificar espessura do revestimento (a) e (b), material do revestimento (c) e material do substrato(b).

Fonte: MEV Quanta 200 - FEG – FEI - 2006

Figura 42 (a) e (b) mostra a ferramenta de corte em MEV da fresa de diâmetro de 20mm após fresamento do aço ABNT4140 temperado e revenido, com fluido de corte, para velocidade de corte de 120m/min, avanço de corte 0,20mm/rev com o tempo de 1min.

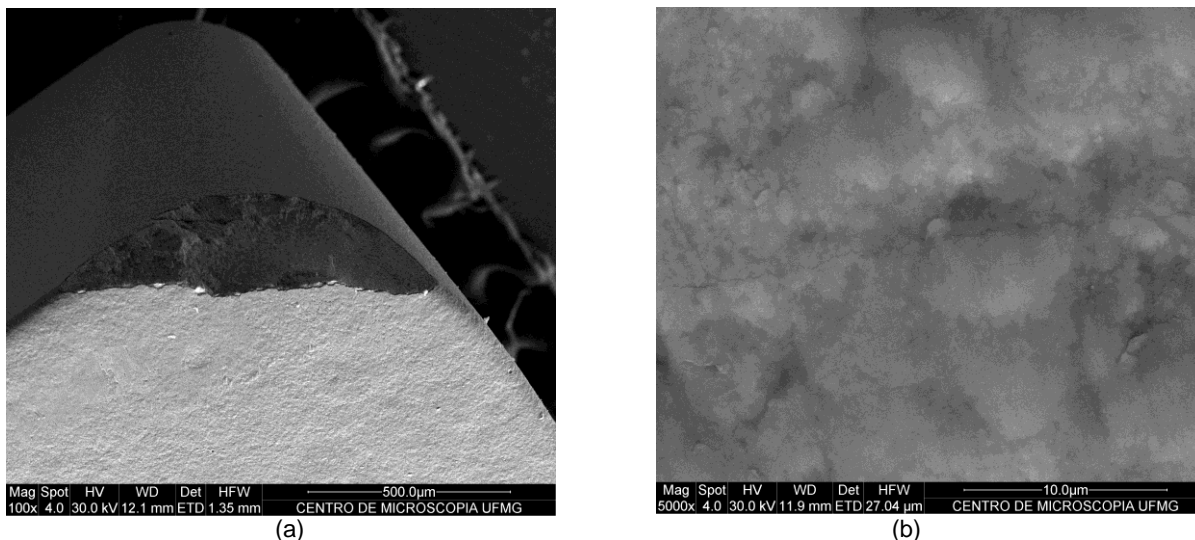


Figura 42 – Foto do desgaste da ferramenta de corte de diâmetro de 20mm na usinagem do aço ABNT 4140 temperado e revenido com fluido de corte com velocidade de corte 120m/min, avanço 0,20mm/ver, tempo de 1min de usinagem, ampliação de 100x (a), e ampliação 5000x (b).

Fonte: MEV Quanta 200 - FEG – FEI - 2006

Evidencia-se a presença de lascamento parcial do flanco e aresta de corte, deslocamento do revestimento de TiN e apresentando microtrincas.

Figura 43 (a) e (b) mostra a ferramenta de corte em MEV da fresa de diâmetro de 20mm após fresamento do aço ABNT4140 temperado e revenido, com fluido de corte, para velocidade de corte de 120m/min, avanço de corte 0,20mm/rev com o tempo de 3min.

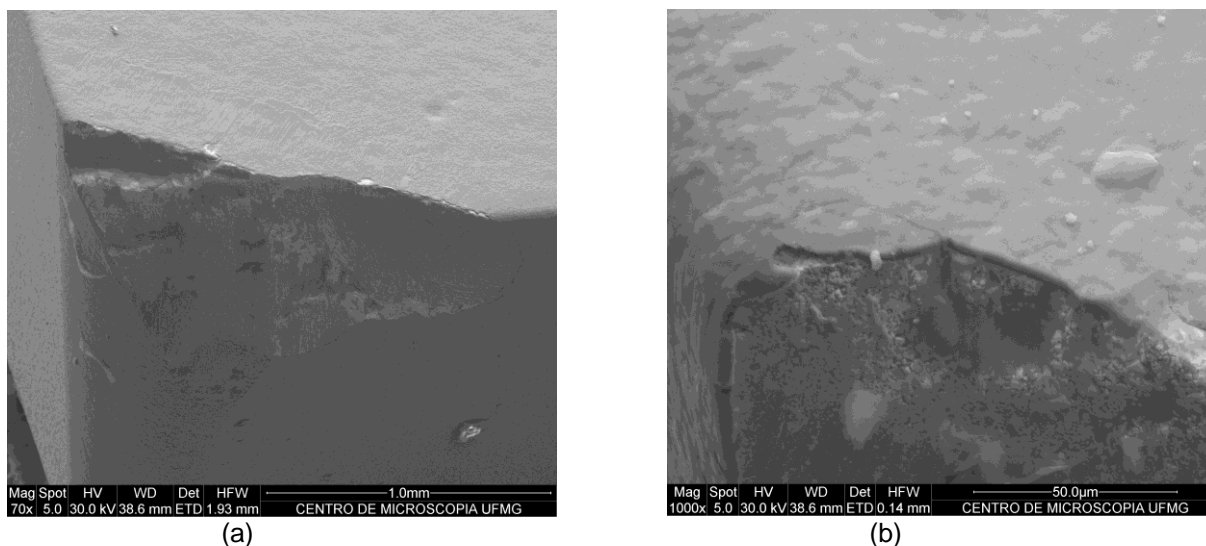
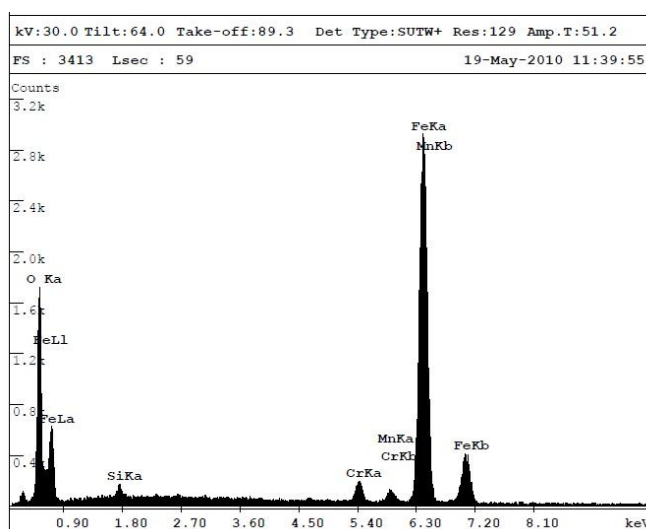
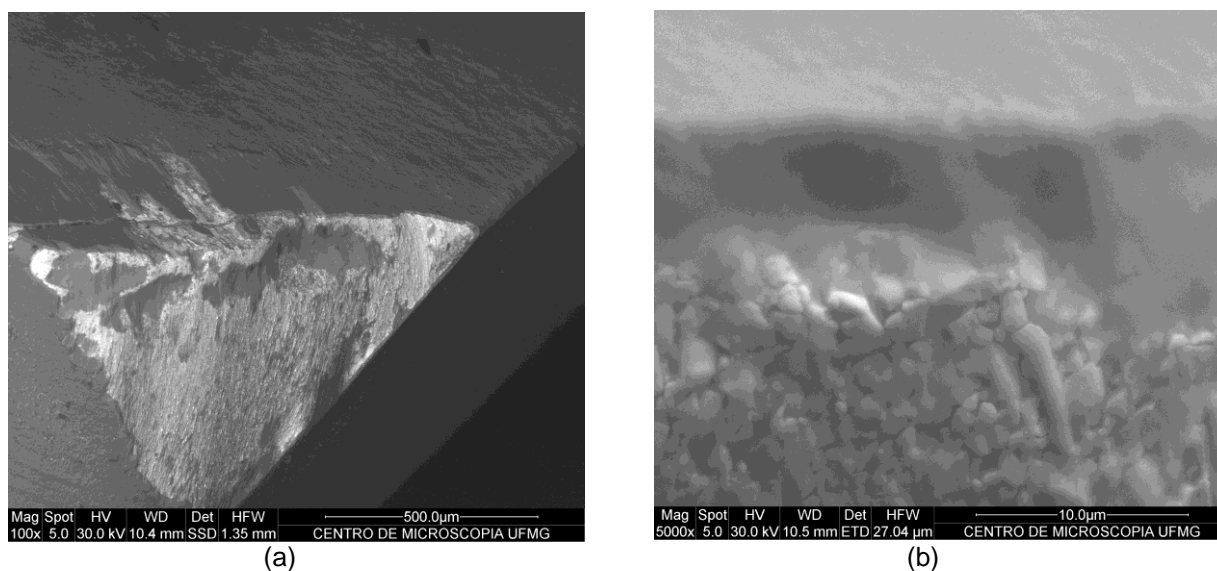


Figura 43 – Foto do desgaste da ferramenta de corte de diâmetro de 20mm na usinagem do aço ABNT 4140 temperado e revenido com fluido de corte com velocidade de corte 120m/min, avanço 0,20mm/ver, tempo de 3min de usinagem, ampliação de 70x (a), e ampliação 1000x (b). Fonte: MEV Quanta 200 - FEG – FEI – 2006.

Evidencia-se a presença de lascamento parcial do flanco, deslocamento do revestimento de TiN e apresentando microtrincas e exposição do substrato.

Figura 44(a) e (b) mostra a ferramenta de corte em MEV da fresa de diâmetro de 20mm e valores de EDS (c) após fresamento do aço ABNT4140 temperado e revenido, com fluido de corte, para velocidade de corte de 120m/min, avanço de corte 0,20mm/rev com o tempo de 5min.



(c)

Figura 44 – Foto do desgaste da ferramenta de corte de diâmetro de 20mm e análise em EDS na usinagem do aço ABNT 4140 temperado e revenido com fluido de corte com velocidade de corte 120m/min, avanço 0,20mm/ver, tempo de 5min de usinagem, ampliação de 100x (a), e ampliação 5000x (b), EDS (c).

Fonte: MEV Quanta 200 - FEG – FEI - 2006

Evidencia-se a presença de lascamento parcial do flanco, deslocamento do revestimento de TiN e apresentando microtrincas e exposição do substrato com aderência do material da peça usinada conforme análise química por EDS. A presença de oxigênio na análise química, pode ser devido a oxidação da ferramenta de corte em função da temperatura atingida durante o fresamento.

Figura 45 (a) e (b) mostra a ferramenta de corte em MEV da fresa de diâmetro de 20mm após fresamento do aço ABNT4140 temperado e revenido, com fluido de corte, para velocidade de corte de 120m/min, avanço de corte 0,20mm/rev com o tempo de 10min.

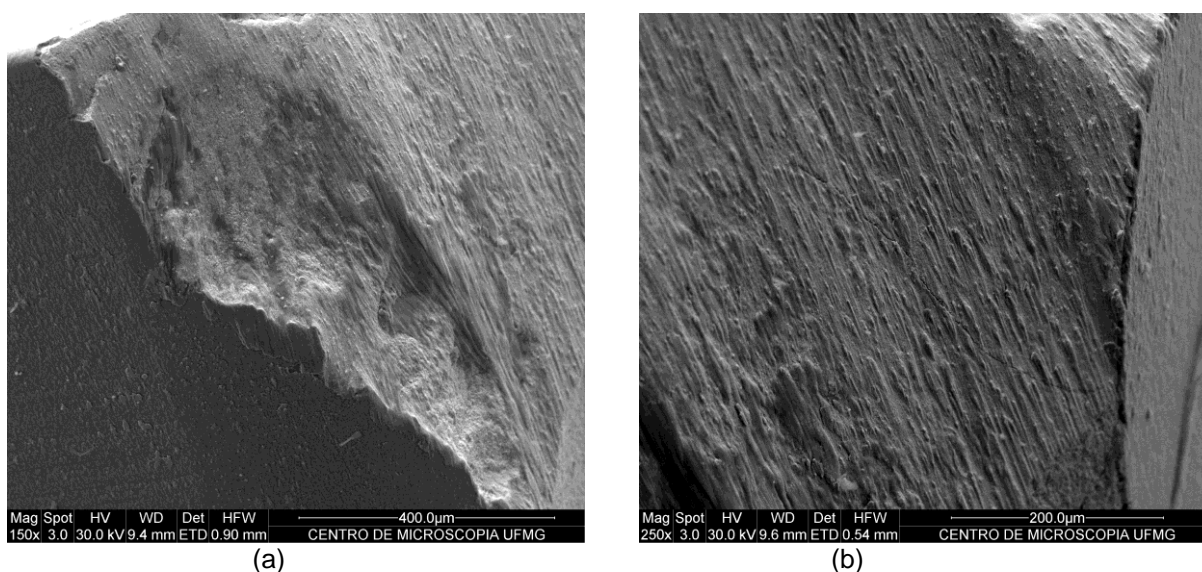


Figura 45 – Foto do desgaste da ferramenta de corte de diâmetro de 20mm na usinagem do aço ABNT 4140 temperado e revenido com fluido de corte com velocidade de corte 120m/min, avanço 0,20mm/ver, tempo de 10min de usinagem, ampliação de 150x (a), e ampliação 250x (b).

Fonte: MEV Quanta 200 - FEG – FEI - 2006

Evidencia-se a presença de lascamento parcial do flanco, deslocamento do revestimento de TiN e apresentando microtrincas.

Figura 46 (a) e (b) mostra a ferramenta de corte em MEV da fresa de diâmetro de 20mm após fresamento do aço ABNT4140 temperado e revenido, com fluido de corte, para velocidade de corte de 120m/min, avanço de corte 0,20mm/rev com o tempo de 30min.

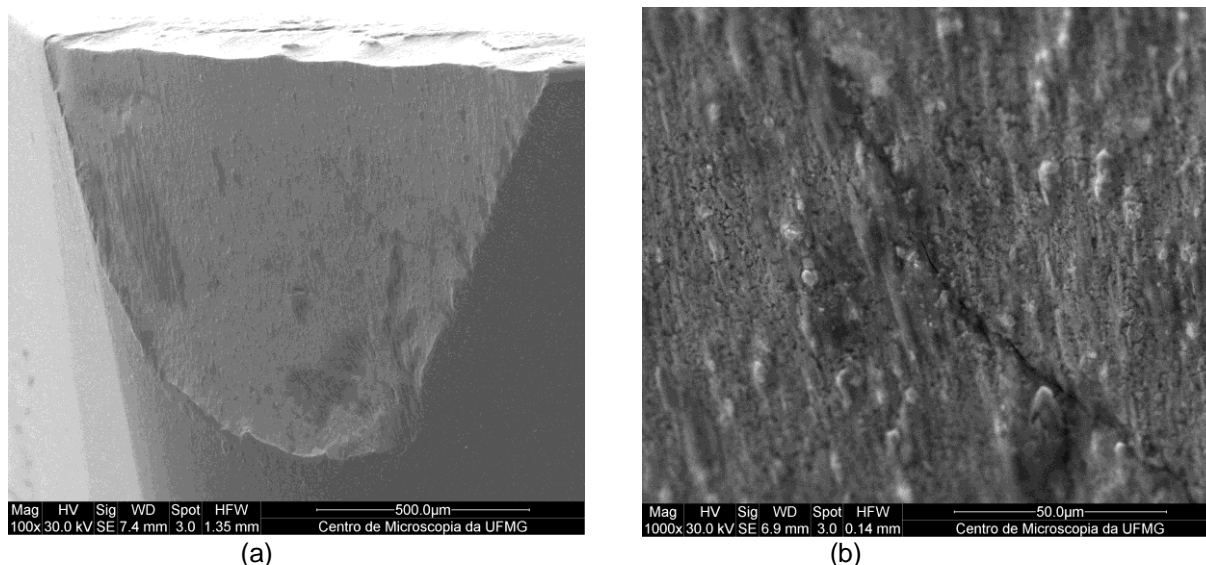


Figura 46 - Foto do desgaste da ferramenta de corte de diâmetro de 20mm na usinagem do aço ABNT 4140 temperado e revenido com fluido de corte com velocidade de corte 120m/min, avanço 0,20mm/ver, tempo de 30min de usinagem, ampliação de 100x (a), e ampliação 1000x (b).

Fonte: MEV Quanta 200 - FEG – FEI - 2006

Evidencia-se a presença de lascamento parcial do flanco e desgaste na superfície de saída da ferramenta, deslocamento do revestimento de TiN, apresentando microtrincas e exposição do substrato

Figura 47 (a) e (b) mostra a ferramenta de corte em MEV da fresa de diâmetro de 20mm após fresamento do aço ABNT4140 temperado e revenido, com fluido de corte, para velocidade de corte de 120m/min, avanço de corte 0,20mm/rev com o tempo de 50min.

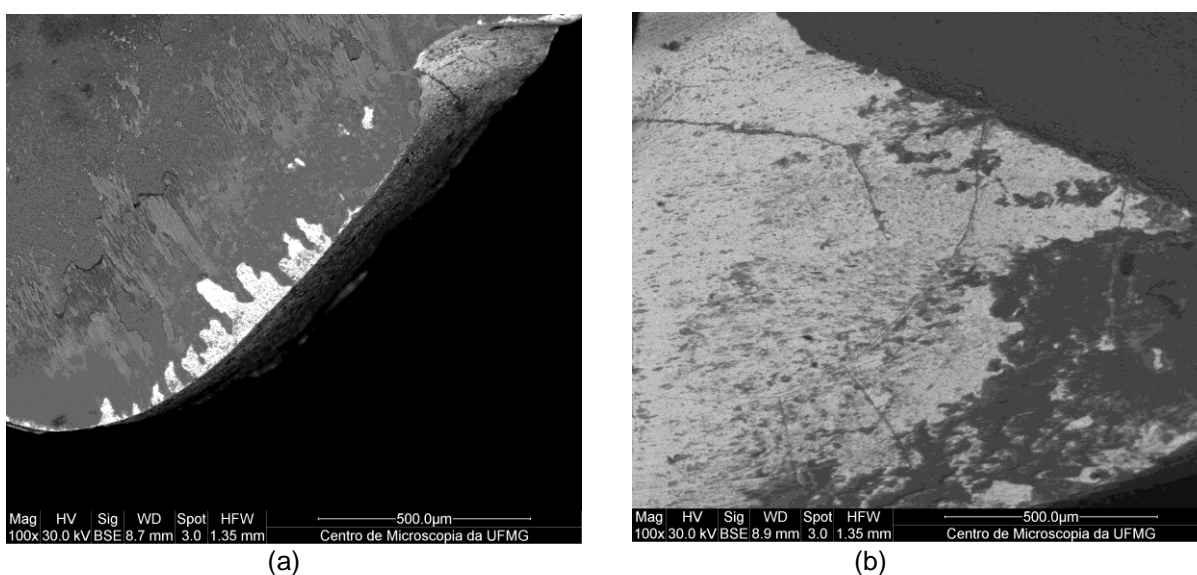


Figura 47 - Foto do desgaste da ferramenta de corte de diâmetro de 20mm na usinagem do aço ABNT 4140 temperado e revenido com fluido de corte com velocidade de corte 120m/min, avanço 0,20mm/ver, tempo de 50min de usinagem, ampliação de 100x (a) e (b). Fonte: MEV Quanta 200 - FEG – FEI – 2006.

Evidencia-se a presença de lascamento parcial do flanco e desgaste na superfície de saída da ferramenta, craterização, deslocamento do revestimento de TiN, apresentando microtrincas e exposição do substrato.

Figura 48 (a) e (b) mostra a ferramenta de corte em MEV da fresa de diâmetro de 40mm após fresamento do aço ABNT4140 temperado e revenido, com fluido de corte, para velocidade de corte de 120m/min, avanço de corte 0,20mm/rev com o tempo de 1min.

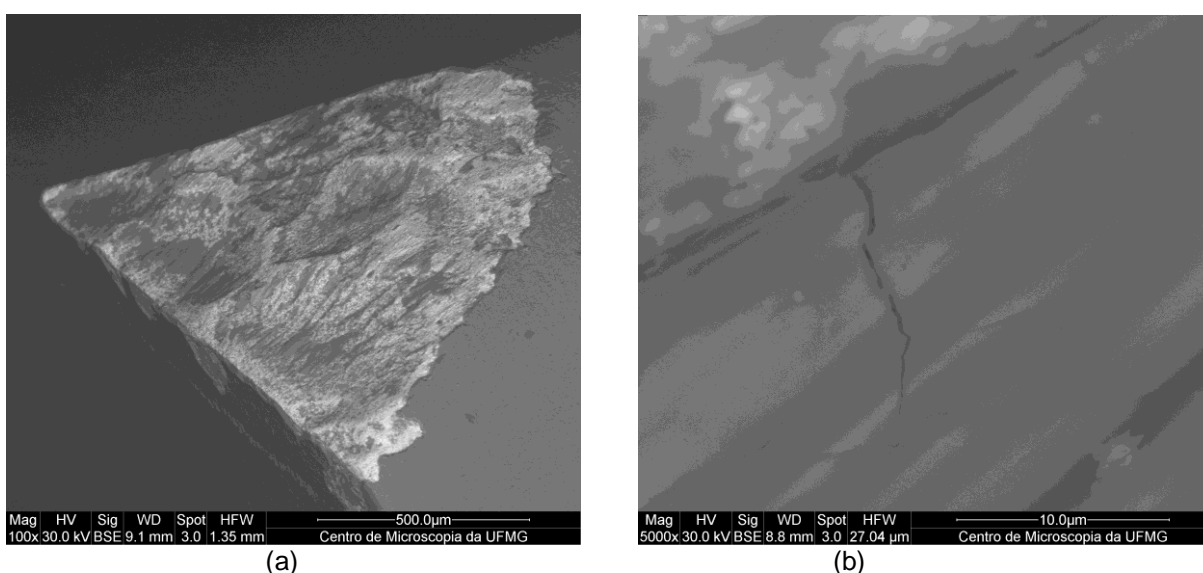


Figura 48 - Foto do desgaste da ferramenta de corte de diâmetro de 40mm na usinagem do aço ABNT 4140 temperado e revenido com fluido de corte com velocidade de corte 120m/min, avanço 0,20mm/ver, tempo de 1min de usinagem, ampliação de 100x (a) e 5000x (b).

Fonte: MEV Quanta 200 - FEG – FEI - 2006

Evidencia-se a presença de lascamento parcial do flanco e desgaste na superfície de saída da ferramenta, deslocamento do revestimento de TiN e apresentando microtrincas e exposição do substrato

Figura 49 (a) e (b) mostra a ferramenta de corte em MEV da fresa de diâmetro de 40mm após fresamento do aço ABNT4140 temperado e revenido, com fluido de corte, para velocidade de corte de 120m/min, avanço de corte 0,20mm/rev com o tempo de 3min.

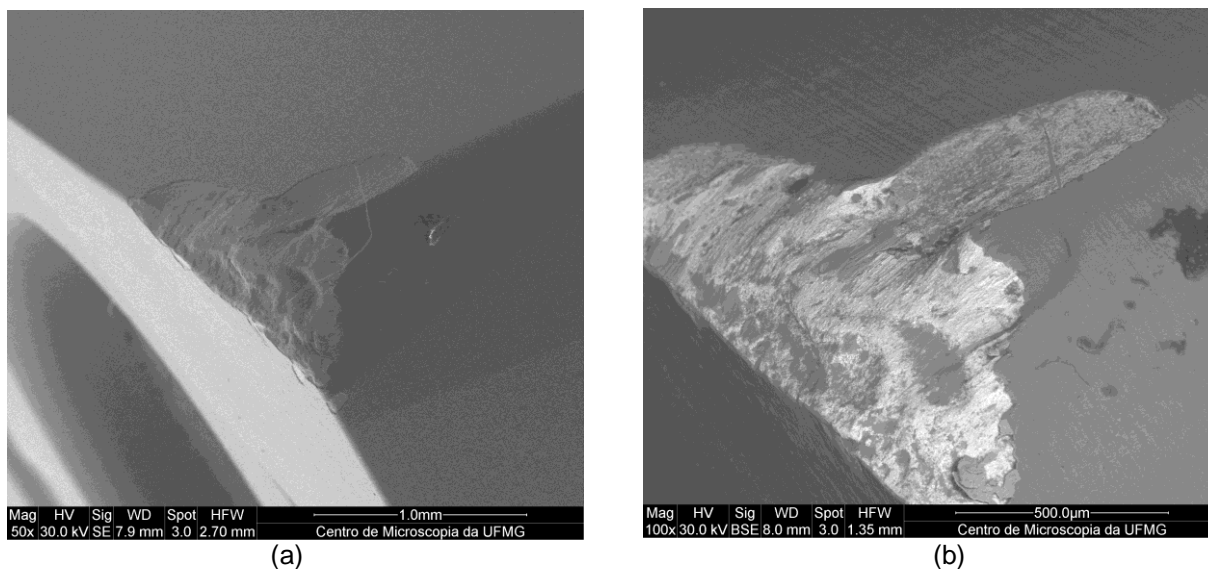


Figura 49 - Foto do desgaste da ferramenta de corte de diâmetro de 40mm e análise na usinagem do aço ABNT 4140 temperado e revenido com fluido de corte com velocidade de corte 120m/min, avanço 0,20mm/ver, tempo de 3min de usinagem, ampliação de 50x (a) e 100x (b).

Fonte: MEV Quanta 200 - FEG – FEI - 2006

Evidencia-se a presença de lascamento parcial do flanco com quebra da aresta de corte e deslocamento do revestimento de TiN e apresentando microtrincas e exposição do substrato

Figura 50 (a) e (b) mostra a ferramenta de corte em MEV da fresa de diâmetro de 40mm após fresamento do aço ABNT4140 temperado e revenido, com fluido de corte, para velocidade de corte de 120m/min, avanço de corte 0,20mm/rev com o tempo de 10min.

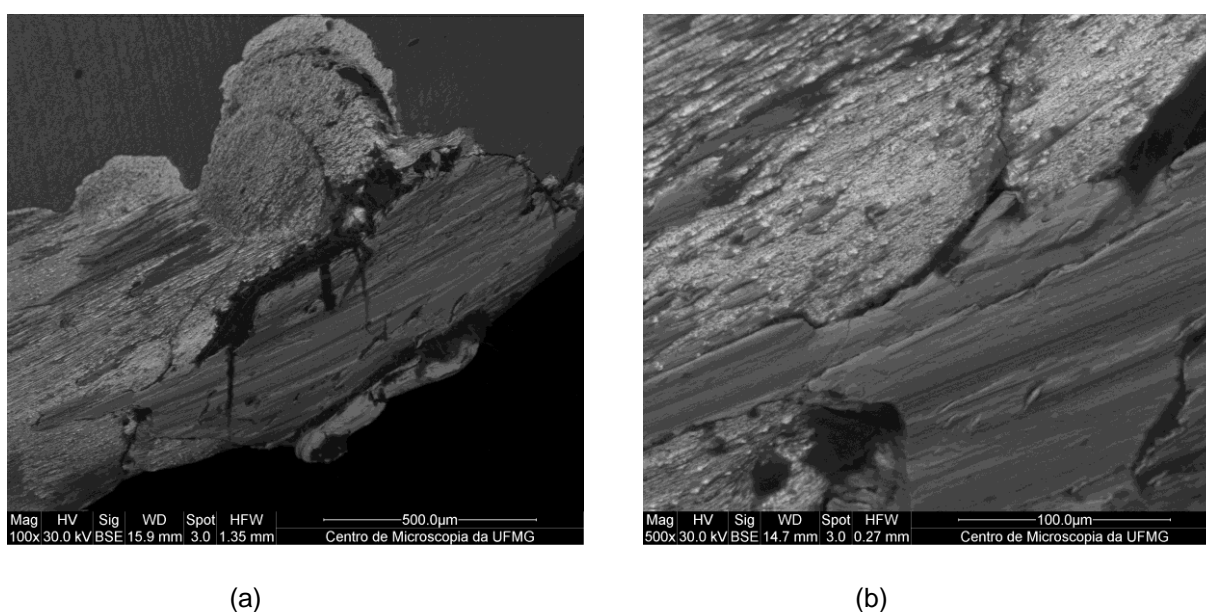


Figura 50 - Foto do desgaste da ferramenta de corte de diâmetro de 40mm na usinagem do aço ABNT 4140 temperado e revenido com fluido de corte com velocidade de corte 120m/min, avanço 0,20mm/ver, tempo de 10min de usinagem, ampliação de 100x (a) e 500x (b). Fonte: MEV Quanta 200 - FEG – FEI – 2006.

Evidencia-se a presença de lascamento parcial do flanco e, deslocamento do revestimento de TiN e apresentando microtrincas e exposição do substrato.

Nota-se que foram realizadas fotos do MEV somente para o avanço de 0,20mm/rev, isto se fez necessário pois os testes feitos para este desgaste foram os que apresentaram maiores valores, desejando assim demonstrar o ocorrido.

Observa-se nessas Figuras para ambas as fresas de diâmetros de 20mm e 40mm, elevado grau de lascamento de superfície flanco com quebra da aresta de corte já com pouco tempo de usinagem. Com o decorrer do trabalho nota-se também microtrincas na qual facilita o aumento desses desgastes avaliados, com perda de todo o revestimento de TiN e chegando ao material base da ferramenta, com grande aderência do material usinado durante o fresamento.

5. CONCLUSÕES

- Durante o fresamento a fresa de diâmetro de 20mm influenciada pelos seus parâmetros de usinagem retira mais material do que a fresa de diâmetro de 40mm. Mas o desgaste da ferramenta de diâmetro de 40mm é maior para todos os avanços trabalhados.
- Obtendo menor retirada de material durante a usinagem os valores de desgaste foram menores para os avanços de 0,10mm/rev, tanto para a fresa de diâmetro de 20mm quanto para a fresa de diâmetro de 40mm.
- Os valores de Ra foram maiores para avanço de 0,20mm/ver, isto se justifica por que neste avanço obteve-se maiores valores de desgaste.
- De acordo com os gráficos de batimento a fresa de a de 40mm apresentou maior deslocamento das pastilhas, isto se deve pelo maior esforço de corte durante a usinagem e os parâmetros utilizados.

Sugestões para trabalhos futuros

- Estudar o fresamento do aço ABNT 4140 temperado/revenido a seco utilizando a mesma ferramenta de corte.
- Estudar o fresamento do aço ABNT 4140 temperado/revenido, utilizando mesma ferramenta de corte com geometrias diferentes.
- Estudar o fresamento do aço ABNT 4140 temperado/revenido utilizando fluido de corte sintético e a mesma ferramenta de corte.
- Ajustar os parâmetros de usinagem para uma melhora no desgaste

ANEXO A - Especificação do rugosímetro marca Taylor Hobson, modelo Surtronic 3+ utilizado na medição da rugosidade.

| Parâmetro | Valor/Tipo |
|---|------------------------------------|
| Modelo | Surtronic 3+ |
| Faixa de medição | $\pm 150 \mu\text{m}$ |
| Precisão | 2 % da leitura + LSD μm |
| Massa de medição | 150 a 300 mg |
| Ponta de diamante | Raio de ponta 5 μm |
| Valor comprimento de amostragem (cut off) | 0,25; 0,8; 2,5; 8 mm |
| Filtro | 2CR ou gaussiano |
| Comprimento transversal | 1,25 a 25 mm |
| Velocidade transversal | 1 mm/s |
| Unidade do monitor | μm |
| Conector de saída | RS 232 |
| Potência | 9 V bateria |
| Parâmetros (padrão) | R_a, R_g, R_t, R_y, R_z (DIN), m |
| Parâmetros (opcionais) | $P_c, tp\%$ |
| Dimensões globais | 130 x 80 x 65 mm |
| Massa | 450 g |
| Condições normais de operação | 5 a 40 °C |
| Condições normais de operação (umidade) | 0 a 80% não condensado |
| Condições de armazenamento (temperatura) | 0 a 50 °C |
| Condições de armazenamento (umidade) | 0 a 80% não condensado |

ANEXO B - Programa para fresa de diâmetro de 40 mm

N000 G71 G90 G17 G94 G64;

N001 G53 G0 Z-110 D0;

N002 MSG ("FACE MILL OPERATION");

N003 T01;

N004 M6;

N005 G54D1;

N006 S955 M3;

N007 TRANS Z0; Y-20;

N008 G0 X0 Y0 Z12;

N009 G1 Z0 F573;

N010 INÍCIO: G1 Z=IC(-1) F286;

N011 M7;

N012 Y26;

N013 X120;

N014 Y52;

N015 X0;

N016 Y78;

N017 X120;

N018 Y104;

N019 X0;

N020 G0 Y28;

N021 FIM;

N022 REPEAT INÍCIO FIM P1;

N023 G0 Z100;

N024 M9;

N025 T02;

N026 M6;

N027 M00;

N028 T01;

N029 M6;

N030 G0 X150 Y200;

N031 M30;

ANEXO C - Programa para fresa de diâmetro de 20 mm.

N000 G1 G90 G17 G94 G64;

N001 G53 G0 Z-110 D0;

N002 MSG ("FACE MILL OPERATION");

N003 T01;

N004 M6;

N005 G54 D1;

N006 M37;

N007 S1910 M3;

N008 TRANS Z10;

N009 G0 X0 Y0 Z0;

N010 G1 Z0 F573;

N011 M7;

N012 INÍCIO: G1 Z=IC(-1) F573;

N013 X110;

N014 Y16;

N015 X0;

N016 Y32;

N017 X110;

N018 Y48;

N019 X0;

N020 Y64;

N021 X110;

N022 Y80;

N023 X0;

N024 Y95;

N025 X110;

N026 G0 Y110;

N027 G0 X-10;

N028 G0 Y0;

N029; REPEAT INÍCIO FIM P1;

N030 M9;

N031 T02;

N032 M6;

N033 M00;

N034 T01;

N035 M6;

N036 G0 X150 Y200;

REFERÊNCIAS

ABDEL-AAL, H. A.; NOUARI, M.; EL MANSORI, M. **Tribo-energetic correlation of toll thermal properties to wer of WC-Co insert in high speed dry machining of aeronautical grade titanium alloys.** *Wear* v.266, p. 432-443, 2009.

ABELE, E.; DORR, J. **Ferramentas de corte protegidas contra a defasagem tecnológica.** *Máquina e Metais* p.38-53, 2002.

ALAUDDIN, M.; EL BARADIE, M.A.; HASHMI, M.S.J. **Prediction of tool life in end milling by response surface methodology.** *Journal of Materials Processing Technology* v. 71, p. 456-465, 1997.

ALPAS, A.T.; WILSON, S. **TiN coating wear mechanism in dry sliding contact against high speed steel.** *Surface and Coating Technology* v.108-109, p. 369-376, 1998.

BOOTHROYD, G.; KNIGHT. W. A. **Fundamentals of machining and Machine tools.** Nova lorque Press, 2006 . ISBN 1-57444-659-2

BOUZAKIS, K.D.; VIDAKIS, N., MICHAILIDIS, N., LEYEDECKER, T., ERKENS, G., FUSS, G. **Quantification of properties modification and cutting performance of (TiAl)N coating at elevated temperatures.** *Surface and Coating Technology* v.120-121, p.34-43,1999.

BOUZID SAI, W.; BEN SALAH, N.; LEBRUN, J.L. **Influence of machining by finishing milling on surface characteristics.** *International Journal of Machine Tools & Manufacture* v. 41, p. 443-450, 2001.

CAMUSCU, N.; ASLAN, E. **A comparative study on cutting tool performance in end milling of AISI D3 tool steel.** *Journal of Materials Processing Technology* v.170, p.121-126, 2005.

CHEVIER, P.; TIDU, A.; BOLLE, B.; CEZARD, P.; TINNES, J.P. **Investigation of surface integrity in high speed end milling of a low alloyed steel.** *International Journal of Machine Tools & Manufacture* v. 43, p.1135-1142, 2003.

D'ERRICO, G. E.; GUGLIELMI, E. **Comparative study of PVD coated cermet inserts for milling applications.** *Journal of Materials Processing Technology* v.78, p. 48-52,1998.

DE MELO, A.C.A. **Estudo das trincas de origem térmica geradas em fresamento de metal duro durante o fresamento frontal.** Tese de doutorado Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica Universidade Federal de Uberlândia. p.182, 2001.

DINIZ, A. E., MICARONI, R. **Influence of the direction and flow rate of the cutting fluid on tool life in turning process of AISI 1045 steel.** *International Journal of Machine Tools & Manufacture* v.47, p.247–254, 2007.

DINIZ, A. E., MARCONDES, F. C., COPPINI, N. L. **Tecnologia da Usinagem dos Materiais**. São Paulo, Artliber, 2000.

EBBRELL, S. . **The effects of cutting fluid application methods on the grinding process**. International Journal of Machine Tools & Manufacture, School of Engineering, Liverpool John Moores University, Liverpool, jun./99.

EL BARADEI, M.A.;ALAUDDIN, M. **Tool life model for end milling steel (190 BHN)**. Journal of Materials Processing Technology v.68, p. 50-59, 1997.

ERCAN, F.;OZCATALBAS, Y. **The effects of heat treatment on the machinability of mild steels**. Journal of Materials Processing Technology v.136, p. 227-238, 2003

ESKILDSEN, S.S.; FOSS, M.; MATHIASSEN, C. **Plasma CVD process capabilities and economic aspcts**. Surface & Coating Technology v.116-119, p.18-24, 1999

EUGENE, A. AVALONE; THEODORE . **Mark's standart handbook por mechanical engineers**. 8th Edition 1998.

FERRARESI, D. **Fundamentos da Usinagem dos Metais**. São Paulo, Editora Edgard Blücher Ltda, 1977.

FIELD, M.; KAHLES, J.F and CAMMET, J.T, 1972 **A review of measuring methods for surfasse integrity**, Annals of the CIRP, vol 21/2, pp 219238.

FILHO, J.C. ; DINIZ, A.E. **Influence of the relative positions of tool and workpiece on tool life , tool wear and surface finish in the face milling process**. Wear v.232, p.67-75, 1999.

GHANI, J. A.; CHOUDHURY, I. A.; MASJUKI, H. H. **Wear mechanism of TiN coated carbide and uncoated cermets tools at high cutting speed applications**. Journal of Materials Processing Technology v.153-154, p.1067-1073, 2004.

GU, J.;GARY BARBER,SIMON;TUNG,REN-JYH GU. **Tool life and wear mechanism of uncoated and coated milling inserts**. Wear v.225–229, p. 273–284, 1999.

HARJU, E.;KORHONEN, A.S; ADAMIK, M.; BARNÁ, P.B. **Struture investigations of wear reducing non-metallic layers on TiN-coated HSS turning tools**. Surface & Coating Technology v.116-119, p.498-504, 1999.

I. TANSEL, RODRIGUES, O. ; TRUJILLO, M. E. , PAZ, W. Li. **Micro-en-milling-I.Wear and breakage**. International Journal of Machine Tools & Manufacture v.38, p.1419-1436,1998.

IMBENI, V.,MARTINI, C.,LANZONI, E., POLI, G., HUTCHINGS, I.M. **Tribological behaviour of multi-layered PVD nitrid coatings**. Wear v.251, p. 997-1002, 2001.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION, **Specification for tool life testing with single point turning tools**. Norma ISO 3585, 1993

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION, **Classification and application of hard cutting materials for metal removal with defined cutting edges - Designation of the main groups and groups of application**. Norma ISO 513, 2004.

ISCAR. **Conceitos básicos de usinagem**. 2001.

KARAGOZ, S.; FISCHMEISTER, H.F. **Metallographic observations on the wear process of TiN-coated cutting tools**. Surface and Coating Technology v.81, p.190-200, 1996.

KHRAIS, S.K.; LIN, Y.J. **Wear mechanisms and tool performance of TiAlN PVD coated inserts during machining of AISI 4140 steel**. Wear v.262, p. 64-69, 2007.

KLOCKE, F.; SCHROEDER, T.; BOUZAKIS, E.; **Manipulation of coating and subsurface properties in reconditioning of WC-Co carbide cutting tools**. Surface & Coating Technology v. 202, p.1194-1198, 2007

KORKUT, I.; DONERTAS, M.A. **The influence of feed rate and cutting speed on the cutting forces, surface roughness and tool-chip contact length during face milling**. Materials & Design v.28, p. 308-312, 2007.

KOVACEVIC, R.; CHERUKUTHOTA, C.; MOHAN, R. 1995 **Improving milling performance with high pressure waterjet assisted cooling/lubrication**, journal of engineering for industry, v. 19, pp 331-119

LENZ, D.E; MAYER, J.E; LEE, D.G. Investigation in Drilling. **Anais...** CIRP vol27 1ª ed. P49-53, 1978

LIEW, W.Y.H.; DING, X. **Wear progression of carbide tool in low-speed end milling of stainless steel**. Wear v.265, p. 155-166, 2008.

LIEW, W.Y.H. **Low-speed milling of stainless steel with TiAlN single-layer and TiAlN/AlCrN nano-multilayer coated carbide tools under different lubrication conditions**. Wear v.269, p. 617-631, 2010.

LIM, S.C; LIM, C.Y.H; LEE, K.S. **The effects of machining conditions on the flank wear of TiN-coated high speed steel tool inserts**. Wear v.181-183, p.901-902, 1995.

LIM, C.Y.H; LIM, S.C.; LEE, K.S. **Crater wear mechanisms of TiN coated high speed steel tools**. Surface Engineering v. 16, p.253-256, 2000.

LIM, C.Y.H; LIM, S.C. **Effective use of coated tools – the wear-map approach**. Surface and Coating Technology v. 139, p.127-134, 2001.

LIN, TSAN-RONG **Experimental design and performance analysis of TiN-coated carbide tool in face milling stainless steel.** Journal of Materials Processing Technology v.127, p.1-7, 2002.

LIU, Z.Q.; Ai, X.; ZHANG, H.; WANG, Z.T.; WAN, Y. **Wear patterns and mechanisms of cutting tools in high-speed face milling.** Journal of Materials Processing Technology v.129, p. 222-226, 2002.

MACHADO, A.R.; DINIZ, A.E. **Vantagens e desvantagens do uso (ou não) de fluidos de corte.** Máquinas e Metais p.134-151, 2000.

MACHADO, A. R., SILVA, M. B. **Usinagem dos Metais.** Apostila, Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, MG, 4ª Versão, 1999

MACHADO, A..R., WALLBANK, J.B. **The effect of extremely low lubricant Volumes in Machining.** Wear v.210, p. 76-82, 1997.

MARTINS, P.S. **Avaliação dos sistemas de fixação hidráulico e térmico de broca de metal duro em furação do cabeçote do motor fire.** Dissertação de Mestrado PUC MINAS 2008.

MELO, A.C.A.; FRANCO, S.D.; MACHADO, A.R. **Desgastes e avarias em ferramentas de metal duro.** Máquinas e Metais p.118-155, 2005.

METALS HANDBOOK **Machining.** ASM International v.16, ISBN 10: 0-87170-022-0 ; ISBN 13:978- 0-87170-022-3, 913p.1989.

NALBANT, M.; GOKKAYA, H. **The effects of cutting tool geometry and processing parameters on the surface roughness of AISI 1030 steel.** Materials & Design v.28, p. 717-721, 2007.

NARUTAKI, N.; YAMANE, Y.; TASHIMA, S.; KUROKI, H. **A new advanced ceramic for dry machining.** Annals of the CIRP v.46, p. 43-48, 1997.

OLIVEIRA C J., **Avaliação da Influência de Sistemas de Filtragem Aplicados a Topografia de Superfície em Usinagens.** Dissertação de Mestrado PUC Minas, 2004.

OLIVEIRA, A.J.; DINIZ, A.E. **Tool life and tool wear in the semi-finish milling of inclined surfaces.** Journal of Materials Processing Technology v.209, p. 5448-5455, 2009.

ORNELAS SANTOS, J.A.B.; **Estudo da aplicação de revestimentos superficiais em Fresas Caracois.** Dissertação de Mestrado no Curso de Engenharia Mecânica na PUC 2004

PANJAN, J.; NAVINSEK, B.; CEKADA, M. **A new experimental method for studying the cracking behaviour of PVD multilayer coating.** Surface and Coating Technology v.174-175, p. 55-62, 2003.

PANJAN, P.; KEK MERL, D.; ZUPANIC, F.; CEKADA, M.; PANJAN, M. **SEM study of defects in PVD hard coatings using focused ion beam milling.** Surface and Coating Technology vol. 202, p. 2302-2305, 2008.

PRENGEL, H.G; PFOUTS, W.R; SANTHANAM, A.T; **State of the art in hard coatings for carbide cutting tools.** Surface & Coating Technology v.102, p.183-190, 1998.

QUINSAT, Y.; LAVERNHE, S.; LARTIGUE, C. **Characterization of 3D surface Topography in 5-axis milling.** Wear article in press, 2010.

RAO, P.V.; REDDY, N.S.K. **Experimental investigation to study the effect of solid lubricants on cutting forces and surface quality in end milling.** International Journal of Machine Tools & Manufacture v.46, p.189-198, 2006.

RICHETTI, A.; MACHADO, A.R ; DA SILVA, M.B; EZUGWU, E.O; BONNEY,J. **Influence of the number of inserts for tool life evaluation in face milling of steels.** International Journal of Machine Tools & Manufacture v.44, p.695-700, 2004.

SALES W.F., GUIMARÃES G., A .R. MACHADO, EZUGWU E.O. **Cooling ability of cutting fluids and measurement of the chip-tool interface temperatures.** Industrial Lubrication and Tribology v.54, p. 57–68, 2002.

SANTNER, E., KLAFFKE, D., MEIER ZU KOCKER, G. **Comprehensive tribological characterization of thin TiN-based coatings.** Wear v.190, p.204-211,1995.

SANTOS, A.L.B.; DUARTE, M.A.V.; ABRÃO, A.M.; MACHADO , A.R. **An optimization procedure to determine the coefficients of the extended Taylor's equation in machining International.** Journal of Machine Tools & Manufacture v.39,p. 17-31, 1999.

SANTOS, S. C., SALES, W. F. **Fundamentos da Usinagem dos Materiais.** Apostila, PUC Minas, Belo Horizonte, MG. 2003.

SCHULZ, H.; DORR, J.; RASS, I.J.; SCHULZE, M.; LEYENDECKER, T.; ERKENS, G. **Performance of oxide PVD-coating in dry cutting operations.** Surface and Coating Technology v.146-147, p.480-485, 2001.

SEDLACEK, M.; PODGORNIK, B.; VIZINTIN, J. **Influence of surface preparation on roughness parameters, friction and wear.** Wear , article in press, 2008.

SHARMAN , A., DEWES, R.C., ASPINWALL, D.K. **Tool life when high speed ball nose end-milling Inconel 718.** Journal of Materials Processing Technology v.118, p. 20-35, 2001.

SHAW, M.C. **Metal Cutting Principles.** Nova Iorque: Oxford Universsitt Press, 1984. 594p ISBN 0-19-85 9002-4

SILVA, M.B., WALLBANK J. **Lubrication and application method in machining.** Industrial Lubrication and Tribology v.50, p.149–152, 1998.

SILVA, R.H.L. **Monitoramento do desgaste de ferramentas no fresamento de topo através dos sinais de potência e emissão acústica e redes neurais.** Dissertação de Mestrado Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica Universidade Federal de Uberlândia. p.114, 2010.

SOUTO, U.B. **Monitoramento do desgaste de ferramenta no processo de fresamento via emissão acústica** Tese de doutorado Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica Universidade Federal de Uberlândia. p.182, 2007.

SU, Y.I ; YAN, S.H.; WEI, C.S.;KAO, C.T. **Design and performance analysis of TiCN-coated cemented carbide milling cutters.** Journal of Materials Processing Technology v.87, p. 82-89, 1999.

TARNG, Y.S ; YANG, W.H. **Design optimization of cutting parameters for turning operation based on the Taguchi method.** Journal of Materials Processing Technology v.84, p.122-129, 1998.

TELES, J.M. **Torneamento de ferro fundido nodular ferritizado com nióbio utilizando ferramenta de metal duro.** Dissertação de Mestrado Universidade Federal de Itajubá p.110, 2007.

TRENT, E.M., WRIGHT, P.K. **Metal Cutting.** 4rd Edition, Butteworths-Heinemann Ltda. 2000.

VIEIRA, J.M.; MACHADO , A.R.; EZUGWU, E.O. **Performance of cutting fluids during face milling of steels.** Journal of Materials Processing Technology v.248, p.244-251, 2001.

WU, C.T.;KAO, W.H.;WEI, C.S.; YAO, C.S.; SU, Y.L. **Design and performance analysis of TiCN-coated cemented carbide milling cutters.** Journal of Materials Processing Technology v.87, p.82-85,1999.