

MIGUEL MANDÚ BONFÁ

**TORNEAMENTO DO AÇO ENDURECIDO AISI D6
UTILIZANDO MÍNIMA QUANTIDADE DE FLUIDO DE CORTE**



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA**

2013

MIGUEL MANDÚ BONFÁ

**TORNEAMENTO DO AÇO ENDURECIDO AISI D6 UTILIZANDO
MÍNIMA QUANTIDADE DE FLUIDO DE CORTE**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, área de Materiais e Processos de Fabricação da UFU – Universidade Federal de Uberlândia, como parte dos requisitos para obtenção do título de **Mestre em Engenharia Mecânica**

Área de concentração: Materiais e Processos de Fabricação, Usinagem

Orientador: Prof. Dr. Álisson Rocha Machado

UBERLÂNDIA – MG

2013

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
Sistema de Bibliotecas da UFU , MG, Brasil

B713t Bonfá, Miguel Mandú, 1986-
2013 Torneamento do aço endurecido AISI D6 utilizando mínima quanti-
dade de fluido de corte / Miguel Mandú Bonfá.- 2013.
122 p. : il.

Orientador: Álisson Rocha Machado.
Dissertação (mestrado) – Universidade Federal de Uberlândia, Pro-
grama de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica.
Inclui bibliografia.

1. Engenharia mecânica - Teses. 2. Aço - Teses. 3. Fluidos de corte -
Teses. I. Machado, Álisson Rocha. II. Universidade Federal de Uberlân-
dia. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica. III. Título.

CDU: 532.51

*Aos meus pais, Mauro e Sandra, pela confiança,
À minha irmã Milena e família, pela admiração,
À minha esposa Jenia, pelo companheirismo,
Ao meu filho Lucca, pelo amor,
Aos verdadeiros amigos e
Companheiros de trabalho.*

AGRADECIMENTOS

Ao Prof. Dr. Álisson Rocha Machado pela orientação, paciência, dedicação e competência durante todo o decorrer deste trabalho.

A UFU – Universidade Federal de Uberlândia, juntamente com o Programa de Pós-Graduação da Faculdade de Engenharia Mecânica, pela oportunidade e confiança.

A CAPES – Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior, pelo incentivo e suporte financeiro.

Aos professores Dr. Rosemar Batista da Silva e Dr. Marcio Bacci da Silva pelo apoio e ajuda.

Ao Prof. Dr. Marcos Antonio Barrozo pelo apoio e ajuda no estudo estatístico do trabalho.

Ao Prof. Dr. Fred Amorim pelo suporte nas imagens feitas no estereoscópio e pela orientação na correção do trabalho.

Aos colegas de pós-graduação André Grub, Daniel da Cunha, Igor César, Janaina Pereira, Mauro Paipa e Ricardo Moura pela ajuda, apoio e companheirismo durante todo o curso de mestrado.

Aos alunos de iniciação científica Pedro Henrique de Castro e Vitor Hugo Rubin pela ajuda e pelo trabalho realizado na parte eletrônica.

Ao Prof. Eder Silva Costa pelos ensinamentos e treinamento na programação e operação do Torno CNC Multiplic 35D.

Aos técnicos Daniel e Rodrigo pela ajuda durante o processo de usinagem.

A Villares Metals pela concessão de matéria prima para serem realizados os experimentos.

A Sandvik Coromant pela doação das ferramentas de corte.

E, finalmente, a todos que direta ou indiretamente ajudaram na construção e realização deste trabalho.

BONFÁ, M. M., **TORNEAMENTO DO AÇO ENDURECIDO AISI D6 UTILIZANDO MÍNIMA QUANTIDADE DE FLUIDO DE CORTE**, 2013, 122 f. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Uberlândia.

RESUMO

Aços temperados são geralmente usinados na condição a seco. A aplicação de uma refrigeração geralmente conduz a uma falha prematura da ferramenta porque o calor gerado durante o processo, que ajuda o cisalhamento, é reduzido pela ação refrigerante do fluido de corte. Este trabalho propõe estudar a aplicação do método de MQF (*Mínima Quantidade de Fluido*) ao tornear o aço tratado termicamente, classe AISI D6, utilizando ferramenta de PCBN (Nitreto Cúbico de Boro Policristalino) e comparar com a condição a seco. A pulverização de um fluido de corte de base vegetal foi aplicada entre a peça de trabalho e a superfície de folga da ferramenta. A direção sobre-cabeça e entre a superfície de folga secundária e a peça também foram testadas em algumas condições de corte. O desgaste da ferramenta (VB), a rugosidade superficial (R_a , R_z e R_q) e as forças de usinagem (F_x , F_y e F_z) foram utilizadas como parâmetros de saída e seus resultados foram comparados com os resultados obtidos nos testes na condição a seco. As influências dos parâmetros de entrada: velocidade de corte e avanço, bem como suas interações, nas variáveis de saída (desgaste da ferramenta, rugosidade superficial e forças de usinagem) foram analisados através de métodos estatísticos. Considerando o desgaste da ferramenta e a rugosidade superficial da peça, a aplicação do fluido de corte pela técnica MQF na direção da superfície de folga principal apresentou melhores resultados que a condição a seco, quando se utilizou o menor avanço testado de 0,05 mm/rev, independente da velocidade de corte. Esta técnica também apresentou bons resultados quando a velocidade de corte de 310 m/min foi testada, independente do avanço. Assim, esta velocidade de corte deve ser recomendada para uma boa produção no torneamento do Aço AISI D6 com a técnica MQF. A aplicação do MQF nas outras direções (sobre-cabeça e na superfície de folga secundária) também mostrou resultados competitivos.

Palavras Chave: Torneamento de Peças Endurecidas, Fluido de Corte, Mínima Quantidade de Fluido, Ferramenta de PCBN, Rugosidade.

BONFÁ, M. M., **TURNING OF HIGH HARDNESS AISI D6 STEEL WITH MINIMUM QUANTITY OF CUTTING FLUID**, 2013, 122 f. Master Dissertation, Federal University of Uberlândia, Uberlândia-MG.

ABSTRACT

Hardened steel is usually machined under dry condition. Application of an overhead flood cooling generally leads to premature tool failure because the heat generated that helps the shearing process needed to form the chips is reduced by its cooling action. This work proposes to study the application of MQF (*Minimum Quantity of Cutting Fluid*) when turning the heat treated hardened AISI D6 steel with PCBN (Polycrystalline Cubic Boron Nitride) tools and compare with the dry machining. The spray of a vegetable based cutting fluid was applied between the workpiece and the flank face of the tool. Overhead direction of the MQF and between the secondary flank face of the tool and the workpiece were also tested. Tool wear (VB), surface roughness (R_a , R_z e R_q) and cutting forces (F_x , F_y e F_z) were considered the output variables and the results were compared to those obtained when cutting in dry condition. The influence of the input parameters: cutting speed and feed rate, as well as their interactions were statistically analyzed. Considering the tool wear and the surface roughness, the application of the cutting fluid by the MQF technique in the direction between the flank face and the workpiece showed better results than the dry condition when employing the lowest feed rate of 0.05 mm/rev, regardless the cutting speed used. This cutting fluid application technique also presented good results when the cutting speed of 310 m/min was tested, regardless the feed rate employed. Therefore, this cutting speed should be recommended for high production in turning of AISI D6 steel with the MQF technique. The application of MQF through other directions (overhead and between the secondary flank face and the workpiece) also showed competitive results.

Keywords: Hard Turning, Cutting Fluid, Minimum Quantity of Fluid, PCBN Tool, Surface Roughness.

LISTA DE SÍMBOLOS

γ	<i>Ângulo de Saída</i>
μ	<i>Coefficiente de Atrito</i>
Φ	<i>Ângulo de Cisalhamento</i>
η	<i>Rendimento Máquina-ferramenta</i>
μm	<i>Micrometros</i>
V_c	<i>Velocidade de Corte [metros por minuto – m/min]</i>
V_f	<i>Velocidade de Avanço [milímetros por minuto – mm/min]</i>
V_{cav}	<i>Velocidade de Saída do Cavaco</i>
f	<i>Avanço [milímetros por revolução – mm/rev]</i>
a_p	<i>Profundidade de Corte [milímetros – mm]</i>
l_m	<i>Percurso de Medição</i>
VB_B	<i>Largura do Desgaste de Flanco</i>
VB_{Bmax}	<i>Desgaste de Flanco Máximo [milímetros – mm]</i>
VB_N	<i>Desgaste de Entalhe</i>
VB_C	<i>Desgaste de Entalhe na Superfície de Folga</i>
KT	<i>Profundidade da Cratera</i>
KB	<i>Largura da Cratera</i>
KM	<i>Distância entre Centro da Cratera e Aresta de Corte</i>
N_c	<i>Potência de Corte [cavalo vapor – cv]</i>
N_f	<i>Potência de Avanço [cavalo vapor – cv]</i>
N_e	<i>Potência Efetiva de Corte [cavalo vapor – cv]</i>
N_m	<i>Potência do Motor [cavalo vapor – cv]</i>
F_f	<i>Força de Avanço [Quilograma força – Kgf]</i>
F_p	<i>Força Passiva [Quilograma força – Kgf]</i>
F_c	<i>Força de Corte [Quilograma força – Kgf]</i>
Td	<i>Taxa de Desgaste [milímetros por minuto – mm/min]</i>
$^{\circ}\text{C}$	<i>Graus Celcius</i>
KHz	<i>Quilo-hertz</i>
Mpa	<i>Mega Pascal</i>
$X1$	<i>Variável de Entrada Adimensional para Velocidade de Corte</i>
$X2$	<i>Variável de Entrada Adimensional para Avanço</i>

X1X1	<i>Elemento Quadrático Referente a Interação da Velocidade de Corte</i>
X2X2	<i>Elemento Quadrático Referente a Interação do Avanço</i>
X1X2	<i>Variável de Entrada Adimensional para Interação entre Velocidade de Corte e Avanço</i>
R ²	<i>Grau de Correlação</i>
EP	<i>Extrema Pressão</i>
HRC	<i>Dureza Rockwell</i>
HV	<i>Dureza Vickers</i>
CBN	<i>Niteto Cúbico de Boro</i>
MEV	<i>Microscópio Eletrônico de Varredura</i>
PCBN	<i>Nitreto Cúbico de Boro Policristalino</i>
PCD	<i>Diamante Policristalino</i>
PVD	<i>Physical Vapour Deposition</i>
MQF	<i>Minimum Quantity of Fluid</i>
MQL	<i>Minimum Quantity of Lubricant</i>
APC	<i>Aresta Postiça de Corte</i>
CNC	<i>Comando Numérico Computadorizado</i>
CFC	<i>Estrutura Cúbica de Face Centrada</i>
HBN	<i>Nitreto Hexagonal de Boro</i>
DIN	<i>Deutsches Institut für Normung e. V.</i>
ISO	<i>International Standards Organization</i>

LISTA DE FIGURAS

<i>Figura 2.1 Cinemática do Processo de Torneamento</i>	12
<i>Figura 2.2 Principais operações de torneamento – Norma DIN 8589</i>	12
<i>Figura 2.3 Componentes da Força de Usinagem no Torneamento – Norma DIN 6584</i>	13
<i>Figura 2.4 Influência da Velocidade de Corte na Força de Corte</i>	15
<i>Figura 2.5 Variação da dureza de alguns materiais de ferramentas de corte com a temperatura</i>	21
<i>Figura 2.6 Aumento das velocidades de corte conquistado ao longo do último século</i>	22
<i>Figura 2.7 Estrutura a)- hexagonal compacta se transforma em b) – cúbica de face centrada; c) diagrama de equilíbrio diamante/grafite</i>	24
<i>Figura 2.8 Estrutura cristalina do a)- HBN e do b)- CBN; c)- diagrama de equilíbrio HBN/CBN</i>	25
<i>Figura 2.9 Tipos de desgastes na ferramenta de corte: (A) Desgaste de cratera; (B) Desgaste de flanco; (C) e (D) Desgaste de entalhe</i>	28
<i>Figura 2.10 Padrão de desgaste de uma ferramenta de corte</i>	29
<i>Figura 2.11 Mecanismos de desgaste</i>	30
<i>Figura 2.12 Desgaste VB e KT de uma ferramenta de metal duro em função da velocidade de corte, para o aço ABNT 1060</i>	34
<i>Figura 2.13 Medida da temperatura de corte pelo método do termopar ferramenta-peça-cavaco, para diferentes materiais</i>	36
<i>Figura 2.14 Direções de aplicação do fluido de corte: 1 – Sobre-cabeça; 2 – Superfície de Saída; 3 – Superfície de folga; 4 – Interior da ferramenta</i>	40
<i>Figura 2.15 Variação da a) Força de Corte, b) Rugosidade e c) Temperatura; com relação a velocidade de corte e avanço</i>	42
<i>Figura 2.16 Elementos que compõem a superfície usinada</i>	45
<i>Figura 2.17 Representação da linha média</i>	46
<i>Figura 3.1 Fluxograma representativo da sequência de desenvolvimento dos experimentos</i>	47
<i>Figura 3.2. Detalhes das dimensões da pastilha SNGA 120412S0103A 7015</i>	50
<i>Figura 3.3 Detalhes das dimensões do suporte utilizado para os experimentos</i>	51

<i>Figura 3.4. Torno CNC Romi® Multiplic modelo 35D</i>	52
<i>Figura 3.5 Layout da máquina Torno CNC Multiplic modelo 35D</i>	52
<i>Figura 3.6 Estereoscópio Zeiss, computador e software para captação das imagens</i>	54
<i>Figura 3.7 Desgaste da ferramenta utilizada durante teste com MQF na direção de folga principal</i>	54
<i>Figura 3.8 Dinamômetro Kistler® utilizado para medição das forças nos experimentos</i>	55
<i>Figura 3.9 Direções de aplicação do fluido de corte: (a) Superfície de folga principal, (b) Superfície de folga secundária e (c) Sobre-cabeça</i>	56
<i>Figura 3.10 Rugosímetro Mitutoyo modelo SJ-201</i>	57
<i>Figura 3.11 Microscópio eletrônico de varredura TM3000</i>	58
<i>Figura 3.12 Desgaste obtido em ferramenta durante teste com MQF aplicado na direção da superfície de folga secundária</i>	58
<i>Figura 4.1 Resultados do desgaste para algumas amostras obtidas durante os ensaios</i>	68
<i>Figura 4.2 Gráfico do desgaste das ferramentas de corte com MQF</i>	70
<i>Figura 4.3 Gráfico da Taxa de Desgaste das ferramentas com MQF</i>	71
<i>Figura 4.4 Gráfico da comparação entre desgaste da ferramenta com MQF e a seco</i>	72
<i>Figura 4.5 Rugosidade R_a com MQF e a seco</i>	73
<i>Figura 4.6 Rugosidade R_z com MQF e a seco</i>	74
<i>Figura 4.7 Rugosidade R_q com MQF e a seco</i>	74
<i>Figura 4.8 Desgaste das ferramentas usadas nos ensaios com MQF aplicado na direção da superfície de folga secundária</i>	79
<i>Figura 4.9 Visualização do Gradiente de Temperatura da ferramenta utilizada nos testes com $V_c = 310$ m/min; $f = 0,05$ mm/rev; $a_p = 0,05$ mm; $VB_{Bmax} = 0,27$ mm</i>	80
<i>Figura 4.10 Desgaste das ferramentas de corte com MQF na direção sobre-cabeça</i>	81
<i>Figura 4.11 Desgaste das ferramentas de corte com MQF na direção da superfície de folga secundária</i>	81
<i>Figura 4.12 Taxa de desgaste das ferramentas de corte com MQF na direção sobre-cabeça</i>	82

<i>Figura 4.13 Taxa de desgaste das ferramentas de corte com MQF na direção da superfície de folga secundária</i>	82
<i>Figura 4.14 Desgaste da ferramenta de corte com MQF na superfície de folga, superfície de folga secundária, sobre-cabeça e a seco</i>	84
<i>Figura 4.15 MQF aplicado na direção da superfície de folga secundária. Ferramenta 4, Aresta 4; $V_c = 310$ m/min, $f = 0,05$ mm/rev, $VB_{Bmax} = 0,27$ mm</i>	85
<i>Figura 4.16 MQF aplicado na direção da superfície de folga secundária. Ferramenta 5, Aresta 2; $V_c = 340$ m/min, $f = 0,05$ mm/rev, $VB_{Bmax} = 0,17$ mm</i>	86
<i>Figura 4.17 MQF aplicado na direção sobre-cabeça. Ferramenta 9, Aresta 2; $V_c = 310$ m/min, $f = 0,05$ mm/rev, $VB_{Bmax} = 0,18$ mm</i>	86
<i>Figura 4.18 MQF aplicado na direção da superfície de folga principal. Ferramenta 9, Aresta 6; $V_c = 310$ m/min, $f = 0,15$ mm/rev, $VB_{Bmax} = 0,19$ mm</i>	87
<i>Figura 4.19 MQF aplicado na direção sobre-cabeça. Ferramenta 10, Aresta 8, $V_c = 340$ m/min, $f = 0,05$ mm/rev, $VB_{Bmax} = 0,26$ mm</i>	87
<i>Figura 4.20 MQF aplicado na direção sobre-cabeça. Ferramenta 7, Aresta 1, $V_c = 250$ m/min, $f = 0,05$ mm/rev, $VB_{Bmax} = 0,21$ mm</i>	88
<i>Figura 4.21 Gráfico de distribuição dos resíduos pelos valores previstos – desgaste</i>	91
<i>Figura 4.22 Superfície de resposta para o desgaste obtido nos ensaios</i>	92
<i>Figura 4.23 Gráfico da distribuição dos resíduos pelos valores previstos – rugosidade</i>	94
<i>Figura 4.24 Gráfico da distribuição dos resíduos pelos valores previstos – força</i>	95

LISTA DE TABELAS

<i>Tabela 2.1 Forças de corte e de avanço no torneamento de um aço baixo carbono em função do ângulo de saída; V_c constante de 27 m/min</i>	17
<i>Tabela 2.2 Dados quantitativos dos principais materiais para ferramenta de corte</i>	22
<i>Tabela 2.3 Principais propriedades dos ultraduros</i>	26
<i>Tabela 2.4 Alguns parâmetros de rugosidade</i>	46
<i>Tabela 3.1 Informações e características dos principais aços para trabalho a frio</i>	49
<i>Tabela 3.2 Especificações técnicas dos tornos universais programáveis CNC linha Multiplic</i>	53
<i>Tabela 3.3 Condições de corte</i>	60
<i>Tabela 3.4 Ensaios selecionados para testes com MQF na direção secundária de folga e sobre-cabeça</i>	61
<i>Tabela 4.1 Dados experimentais obtidos nos ensaios sem uso de fluido de corte, usinagem a seco</i>	63
<i>Tabela 4.2 Dados experimentais obtidos nas réplicas sem uso de fluido de corte, usinagem a seco</i>	64
<i>Tabela 4.3. Dados experimentais obtidos nos ensaios com MQF aplicado na superfície de folga</i>	66
<i>Tabela 4.4 Dados experimentais obtidos nas réplicas com MQF aplicado na superfície de folga</i>	67
<i>Tabela 4.5 Condições de corte utilizadas para os ensaios com MQF nas direções sobre-cabeça e na superfície de folga secundária</i>	76
<i>Tabela 4.6 Resultados obtidos nos testes com MQF aplicado na direção sobre-cabeça</i>	77
<i>Tabela 4.7 Resultados obtidos nas réplicas com MQF aplicado na direção sobre-cabeça</i>	77
<i>Tabela 4.8 Resultados obtidos nos testes com MQF aplicado na direção da superfície de folga secundária</i>	77
<i>Tabela 4.9 Resultados obtidos nas réplicas com MQF aplicado na direção da superfície de folga secundária</i>	78

<i>Tabela 4.10 Tabela da lista de imagens do MEV – microscópio eletrônico de varredura</i>	85
<i>Tabela 4.11 Coeficientes de regressão múltipla – desgaste – Ensaio com MQF</i>	91
<i>Tabela 4.12 Coeficientes de regressão múltipla – rugosidade – ensaio com MQF</i>	93
<i>Tabela 4.13 Coeficientes de regressão múltipla – força – ensaio com MQF</i>	94

SUMÁRIO

LISTA DE SÍMBOLOS	ix
LISTA DE FIGURAS	xi
LISTA DE TABELAS	xiv
CAPÍTULO I – Introdução	1
CAPÍTULO II – Revisão Bibliográfica	5
2.1 Breve História do “HARD TURNING”	5
2.1.1 Torneamento de Peças Duras	6
2.1.2 Aços Endurecidos	8
2.2 Usinagem	9
2.2.1 Operação de Torneamento	12
2.3 Forças na Usinagem	13
2.3.1 Fatores que Influenciam as Forças de Usinagem	14
2.3.2 Método da Medição das Forças de Usinagem	18
2.3.3 Potência de Usinagem	19
2.4 Materiais para Ferramentas de Corte	20
2.4.1 Materiais de Ferramentas Ultraduros	23
2.4.2 PCBN – Nitreto Cúbico de Boro Policristalino	26
2.5 Desgastes das Ferramentas de Corte	28
2.5.1 Mecanismos de Desgastes das Ferramentas de Corte	30
2.5.2 Parâmetros de Desgaste e Critérios de Fim de Vida da Ferramenta	32
2.6 Fluidos de Corte	34
2.6.1 História do Uso de Fluido de Corte	34
2.6.2 Funções dos Fluidos de Corte	38
2.6.3 Aditivos e Fluidos de Corte	39
2.6.4 Direções e Métodos de Aplicação dos Fluidos de Corte	40
2.6.5 Escolha do Fluido de Corte	43
2.7 Rugosidade e Acabamento Superficial	44
CAPÍTULO III – Metodologia	47
3.1 Critérios para Seleção da Matéria-prima	48
3.2 Matéria-prima	48

3.3 Ferramenta	49
3.4 Suporte	51
3.5 Equipamentos	52
3.5.1 <i>Máquina-ferramenta</i>	52
3.5.2 <i>Estereoscópio Zeiss Discovery V12</i>	54
3.5.3 <i>Dinamômetro</i>	55
3.5.4 <i>Sistema ACCU-LUBE</i>	56
3.5.5 <i>Rugosímetro</i>	57
3.5.6 <i>MEV – Microscópio Eletrônico de Varredura</i>	57
3.6 Procedimentos Experimentais	59
CAPÍTULO IV – Resultados e Discussões	62
4.1 Resultados e Discussões com MQF Aplicado em Outras Direções	75
4.2 Avaliação dos Mecanismos de Desgaste das Ferramentas de Corte	84
4.3 Análise Estatística para os Resultados	89
CAPÍTULO V – Conclusões e Sugestões para Trabalhos Futuros	96
5.1 Conclusões	96
5.2 Sugestões para Trabalhos Futuros	97
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	98

CAPÍTULO I

INTRODUÇÃO

Nas últimas décadas aços ferramentas para trabalho a frio vêm ganhando espaço em diversas aplicações práticas na engenharia, principalmente quando são exigidos requisitos de elevada resistência ao desgaste, tenacidade e resistência à corrosão (SANTOS e SALES, 2007).

Estes aços se destinam à fabricação de ferramentas para o processamento a frio de outros aços, ferros fundidos, metais não ferrosos, e em operações diversas como corte, dobramento, estampagem, extrusão, trefilação, prensagem de pós-metálicos e materiais cerâmicos, entre outras aplicações (VILLARES METALS, 2011).

Uma das principais características deste material é que ele passa por um tratamento térmico garantindo uma dureza elevada, que proporciona uma melhoria de algumas propriedades mecânicas, como a resistência a tração e tenacidade. Normalmente, quando usados em matrizes estes aços passam por processos de usinagem, exigindo assim, boas características de usinabilidade. Uma das operações possíveis de usinagem é o torneamento. Precisamente, operação torneamento duro ou “Hard Turning” é uma alternativa para a operação de retífica convencional, com relação ao custo efetivo, alta produtividade e um processo de usinagem flexível para componentes de metais ferrosos, muitas vezes superiores a 45 HRC (GAITONDE *et al.*, 2009).

Materiais que necessitavam ser usinados em sua forma endurecida atendendo às exigências de acabamento superficial e dimensional geralmente são usinados através do processo abrasivo de retificação. Um dos principais motivos para o uso da retificação nesses processos de acabamento deve-se ao fato do domínio da tecnologia de fabricação de rebolos cerâmicos, desde os anos 70. Porém, com o desenvolvimento científico e tecnológico das ferramentas de corte, como ferramentas cerâmicas e PCBN, tornaram possível a usinagem desses materiais de elevada dureza, utilizando ferramentas com a geometria definida da aresta de corte (CAMARGO, 2011). As principais evoluções destas ferramentas, também denominados materiais ultraduros ou super abrasivos, está relacionado com a dureza (acima de 3000 HV para o PCBN) e a resistência ao desgaste (MACHADO *et al.*, 2011). Não se pode esquecer que a evolução das máquinas-ferramentas também contribuiu para o desenvolvimento do processo, pois as técnicas para

este tipo de usinagem (“Hard Turning” – torneamento duro) requerem máquinas-ferramentas potentes, precisas e rígidas (KLOCKE e EISENBLATTER, 1997).

As vantagens deste processo de usinagem são evidentes e muito atrativas, mas para substituir um processo bem conhecido (retificação) por um processo ainda não totalmente dominado, exige precauções. Assim, estudos direcionados para esta área são sempre bem vindos e, normalmente, são de grande valor científico.

A prática tem mostrado que a usinagem desse tipo de material, mesmo em processos contínuos (torneamento, por exemplo), é realizada sem aplicação de fluidos de corte (isto é, a seco) (ABRÃO, 1995). A principal razão disto é que a dificuldade de cisalhar este material é tanta que o calor gerado no processo de formação do cavaco auxilia a reduzir esta resistência à deformação. Para se ter uma idéia, Bhattacharyya *et al.* (1978) relatou que ao usinar o aço para trabalho a frio AISI D3 (58-62 HRC) utilizando ferramenta PCBN, com uma velocidade de corte em torno de 60 m/min, avanço de 0,12 mm/rev e profundidade de corte de 2 mm, a temperatura na zona de corte ficou entre 1275-1300 °C. A elevada abrasividade e resistência mecânica fazem com que aumentem as forças de corte na usinagem de materiais endurecidos, mesmo em elevadas temperaturas (NAKAYAMA *et al.*, 1998). Ao se aplicar um fluido de corte, sua ação refrigerante irá reduzir a temperatura média da peça e a tarefa de formação do cavaco se tornará mais difícil, podendo agravar o desgaste na ferramenta de corte.

Camargo (2011) mostrou que a minimização do desgaste em função dos parâmetros avanço (f), profundidade (a_p) e velocidade de corte (V_c) foi obtida quando dois desses parâmetros atingiram seus valores experimentais máximos (V_c e f), significando uma maior produtividade para o processo, mediante uma taxa de desgaste menor, usinando o mesmo material (AISI D6 – VC131) e utilizando a mesma ferramenta que será usada no presente trabalho (PCBN), sem a utilização de fluido de corte.

Ávila e Abrão (2001) mostraram que ao analisar a vida da ferramenta no torneamento do aço AISI 4340 endurecido, a condição onde se utiliza uma emulsão sem óleo mineral superou as condições a seco e utilizando fluido sintético, com os parâmetros avanço (f) e profundidade de corte (a_p) fixos, sendo seus valores iguais a 0,15 mm/rev e 2,0 mm, respectivamente. Essa diferença fica mais acentuada conforme aumenta a velocidade de corte (V_c).

Sabe-se que o fluido de corte exerce tanto o papel de lubrificante a baixas velocidades, como de refrigerante a altas velocidades, nos processos de usinagem (MACHADO *et al.*, 2011).

Para a questão citada anteriormente de que a temperatura é benéfica para o processo e o fluido de corte, agindo como refrigerante, pode prejudicar a usinagem com este tipo de material, uma das tentativas é aplicar o fluido de corte com uma quantidade mínima (MQF – *Mínima Quantidade de Fluido* ou MQL – *Mínima Quantidade de Lubrificante*), para conseguir ação mais lubrificante do que refrigerante. Segundo Kumar e Ramamoorthy (2007), torneamento duro com aplicação mínima de fluido de corte é uma estratégia, em que uma quantidade extremamente pequena de fluido de corte especial é aplicada precisamente na zona de corte. Outro aspecto interessante a ser considerado é com relação ao custo da usinagem. De acordo com Krees (1997), o custo associado ao uso de fluido de corte representa aproximadamente 17% ao final da peça terminada, contra apenas 4% do gasto com ferramental. Sendo assim, utilizar o método MQF (pulverização) é uma alternativa também para reduzir custos.

Machado e Wallbank (1997) relataram que a aplicação de fluido de corte no método de pulverização (spray) a taxas de 200/300 ml/h, ao tornear um aço de médio carbono, com baixas velocidades de corte e valores elevados de avanço, resultou em forças de corte e forças de avanço menores e acabamento superficial superior, se comparado ao convencional.

A proposta do presente trabalho é utilizar um método de aplicação do fluido de corte favorável para os testes, onde será adotada uma direção de aplicação para obter a lubrificação na zona de cisalhamento secundária sem que o resfriamento prejudique o processo de formação do cavaco e a vida da ferramenta.

Como citado na tese de DA SILVA (2006), os autores Norihiko e Akio (1998) descobriram que ao aplicar o fluido de corte nas direções da superfície de saída e superfície de folga simultaneamente o processo foi melhorado com a prevenção da adesão entre o cavaco e a superfície de saída da ferramenta, bem como grande redução da adesão sobre o flanco lateral da ferramenta.

Os objetivos deste trabalho são:

- Comparar o desgaste da ferramenta com aplicação de fluido de corte na forma de MQF, baseado nos resultados obtidos por Camargo (2011), com os resultados

obtidos na usinagem a seco, utilizando as mesmas ferramentas e parâmetros de corte;

- Determinar a melhor condição de corte que garanta uma melhor usinabilidade conferindo maior vida à ferramenta;
- Identificar os mecanismos de desgaste da ferramenta de corte no processo de usinagem;
- Verificar a influência da aplicação do fluido de corte no método MQF (pulverização) através da rugosidade obtida, durante o processo de usinagem;

O trabalho experimental consistirá na usinagem (torneamento com altas velocidades) do aço ABNT D6 (VC 131), tratado termicamente (dureza em torno de 60 HRC) com uma ferramenta de PCBN (Nitreto Cúbico de Boro Policristalino).

Os resultados deste trabalho fornecerão informações à realização de testes de usinagem auxiliando-as no dimensionamento de matérias primas, seleção de máquinas adequada aos parâmetros de usinagem estabelecidos, além de propor condições ideais de usinagem. Espera-se com o trabalho agregar conhecimento a uma área que esta em constante aperfeiçoamento.

O trabalho esta dividido da seguinte forma:

No capítulo 2 é apresentada a fundamentação teórica, onde são abordadas as informações técnicas necessárias para o bom entendimento dos conceitos pertinentes a pesquisa. Também apresenta a revisão de trabalhos relacionados à usinagem de aços com elevada dureza que contribuem para situar o estado atual do conhecimento relacionado a pesquisa.

No capítulo 3 é descrita a metodologia adotada para testar as hipóteses levantadas para identificar a influencia de vários fatores (parâmetros de corte) no desgaste da ferramenta. Além disso, são descritos os procedimentos para a realização dos experimentos, bem como os materiais e equipamentos utilizados.

O capítulo 4 traz as discussões dos resultados obtidos nos experimentos.

O capítulo 5 apresenta as conclusões obtidas e as sugestões para trabalhos futuros.

Ao final são apresentadas as referências bibliográficas no qual este trabalho é embasado.

CAPÍTULO II

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Este capítulo traz um breve estudo dos assuntos mais relevantes a fim de contribuir com um pouco de conhecimento sobre as áreas relacionadas à atual pesquisa. Começa-se, portanto, apresentando um breve histórico sobre a evolução do cenário do processo de usinagem (torneamento) de materiais de elevada dureza, conceito de força e potência, materiais para ferramenta de corte, rugosidade, ferramentas de corte, fluidos de corte, mecanismos de desgaste e fatores que influenciam na vida da ferramenta.

2.1 Breve História do “*HARD TURNING*”

A crescente utilização de materiais de alta dureza na indústria tem levado a busca de novas formas de produção como também a novos materiais para ferramentas de corte. No passado, o processo de retificação dominava o setor de usinagem de peças endurecidas, entretanto, a partir da década de 70, com a introdução de ferramentas do tipo PCBN, passou a ser possível a usinagem destes materiais com ferramentas de corte de geometria definida (torneamento, fresamento, furação, etc.).

Segundo Stier (1988), indústrias automotivas iniciaram atividades relacionadas ao “Hard Turning” em substituição à retífica para diminuir o diâmetro das peças. Estas aplicações reduziram cerca de 40 % dos gastos de capital e aumentou a produção em aproximadamente 30%.

A alta flexibilidade no processo de torneamento de peças endurecidas comparadas com a tecnologia de retificação oferece grandes benefícios, como por exemplo, a alta taxa de remoção de material e a eliminação da usinagem do metal no estado recozido. A fim de aumentar a flexibilidade e a capacidade de fabricar geometrias complexas, o torneamento duro foi introduzido pela necessidade de que, às vezes, o processo de retífica é muito restrito (KONIG *et al.*, 1984).

Apesar das vantagens serem evidentes, sua aplicação ainda é limitado pela falta de conhecimentos mais específicos em relação à qualidade dimensional e geométrica da peça obtida. Na retífica, geralmente, os custos do processamento são menores se

comparado ao torneamento, exemplo disso são os valores das ferramentas utilizadas, que no caso do torneamento são ferramentas de PCBN que custam bem mais do que os rebolos utilizados na retífica. Um problema que a retificação destes materiais apresenta é que as altas temperaturas produzidas no contato rebolo-peça podem ocasionar a queima da superfície, interferindo no acabamento e na qualidade geométrica da peça.

Muitas aplicações de usinagem com ferramentas de geometria definidas de material endurecido estão crescendo, principalmente processos como torneamento e fresamento. Torneamento de peças endurecidas (“Hard Turning”) não deve ser visto apenas como uma alternativa para todas as operações de retificação, no entanto há aplicações que os dois processos se completam. Resultados apresentados por Tlustý *et al.* (1998) mostram uma performance satisfatória ao utilizar ferramentas PCBN no fresamento plano do material H13, aço tratado termicamente com dureza entre 42-46 HRC. Estas ferramentas apresentaram desgaste de flanco (VB_{Bmax}) significativo, ou seja, acima de 0,1 mm, somente após 140 m de comprimento de corte.

“Hard Turning” logo foi reconhecido como o pioneiro na indústria automotiva como meio de melhorar a fabricação de componentes de transmissão. Superfícies de rolamento e discos de engrenagens são exemplos típicos de aplicação de torneamento de peças endurecidas com ferramentas de PCBN (Nitreto Cúbico de Boro Policristalino). Componentes endurecidos hoje são usinados amplamente em vários setores diferentes da indústria. Materiais endurecidos geralmente utilizam profundidade de corte até 1 mm devido a alta resistência deste material. Neste presente trabalho, por exemplo, a profundidade de corte (a_p) utilizada se manteve fixa no valor de 0,1 mm no diâmetro, um valor pequeno pois a ferramenta utilizada é para acabamento, e também no torneamento de peças duras a profundidade de corte geralmente é bem menor do que o raio de ponta da ferramenta, que neste caso vale 1,2 mm (BARTARYA e CHOUDHURY, 2012).

2.1.1 Torneamento de Peças Duras

Em sua definição mais ampla, peças consideradas duras possuem uma dureza acima de 45HRC, embora frequentemente sejam usinados materiais com dureza de até 68 HRC (GAITONDE *et al.*, 2009). É um processo que utiliza altas velocidades, em média V_c igual a 250 m/min. Portanto, é necessária elevada rigidez da máquina-ferramenta para garantir que o acabamento superficial seja atingido com alta precisão (KORN, 2004).

Quando a usinagem envolve materiais com dureza acima de 45 HRC, se espera que as forças de usinagem tenham valores elevados e, portanto, é necessário materiais para ferramenta com características a suportar tais exigências que peças duras exigem. Segundo Korn (2004), estudos mostram que as ferramentas mais utilizadas são CBN, PCBN e CBN com revestimentos TiN.

Os materiais endurecidos são diversos, como por exemplo, determinadas ligas de aço, superligas, aços nitretados, aços revestidos, peças tratadas termicamente etc. Alguns benefícios foram observados por quem utiliza esse tipo de processo:

- Fácil de adaptar a componentes complexos;
- Troca rápida entre os componentes;
- Várias operações realizadas em um mesmo setup;
- Não há necessidade de máquina especial para o torneamento de peças endurecidas, utiliza-se o mesmo torno para peças convencionais;
- Eliminação de fluido de corte na maioria dos casos;
- Pequeno inventário para ferramentas;
- Acabamento superficial vantajoso em muitos casos;

Neste tipo de processo, vários outros fatores influenciam para um melhor resultado, como por exemplo, o material da peça, o material da ferramenta, a geometria da ferramenta, a rigidez da máquina-ferramenta, o avanço etc. Mas os fatores mais críticos que afetam a integridade da superfície da peça nas operações de cisalhamento são uma combinação entre velocidade de corte, avanço e o desgaste da ferramenta (CAMARGO, 2011). Estudos mostram que a combinação destes parâmetros pode resultar em um melhor acabamento do que o processo de retífica (BARTARYA e CHOUDHURY, 2012). Além de que um mesmo setup para o torneamento de peças duras pode realizar múltiplas operações se comparado com um mesmo setup na retífica, isto também contribui para a alta precisão alcançada por este processo.

Porém, mesmo o processo de “Hard Turning” ser impressionante devido a sua capacidade de substituir a retífica quanto ao processo de acabamento, que é um processo de custo elevado, devido ao custo com máquinas, lubrificantes, instalações etc., existem algumas limitações para este tipo de processo, como por exemplo, o desgaste da

ferramenta resulta em dimensões erradas da peça, geometrias deformadas e baixa qualidade superficial (GRZESIK *et al.*, 2007).

Pesquisas recentes trazem algumas recomendações quando de tratam de torneamento de peças duras. Este tipo de processo trabalha essencialmente com velocidade de corte (V_c) elevada, baixos valores de avanço (f) e baixos valores de profundidade de corte (a_p). Geralmente as velocidades de corte ficam entre 100-250 m/min, porém alguns trabalhos utilizam velocidades ainda mais altas (DINIZ e OLIVEIRA, 2008). O avanço possui valores em torno de 0,05-0,2 mm/rev, enquanto a profundidade de corte não ultrapassa o valor de 0,2 mm (ZHOU *et al.*, 2003). Recentemente, boa parte das pesquisas tentam investigar e entender os efeitos de parâmetros como forças de usinagem, acabamento superficial, tensão residual etc., além dos diferentes formatos para ferramentas, tipos de materiais e revestimentos para ferramentas durante o processo de “Hard Turning”. Na literatura encontram-se pesquisas sobre forças e temperaturas para o torneamento de peças duras, integridade superficial, métodos para lubrificação e resfriamento, desgaste e vida da ferramenta, entre outras características (BARTARYA e CHOUDHURY, 2012).

2.1.2 Aços Endurecidos

Quando o aço é endurecido pode tornar-se até duas vezes mais difícil de usar se comparado à condição convencional. A dureza aumenta a resistência de um material a ser deformado plasticamente e penetrado por outro material, portanto, o material mais duro é mais difícil de cortar. Na usinagem, geralmente a dureza do material faz grande diferença para a ferramenta de corte. Para fins de aplicação, alguns autores classificam os materiais de elevada dureza quando seus valores ficam entre 50-70 HRC (KONIG, 1987). Quando a dureza de um material excede um determinado limite, é necessária a utilização de um metal mais duro como ferramenta, uma relação de aproximadamente três vezes mais que a dureza da peça (NAKAYAMA *et al.*, 1998). A maioria dos componentes rígidos é na região de 55-68 HRC, exigindo um material mais duro e mais resistente para a ferramenta, como o PCBN, oferecendo tempos de usinagem maiores para cada ciclo e cortes mais consistentes. No entanto, materiais com dureza abaixo de 45 HRC não utilizam ferramentas PCBN, pois existem materiais para ferramentas, como o CBN, as cerâmicas ou até mesmo metal duro, com custo menor que o anterior e possuem um rendimento satisfatório para materiais de dureza não tão elevada.

2.2 Usinagem

Pode-se definir usinagem como o processo de fabricação onde o intuito é conferir à peça a forma, as dimensões ou o acabamento desejado, através da retirada de cavaco. Cavaco é a porção de material retirada da peça pela ferramenta, sendo seu formato irregular (FERRARESI, 1981).

Para se aperfeiçoar o processo, é necessário o estudo de fatores que favorecem o corte destes materiais através do menor gasto energético possível, máxima vida da ferramenta e menor custo de produção. O objetivo é a máxima produção de peças, com boa qualidade. Para obter um bom projeto de usinagem, alguns fatores devem ser amplamente estudados, sendo os principais (MACHADO *et al.*, 2011):

1. *Grandezas Físicas no processo de corte:*

Os principais parâmetros de corte são a velocidade de corte (V_c), isto é, a velocidade instantânea da aresta cortante da ferramenta, segundo a direção e sentido de corte; e o avanço (f), percurso em cada volta ou em cada curso da ferramenta.

A alta velocidade de corte pode trazer alguns aspectos positivos se comparado com a baixa velocidade, que são a alta produtividade, o não aparecimento de APC (Aresta Postiça de Corte), tempo maior de produção etc.

Porém, existem alguns aspectos negativos quanto à utilização de alta velocidade que em baixa velocidade não tem, como o desgaste acelerado da ferramenta, tempo ocioso para troca de ferramenta, custo elevado, etc.

Com o avanço pode-se fazer uma análise análoga, onde maiores avanços, se comparados a avanços pequenos, têm-se menor tempo de corte e maior produtividade. No entanto, com avanços menores as forças de corte serão menores e os acabamentos serão melhores.

Portanto, o conhecimento destas grandezas físicas e a combinação destas com outras grandezas (como a profundidade de corte, a_p) para a usinagem, pode favorecer a produção, tornando-a um processo mais lucrativo, com menos tempo de fabricação e maior qualidade das peças finais.

2. *Formação, controle e influências do cavaco:*

O material da peça está diretamente ligado ao tipo de cavaco que será formado. Ductilidade pode ser definida como a capacidade que um material possui de deformar sem que haja sua fratura. Neste caso, material dúctil é aquele que apresenta elevada capacidade de deformação plástica sem ocorrer fratura, caso contrário, material com baixa capacidade de deformação plástica é considerado um material frágil. Geralmente, peças dúcteis geram cavacos contínuos e longos, não sendo o tipo mais indicado para a produção, pois ocupam muito espaço e podem causar acidentes; enrolar na peça, no suporte da ferramenta ou em componentes da máquina-ferramenta; atrasando a produção além de ocasionar um acabamento inferior. Peças frágeis geram cavacos pequenos, descontínuos e quebradiços, que é o tipo mais indicado para a produção, ocupando menos espaço, ideal para ser reciclado ou fundido novamente.

No torneamento de peças duras, assim como na maioria dos casos de usinagem, a maior parte do calor gerado é dissipado através do cavaco, principalmente a altas velocidades, de modo que a temperatura da ferramenta e da peça diminui substancialmente. Durante o corte contínuo, o cavaco tem o aspecto alaranjado e escoa como uma fita (YALLESE *et al.*, 2009).

3. *Material, geometria e desgaste da ferramenta:*

A escolha da ferramenta é feita de acordo com o tipo do material da peça e a operação de usinagem utilizada. Dentre os diversos tipos de materiais para ferramenta existentes, os mais utilizados são aços-rápidos, metais duros, cerâmicos e ultraduros. Estes materiais diferem entre si, dentre outros fatores, pela sua tenacidade e dureza. Tenacidade pode ser entendida como a capacidade que um material tem para absorver o impacto sem que ocorra sua fratura, sendo os materiais mais tenazes menos duros. Como estes dois fatores são inversamente proporcionais (elevada tenacidade significa baixa dureza, e vice-versa), a escolha do material para ferramenta deve conciliá-las bem. Um exemplo para representar esta diferença é o fresamento, pois se trata de um processo no qual o corte é interrompido. Neste caso, além das ferramentas possuírem uma boa dureza, deve possuir também um elevado valor de tenacidade, para poder suportar os diversos choques mecânicos que ocorrem na entrada e saída da ferramenta durante o processo de usinagem. Mais indicado para este tipo de processo são os aços-rápidos ou metais duros.

Já no torneamento, por ser um processo de corte contínuo, as ferramentas de cerâmicas e metais duros são uma boa indicação, por não haver tanta necessidade de tenacidade, e sim de alta dureza. Como dito anteriormente, os materiais para ferramentas mais utilizados para torneamento de peças duras são CBN, CBN com revestimentos e PCBN.

Para a geometria da ferramenta, o ângulo de saída está entre o mais importantes, pois ele influencia diretamente na força e na potência necessária ao corte, no acabamento da superfície e no calor gerado. Quanto menor for o raio da aresta de corte, as forças de usinagem tendem a serem menores e o acabamento superficial é melhorado, se comparado a uma aresta re-afiada ou chanfrada (THIELE e MELKOTE, 2007).

Um dos maiores problemas encontrados na usinagem é a quebra e/ou desgaste das ferramentas de corte, pois o tempo ocioso para a troca ou afiação da ferramenta é prejudicial para a produção. Neste caso têm-se dois tipos de prejuízo, 1- no tempo em que a máquina ficará parada para a troca/afiação desta ferramenta, não haverá produção; 2- os gastos com a recuperação de uma ferramenta ou a substituição por uma ferramenta nova no caso de troca por fratura.

4. *Fluidos de corte:*

Quando utilizados corretamente, os fluidos são uma boa alternativa para abaixar os custos e/ou aumentar a produtividade. Com os fluidos de corte pode-se conseguir a diminuição do desgaste das ferramentas, redução das forças de corte, diminuição da temperatura e lubrificação da região de cisalhamento. Somente com estas características nota-se que a utilização do fluido de corte é benéfica para a produção. O gasto que se tem com ferramentas normalmente é mais alto do que os gastos com os fluidos de corte (SIMOES, 2012). Porém, deve-se notar que determinados materiais são indicados a usinar sem a utilização de fluidos de corte, pois neste caso a alta temperatura é benéfica para o processo, e o resfriamento não seria indicada. Também há cuidados a se tomar quanto aos impactos ambientais e à saúde do operador em contato com o fluido de corte.

Todas estas observações serão detalhadas posteriormente neste trabalho, em um tópico específico para a melhor discussão deste importante fator para a usinagem.

2.2.1 Operação de Torneamento

O torno mecânico é uma máquina ferramenta extremamente versátil. É utilizada na confecção ou acabamento em peças dos mais diversos tipos e formas. Seu funcionamento é simples, onde a peça é fixada entre as pontas dos eixos para que possa ser trabalhada pelo torneiro mecânico, profissional qualificado para o manuseio desse equipamento de precisão (CAMARGO, 2011). Existem vários tipos de tornos mecânicos, tais como universais, automáticos, multiuso, CNC (Comando Numérico Computadorizado), etc. O torno pode executar mais operações do que qualquer outra máquina-ferramenta.

A Figura 2.1 mostra a cinemática do processo de torneamento e sua versatilidade, já a Figura 2.2 mostra as principais operações de torneamento segundo a norma DIN 8589.

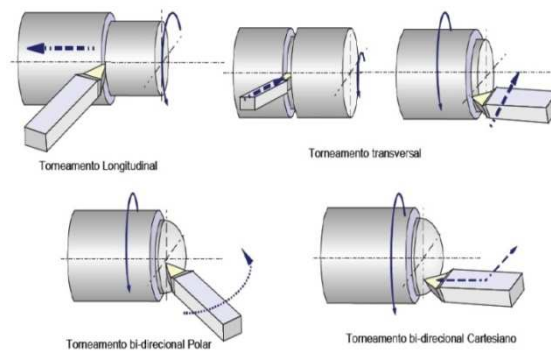


Figura 2.1 Cinemática do Processo de Torneamento (STOETERAU, 2003)

Operação de torneamento	Externo	Interno
Longitudinal		
Piano ou transversal		
Helicoidal		
de forma		
de perfil		

Figura 2.2 Principais operações de torneamento – Norma DIN 8589 (adaptado de STOETERAU, 2003)

2.3 Forças na Usinagem

Segundo Machado *et al.* (2011) é de grande importância o conhecimento das forças de usinagem que agem na cunha cortante e o estudo do comportamento de suas componentes, não somente porque a potência requerida pode ser estimada no momento do corte, mas também, porque elas devem ser consideradas no projeto das máquinas-ferramentas e de seus elementos. Ela pode ser responsável direta por mecanismos e processos de desgaste, como também pelo colapso da ferramenta de corte por deformação plástica de sua aresta. A força de usinagem pode representar um parâmetro de usinabilidade, além de poder ser usada como parâmetro para controle adaptativo do processo.

A Figura 2.3 apresenta a representação das componentes da força de usinagem no corte tridimensional, segundo a norma DIN 6584. Todas as componentes das forças podem ser determinadas prontamente, com o auxílio de um dinamômetro, como foi utilizado neste trabalho, pois suas direções são claramente conhecidas.

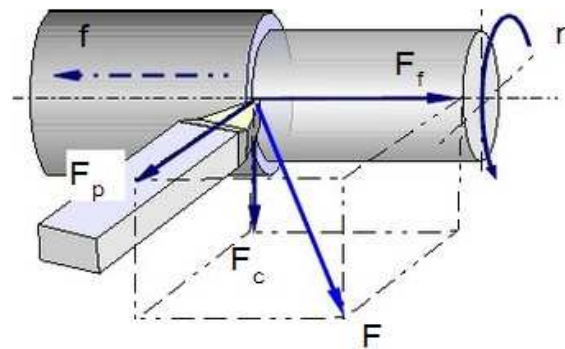


Figura 2.3 Componentes da Força de Usinagem no Torneamento – Norma DIN 6584 (adaptado de STOETERAU, 2003)

No caso do torneamento, a resultante F pode ser decomposta conforme mostra a Equação 1:

$$F = F_c + F_f + F_p \quad [1]$$

Onde F_p (força passiva) é a projeção de F sobre a perpendicular ao plano de trabalho.

2.3.1 Fatores que Influenciam as Forças de Usinagem

Existe uma relação muito próxima entre a interface cavaco-ferramenta com as forças de usinagem, isto é, as forças são alteradas sob as diferentes condições que esta interface apresenta. A maneira com que o cavaco se movimenta sobre a superfície de saída da ferramenta, isto é, as condições da interface cavaco-ferramenta, interferem na força de usinagem. Neste caso, pode-se afirmar que todos os fatores que contribuem para facilitar a movimentação do cavaco por sobre a superfície de saída, atuam no sentido de diminuir a força de usinagem (F_u) e vice-versa. Seguindo esse raciocínio de quanto maior a dificuldade de escoamento livre do cavaco na interface maior será a força, então podem ser considerados dois fatores principais em que a força dependerá (TRENT, 2000):

- Áreas dos planos de cisalhamento primário e secundário;
- Resistência ao cisalhamento do material da peça, nos planos de cisalhamento primário e secundário;

Com isso, todos os parâmetros podem ser analisados, com base nos seus efeitos sobre estes dois fatores principais. Muitos deles vão atuar nos dois fatores e os resultados vão depender da predominância de um sobre o outro. Porém, estas predominâncias dos fatores devem ser comprovadas experimentalmente. Com base em alguns resultados, é possível observar a influência das principais variáveis (MACHADO *et al.*, 1996):

- ***Velocidade de corte***

Para materiais que contêm segunda fase, caso dos aços, na faixa de velocidade onde se faz presente a APC (Aresta Postiça de Corte), observa-se um comportamento da força e usinagem bem característico (Figura 2.4). No início, para velocidades pequenas, a APC ainda é muito reduzida e a tendência é a redução da força com o aumento da velocidade, devido ao aumento das dimensões da APC. Na presença da APC, a força de corte é menor porque o ângulo de saída efetivo é maior e a área do plano de cisalhamento secundário é bem menor, comparado com a situação sem APC. Conforme a velocidade aumenta, a APC tende a aumentar até um valor máximo. Neste ponto a força atinge seu valor mínimo. Além deste ponto, o aumento da velocidade reduz as dimensões da APC,

entrando em regime instável, aumentando a força até o ponto da velocidade critica (valor de velocidade de corte no qual a APC é eliminada). A partir deste ponto, pela maior geração de calor, redução da resistência ao cisalhamento e ligeira redução na área de contato cavaco-ferramenta, a força de usinagem tende a diminuir gradativamente com o aumento da velocidade de corte, até que, para valores bem altos de velocidade de corte, o comportamento da força se torna praticamente constante.

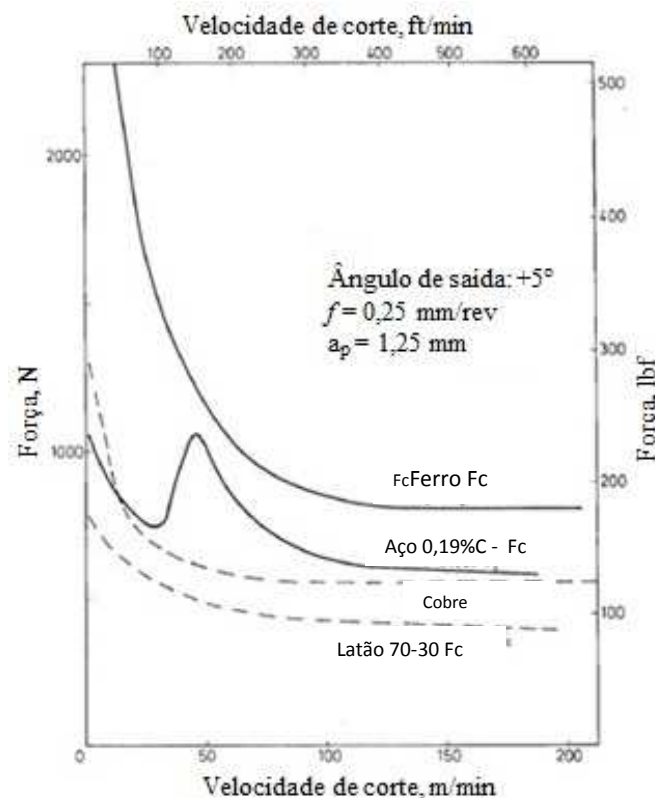


Figura 2.4 Influencia da Velocidade de Corte na Força de Corte
(TRENT e WRIGHT, 2000)

Também se pode observar na Figura 2.4 a relação entre metal puro em comparação com a liga. Apesar de um aço com 0,19% C possuir maior resistência mecânica (portanto maior resistência ao cisalhamento) que o ferro puro, este apresenta uma força maior que a liga. Neste caso, a ductilidade do metal puro por ser maior, garante maiores áreas dos planos de cisalhamento, sobrepondo o fator resistência. O mesmo acontece entre o cobre puro e o latão 70-30.

Além da liga de aço com 0,19% C, os outros materiais do gráfico não possuem segunda fase, pois se tratam de metais puros e de uma liga hipoeutética de Cu-Zn,

portanto não apresentam APC, fazendo com que os pontos de máximo e mínimo característicos da curva de força não se apresentam.

Como regra, na usinagem dos aços com até 0,3% de carbono predomina o fator ductilidade, implicando em menores forças para aqueles com maior o teores de carbono. Acima de 0,3% de carbono predomina o fator resistência, implicando em maiores forças quanto maior for o teor de carbono (TRENT e WRIGHT, 2000).

Observa-se que durante o torneamento de peças duras as forças de usinagem são maiores quando a velocidade de corte é mais baixa, tendendo a diminuir conforme a velocidade de corte aumenta (EBRAHIMI e MOSHKARSAR, 2009). Isto ocorre devido à elevada temperatura para a faixa de velocidades mais altas, resultando em um tipo de “amolecimento térmico” do material da peça reduzindo as forças de usinagem durante o processo (LIN *et al.*, 2008; BOUACHA *et al.*, 2010).

- ***Avanço e profundidade de corte***

Por estes dois fatores estarem diretamente relacionados com as áreas dos planos de cisalhamento primário e secundário, o seu aumento pode causar, numa proporção quase que linear, o aumento da força de usinagem.

Entretanto, o efeito do avanço é maior que da profundidade de corte, verificado experimentalmente (SCHLESINGER, 1936). Lalwani *et al.* (2008), mostram que ao usinar o aço endurecido MDN 250, utilizando ferramenta de cerâmica revestida, a velocidade de corte não tem influência significativa quando seu valor é maior que 144 m/min. No entanto, a força de avanço e a força de corte são afetadas pela profundidade de corte.

- ***Material da peça***

De uma maneira geral, quanto maior a resistência do material para usinar, maior será a resistência ao cisalhamento nos planos de cisalhamento e, portanto, maior a força de usinagem (SCHLESINGER, 1936). Entretanto, baixa resistência pode vir acompanhada de elevada ductilidade e isto pode aumentar a área da seção de corte, influenciando também a força de usinagem.

- **Material da ferramenta**

A área da seção de corte sofre uma influência pouco observada, que é a afinidade química do material da ferramenta com o material da peça. A força pode ser aumentada caso a tendência for promover uma zona de aderência estável e forte. Se o atrito na interface diminuir, evitando as fortes ligações de aderência, a área da seção de corte poderá ser reduzida, diminuindo a força de corte.

- **Geometria da ferramenta**

O ângulo mais importante é o de saída. A redução deste ângulo tende a aumentar a área de contato cavaco-ferramenta e impor uma maior restrição ao escorregamento do cavaco sobre a superfície de saída, aumentando a força de usinagem. A Tabela 2.1 mostra a relação do ângulo de saída (γ) com o avanço (f), para uma velocidade de corte constante em 27 m/min.

Tabela 2.1 Forças de corte e de avanço no torneamento de um aço baixo carbono em função do ângulo de saída; V_c constante de 27 m/min (TRENT e WRIGHT, 2000)

Ângulo de Saída (γ)	Forças de Corte com avanço $f =$				Forças de Avanço com avanço $f =$			
	0,10 mm/rev		0,20 mm/rev		0,10 mm/rev		0,20 mm/rev	
	(N)	(lbf)	(N)	(lbf)	(N)	(lbf)	(N)	(lbf)
+5°	913	205	-	-	392	88	-	-
+10°	840	189	1520	342	289	65	520	117
+15°	743	167	1328	298	200	45	320	72
+20°	716	161	1210	272	151	34	222	50
+25°	627	141	1158	260	80	18	116	26
+30°	600	135	1090	245	49	11	45	10

O ângulo de folga ou incidência terá influência somente se utilizado valores bem pequenos, ou seja, menores que 3°. Neste caso o atrito naquela região ira aumentar e, portanto afetar a força de usinagem proporcionalmente (TRENT e WRIGHT, 2000).

- ***Uso de fluido de corte***

Basicamente, o fluido de corte pode agir de duas maneiras, como lubrificante e como refrigerante. Sua ação refrigerante é mais importante a altas velocidades, pois ajuda a diminuir a temperatura na interface cavaco-ferramenta, diminuindo a temperatura de corte, aumentando a dissipação de calor (SHAW *et al.*, 1951). Como lubrificante, o fluido de corte age para reduzir a área de contato cavaco-ferramenta, e sua eficiência vai depender da sua habilidade de penetrar na interface, no pequeno espaço de tempo disponível, com a resistência ao cisalhamento menor que a resistência do material da interface (POSTINIKOV, 1967).

Dependendo do material da peça, a ação lubrificante se torna mais importante do que a ação refrigerante, como é o caso do material utilizado neste trabalho, onde a temperatura durante o processo é importante para diminuir sua resistência ao cisalhamento.

O presente trabalho apresenta um capítulo a parte sobre fluido de corte onde serão informados mais detalhes sobre este importante parâmetro para usinagem de materiais endurecidos.

2.3.2 Método de Medição das Forças de Usinagem

De acordo com Ferraresi (2003), podem-se medir as forças de corte de forma direta ou indireta. Na forma direta a medição da força de usinagem é baseada na piezeletricidade, no magneto-estricção ou no magneto-elasticidade.

Na forma indireta, avaliam-se as deformações ou o deslocamento de molas, utilizando meios mecânicos, elétricos, pneumáticos e hidráulicos.

A evolução da forma direta conduziu aos atuais dinamômetros piezelétricos, com resolução, sensibilidade e faixa de operações adequadas às aplicações.

Além do dinamômetro, o sinal fornecido pelo mesmo é recebido por um amplificador de sinais desenvolvido especificamente para as medições de força. O sinal de medição é convertido em uma tensão elétrica em cada canal. O valor medido é exatamente proporcional a atuação da força.

2.3.3 Potência de Usinagem

As componentes da potência de usinagem resultam dos produtos das componentes da força e velocidade.

A Potência de Corte (N_c), dada em cv (cavalo vapor), é representada pela Equação 2 (MACHADO *et al.*, 2011):

$$N_c = \frac{F_c * V_c}{60 * 75} \quad [2]$$

Onde F_c é a força de corte em Kgf e V_c é a velocidade de corte em m/min.

A Potência de Avanço (N_f), também em cv, é representada pela Equação 3 (MACHADO *et al.*, 2011):

$$N_f = \frac{F_f * V_f}{1000 * 60 * 75} \quad [3]$$

Onde F_f é a força de avanço em Kgf e V_f é a velocidade de avanço dada em mm/min.

A Potência Efetiva de Corte (N_e) é representada pela Equação 4 (MACHADO *et al.*, 2011):

$$N_e = N_c + N_f \quad [4]$$

A potência consumida na operação de usinagem é medida diretamente no motor elétrico da máquina operatriz.

Nas máquinas ferramentas que apresentam um único motor para acionar o movimento de corte e o movimento de avanço, a potência fornecida pelo motor vale:

$$N_m = \frac{N_e}{\eta} \quad [5]$$

Onde η é o rendimento da máquina-ferramenta, que vale geralmente de 60% a 80%.

No caso de haver um motor para acionar cada movimento, isto é, um motor para acionar o movimento de corte e outro para acionar o movimento de avanço, o cálculo de N_m é separado, e o rendimento é geralmente o maior.

2.4 Materiais para Ferramentas de Corte

É regra no processo de usinagem utilizar como ferramenta um material mais duro que a peça. Baseado no princípio de dureza relativa, o surgimento de novos materiais com excelentes propriedades de resistência mecânica e elevada dureza contribui para o aparecimento de novos materiais de ferramentas mais resistentes para as operações de usinagem (MACHADO *et al.*, 2011).

Porém, a usinagem de materiais frágeis ou operações de cortes interrompidos (fresamento, por exemplo), necessitam de materiais de ferramentas com maior tenacidade para suportar os choques mecânicos e os impactos inerentes destas operações.

Nota-se que dureza e tenacidade são propriedades opostas (normalmente alta dureza significa baixa tenacidade e vice-versa), portanto o equilíbrio destas propriedades nos materiais de ferramenta de corte se tornou um desafio para os fabricantes. Estudos e investimentos na pesquisa mostram-se eficientes, pois hoje se pode encontrar no mercado grande número de ferramentas com boas características simultâneas de dureza e tenacidade. Outras propriedades observadas como composição química, tratamento térmico, tamanho dos grãos, controle do processo de fabricação, entre outros, confere grau de pureza e qualidade excepcionais para as ferramentas atuais.

Algumas propriedades podem se destacar, dependendo da aplicação desejada. Os requisitos desejados para uma ferramenta de corte são listados abaixo (MACHADO *et al.*, 2011):

- Resistência à compressão;
- Dureza;
- Resistência à flexão e tenacidade;
- Resistência da aresta;
- Resistência interna de ligação;
- Resistência ao choque térmico;
- Resistência à abrasão;
- Condutividade térmica, calor específico e expansão térmica adequados;

- Ser inerte quimicamente;

Sabe-se que todos os materiais de engenharia têm uma queda de resistência com o aumento da temperatura. A Figura 2.5 mostra o comportamento da dureza dos principais grupos de ferramentas de corte com a temperatura de trabalho. Nota-se que até mesmo o metal duro e as cerâmicas têm suas propriedades reduzidas, mas numa taxa bem menor que os aços-rápidos.

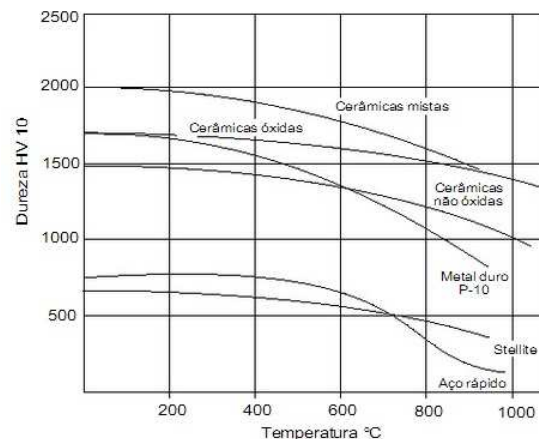


Figura 2.5 Variação da dureza de alguns materiais de ferramentas de corte com a temperatura (MACHADO *et al.*, 2011)

As propriedades de dureza e resistência ao desgaste estão diretamente relacionadas com a capacidade de imprimir altas velocidades aos processos de corte. Nos últimos 100 anos, o aparecimento de novos grupos de ferramentas de corte possibilitou a evolução das velocidades de corte. Ferramentas de cerâmicas e de materiais chamados de ultraduros (materiais com dureza superiores a 3000 HV), surgidos na década de 80, podem apresentar velocidades superiores a 2000 m/min, como mostra a Figura 2.6 (MACHADO *et al.*, 2011). Se fosse possível determinar o material de ferramenta ideal ele deveria conter a dureza do diamante natural, a tenacidade do aço-rápido e a inércia química da alumina. Deve-se considerar também que nem sempre o melhor material é aquele que garante uma maior vida à ferramenta de corte. Às vezes, confiabilidade e previsibilidade do desempenho são mais importantes, principalmente se comparados com o custo do material da peça. A Tabela 2.2 mostra alguns dados quantitativos das principais propriedades das ferramentas de corte.

2.4.1 Materiais de Ferramentas Ultraduros

Ultraduros são materiais com dureza superior a 3000 HV. Como ferramentas de corte os ultraduros são (MACHADO *et al.*, 2011):

- Diamante natural;
- Diamante sintético monocristalino;
- Diamante sintético policristalino (PCD-Polycrystalline Diamond);
- Nitreto cúbico de boro sintético monocristalino (CBN);
- Nitreto cúbico de boro sintético policristalino (PCBN);

O diamante natural foi muito usado como ferramenta de corte, pois se trata do material de maior dureza e resistência encontrado na natureza. Além disso, ele possui excelente condutividade térmica. São utilizados principalmente quando requer super acabamentos nos componentes usinados. No entanto, sua fragilidade e risco de falha sob impacto e seu alto custo, limita sua aplicação como ferramenta de corte, principalmente após o surgimento dos diamantes sintéticos, que podem substituí-lo com muita eficiência.

Os diamantes sintéticos são produzidos desde os anos 50, mas apenas a partir da década de 70 que entraram no mercado como ferramentas de corte. O diamante sintético é obtido sujeitando o carbono, na forma de grafite a temperaturas e pressões extremamente elevadas. Como grafite, os átomos de carbono estão arrançados na forma hexagonal, após o tratamento térmico ele se transforma em diamante, possuindo a estrutura cúbica de face centrada (CFC). A Figura 2.7 ilustra a transformação do grafite em diamante sintético. A transformação é muito difícil, pois envolve pressões da ordem de 7 GPa e temperaturas da ordem de 2000 °C (HEATH, 1986).

Pouco tempo após se obter o diamante sintético, o HBN (Nitreto Hexagonal de Boro) também foi transformado em CBN (Nitreto Cúbico de Boro). Como o grafite, o HBN é frágil e o CBN é duro e resistente ao desgaste em menor escala que o diamante, porém superior às cerâmicas. Durante as reações as temperaturas e as pressões podem atingir valores aproximadamente de 1500 °C e 6 GPa, respectivamente. A Figura 2.8 ilustra a transformação do HBN em CBN (HEATH, 1986).

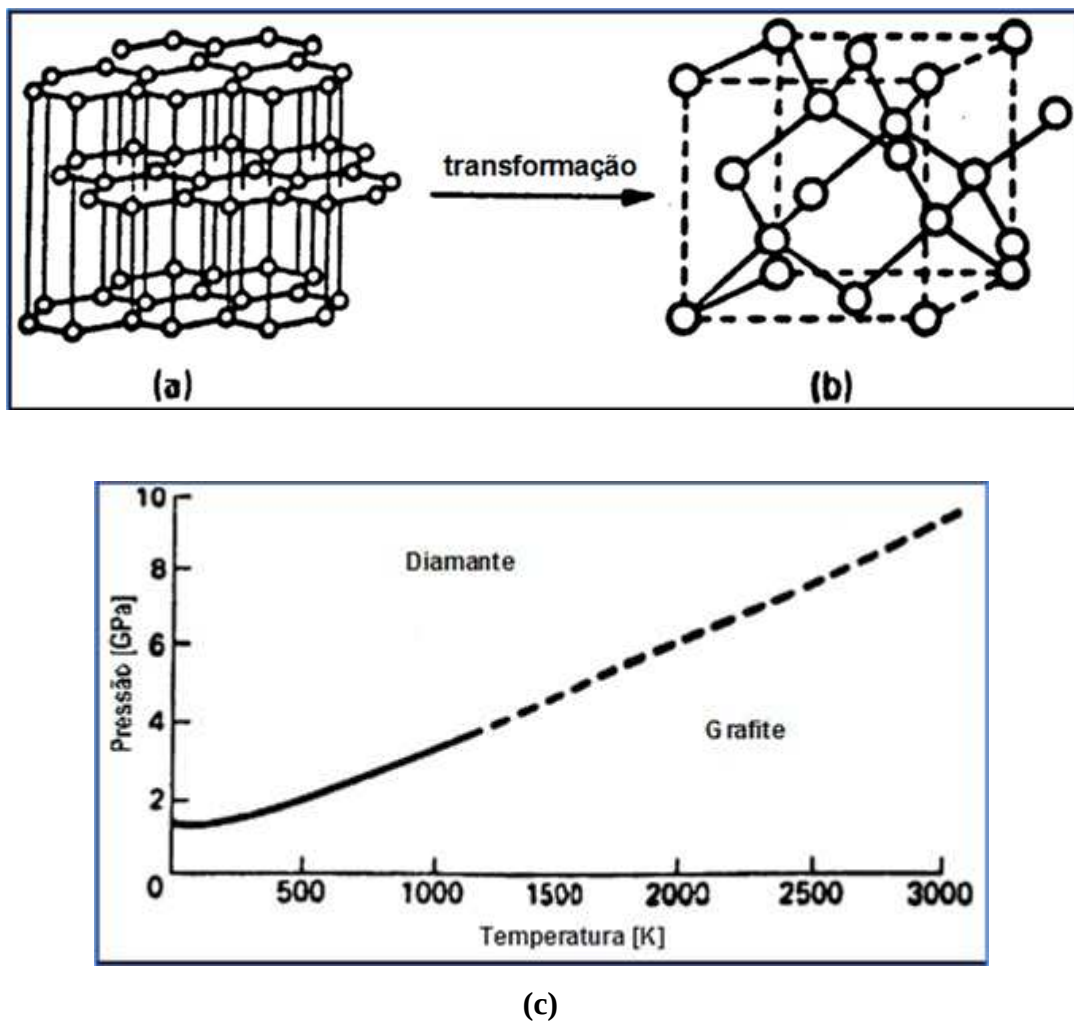


Figura 2.7 Estrutura a)- hexagonal compacta se transforma em b) – cúbica de face centrada; c) diagrama de equilíbrio diamante/grafite (adaptado de HEATH, 1986)

O diamante sintético não pode ser utilizado na usinagem de qualquer aço ou qualquer outro material ferroso, pois ele se desintegra quimicamente quando ultrapassa temperaturas da ordem de 700 °C. Porém, em ligas como de alumínio, cobre puro, entre outros, tem se mostrado eficiente, afinal é o material mais duro encontrado na natureza utilizado como ferramenta de corte.

A Tabela 2.3 mostra algumas propriedades comparativas entre os materiais ultraduros utilizados como ferramentas.

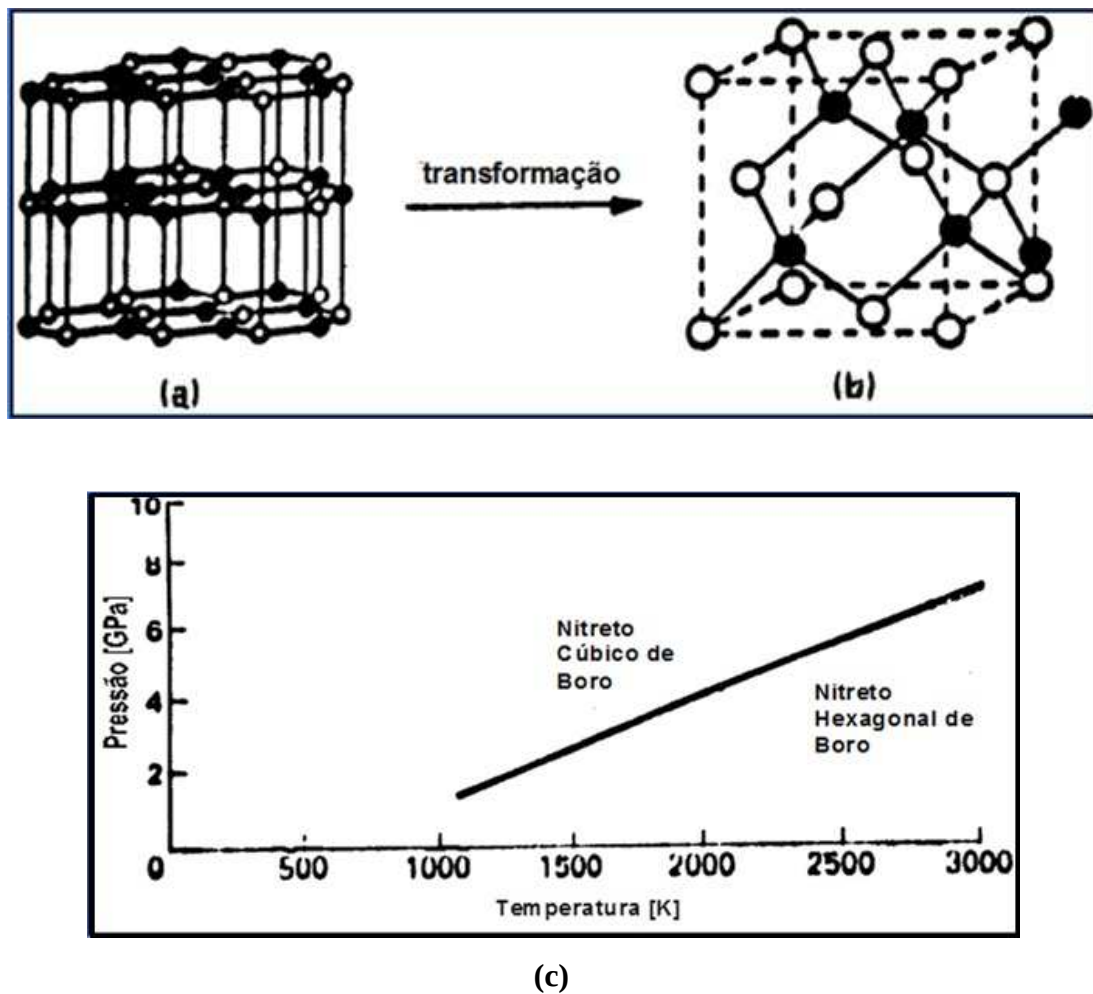


Figura 2.8 Estrutura cristalina do a)- HBN e do b)- CBN; c)- diagrama de equilíbrio HBN/CBN (adaptado HEATH, 1986)

Ao contrário, o CBN é excelente na usinagem dos aços, ligas de níquel, ligas de titânio e ferros fundidos. É termicamente mais estável até temperaturas da ordem de 1200°C, e possui resistência ao ataque químico maior que o diamante, atuando na usinagem dos ferrosos sem maiores problemas (HEATH, 1986).

O que implica ainda na utilização dos ultraduros é seu alto custo de fabricação. Cada pastilha pode custar em torno de 80 vezes o preço de uma pastilha de metal duro e cerca de 15 a 20 vezes o preço da cerâmica, por exemplo (MACHADO *et al.*, 2011). Com o maior domínio da técnica de obtenção este custo pode baixar, tornando este grupo de materiais ainda mais competitivo.

Tabela 2.3 Principais propriedades dos ultraduros (adaptado de BROOKES, 1986)

<i>Propriedade dos Ultraduros</i>						
<i>Propriedade</i>	<i>Material de Inserto</i>					
	<i>94WC 5Co metal duro</i>	<i>Alumina cerâmica</i>	<i>Alumina TiC cerâmica</i>	<i>Nitreto de silício cerâmica</i>	<i>Diamante policristalino</i>	<i>PCBN sólido</i>
<i>Densidade, g/cm³</i>	14,7	3,9	4,3	3,2	3,4	3,1
<i>Resist. à compressão</i>	4,5	4,0	4,5	3,5	4,7	3,8
<i>Dureza Knoop HK, kN/mm²</i>	13	16	17	13	50	28
<i>Modulo de Young, kN/mm²</i>	620	380	370	300	925	680
<i>Modulo de Rigidez, kN/mm²</i>	250	150	160	120	430	280
<i>Raio de Poisson</i>	0,22	0,24	0,22	0,28	0,09	0,22
<i>coef. de exp. térmica, 10⁴/K</i>	5,0	8,5	7,8	3,2	3,8	4,9
<i>condutividade térmica, W.m/K</i>	100	23	17	22	120	100
<i>tenacidade à fratura K_{IC}, M.N/m^{3/2}</i>	11	2,3	3,3	5,0	6,9	10

2.4.2 PCBN – Nitreto Cúbico de Boro Policristalino

Os policristalinos de diamante e de CBN (PCD e PCBN, respectivamente) são obtidos pela metalurgia do pó, usando monocristais de diamante e CBN, respectivamente. Durante o tratamento térmico, toda a massa do produto deve estar contida dentro da fase cúbica do respectivo diagrama de equilíbrio para evitar a reversão da fase cúbica em hexagonal. A variedade nas propriedades finais dos produtos depende do tamanho do grão dos monocristais, solvente/catalisador empregado, grau de sinterização, etc., portanto é possível desenvolver produtos para aplicações específicas (HEATH, 1986).

O campo de aplicação dos policristalinos é bem maior do que a dos monocristais devido a tenacidade do primeiro ser maior, apesar da maior dureza e resistência ao desgaste dos monocristais.

A usinagem de materiais ferrosos na condição endurecida pode substituir a retificação, obtendo uma economia nos gastos e um aumento na produtividade dependendo dos parâmetros desejados. PCBN e cerâmicas são ferramentas amplamente utilizadas na indústria para a usinagem de diversos materiais endurecidos, como: liga de aços, ferro fundido branco, liga de ferro fundido, aços tratados termicamente, etc. Os valores de dureza considerados para este tipo de materiais ficam em torno de 50-70 HRC (POULACHON *et al.*, 2001).

Vários estudos têm sido realizados para investigar o desempenho do PCBN e de ferramentas de cerâmica na usinagem de aços endurecidos, especialmente para prever os efeitos da dureza sobre a taxa de desgaste das ferramentas. Além disso, estudos apontam que a temperatura de corte aumenta com o valor da dureza da peça usinada até 50 HRC. Quando a dureza da peça excede esse valor, a temperatura de corte tende a diminuir com o aumento na dureza. A explicação desses fenômenos se dá através da alteração dos mecanismos de corte. A possibilidade de difusão nas ferramentas de CBN é relativamente baixa, uma vez que a temperatura de corte não é suficientemente alta e os grãos de CBN são quimicamente estáveis para o ferro (POULACHON *et al.*, 2001).

Entre as propriedades do CBN, algumas são vantajosas em relação à utilização em ferramentas de usinagem, sendo elas (CAMARGO, 2011):

- Dureza: possui altíssima dureza, superada apenas pelo diamante, tendo quase duas vezes a dureza da alumina;
- Tenacidade: similar a do material cerâmico, baseado em nitretos, cerca de duas vezes a da alumina;
- Estabilidade termoquímica: o CBN é quimicamente mais estável do que o diamante, podendo usinar ligas ferrosas sem grande desgaste por difusão. O CBN é estável até 1200 °C;

As ferramentas de PCBN utilizadas para operações de desbaste possuem alta concentração de CBN, característica que aumenta a ligação cristal com cristal e sua tenacidade. São muito eficientes quando o mecanismo de desgaste é a abrasão e/ou onde estão presentes forças de corte muito altas ou corte interrompido. Nas operações de acabamento os cavacos produzidos são menores dos que os produzidos nas operações de desbaste devido aos menores avanços e menores profundidades de corte. A massa de

cavaco produzida não é suficiente para dissipar todo o calor gerado pela usinagem. Por isso, a ferramenta atinge altas temperaturas fazendo com que as propriedades como estabilidade térmica e química (impede a difusão que é uma reação química diretamente ligada a altas temperaturas) sejam imprescindíveis. Embora menores a tenacidade e a dureza ainda são suficientes para manter a integridade da aresta de corte.

Deve-se lembrar que a seleção de uma ferramenta ideal depende de inúmeros fatores, tais como, material da peça, parâmetros de corte, tamanho do lote, processo de usinagem, rigidez da máquina-ferramenta etc. De nada adianta selecionar pastilhas de PCBN ou PCD e as utilizar em uma máquina-ferramenta com grandes folgas e vibrações. A ponderação de todos os fatores e a relação custo/benefício jamais pode ser esquecida.

2.5 Desgastes das Ferramentas de Corte

Durante a usinagem dos metais, a ação do corte altera a forma e, portanto, a geometria original da ferramenta de corte, pois se verificam desgastes progressivos no flanco (incidência) e na face (saída) da ferramenta. A Figura 2.9 esquematiza os tipos de desgaste presentes na ferramenta, de modo que a Figura 2.10 mostra uma padronização típica de parâmetro de desgastes de ferramentas de metal de corte. Observa-se que, o desgaste de cratera na face, a marca de desgaste no flanco e o entalhe são os desgastes típicos.

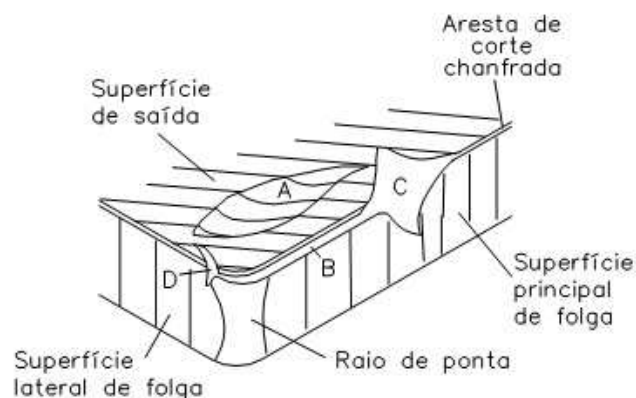


Figura 2.9 Tipos de desgastes na ferramenta de corte: (A) Desgaste de cratera; (B) Desgaste de flanco; (C) e (D) Desgaste de entalhe (MACHADO *et al.*, 2011)

- *Desgaste de entalhe*: não é tão fácil explicar este tipo de desgaste. Dependendo dos parâmetros de corte e das condições de operação pode-se formar um entalhe na aresta secundária ou na primária, nas extremidades livres do cavaco, levando ao enfraquecimento da aresta.

Estes desgastes afetam diretamente a usinabilidade e qualidade final da matéria-prima usinada. Antes que um deles adquira grandes proporções e coloque o processo em risco, deve-se providenciar a substituição ou a re-afiação da ferramenta.

2.5.1 Mecanismos de Desgastes das Ferramentas de Corte

Encontra-se na literatura variações na classificação dos mecanismos de desgaste, no entanto, grande parte dos autores considera seis diferentes tipos, descritos a seguir (FERRARESI, 2003). Para a usinagem de aços com alta concentração de carbonetos duros, como no ABNT D6 (VC 131), o mecanismo de desgaste abrasivo é o mais significativo.

A Figura 2.11 ilustra os tipos de mecanismos de desgaste detalhados posteriormente.

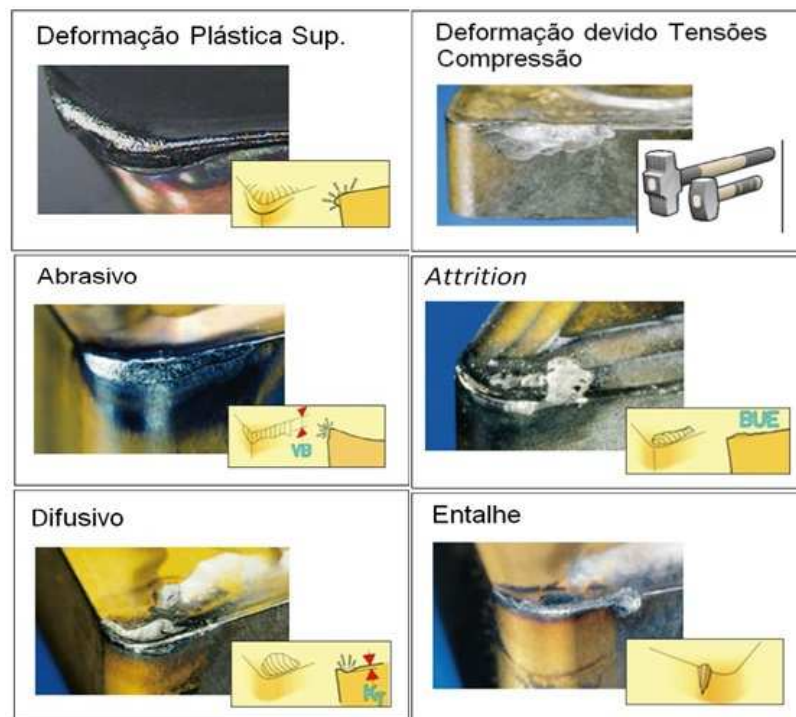


Figura 2.11 Mecanismos de desgaste (SANDVIK COROMANT, 2013)

Segundo Pereira (2009) e Camargo (2011), seguem abaixo os tipos de desgastes:

- *Desgaste devido à deformação plástica superficial por cisalhamento a altas temperaturas:* ocorrem mais provavelmente na usinagem com alto ponto de fusão no ponto de contato entre a ferramenta e a peça (região onde as temperaturas são mais altas). As tensões cisalhantes na interface cavaco-ferramenta nestes casos são suficientemente grandes para causar deformação plástica na superfície de saída da ferramenta de corte. Devido às altas temperaturas ali desenvolvidas, a resistência ao escoamento do material próximo à interface é reduzida. Como consequência, material é cisalhado juntamente com o cavaco e arrancado da superfície da ferramenta, formando-se assim uma cratera.
- *Desgaste devido à deformação plástica da aresta de corte sob altas tensões de compressão:* ocorre principalmente na usinagem dos materiais de alta dureza. A combinação de altas tensões de compressão com elevadas temperaturas na interface pode provocar esta deformação na aresta de corte. Geralmente ocorre a altas velocidades de corte e avanço, inclusão de areia no material e/ou vibrações, levando a falha catastrófica.
- *Desgaste difusivo:* envolve a transferência de átomos de um material para outro e é fortemente dependente da temperatura, do tempo e da solubilidade dos elementos envolvidos (afinidade) na zona de fluxo (zona de cisalhamento secundário). Conceitos como energia de ativação (coeficiente difusivo) e tamanho de átomos são de grande importância para este mecanismo de desgaste uma vez que favorecem ou alteram a difusão.
- *Desgaste por attrition (ou aderência e arrastamento):* este tipo de desgaste ocorre geralmente a baixas velocidades de corte, onde o fluxo de material sobre a superfície é irregular. Nestas condições fragmentos microscópicos (grãos) são arrancados da superfície da ferramenta e arrastados junto com o fluxo de material.
- *Desgaste abrasivo:* é o tipo mais comum de desgaste e oferece uma vida útil da ferramenta previsível e estável. Envolve perda de material por microsulcamento, microcorte ou microlascamento causados por partículas de

elevada dureza relativa. Estas partículas podem estar contidas no material da peça (óxidos, carbonetos, nitretos e carbonitretos), ou são partículas da própria ferramenta que são extraídas, por exemplo, por *attrition*.

- *Desgaste de entalhe*: este desgaste ocorre principalmente na usinagem de materiais resistentes a altas temperaturas e com elevado grau de encruamento. Este mecanismo envolve oxidação, abrasão e transferência de material (difusão e *attrition*).

2.5.2 Parâmetros de Desgaste e Critérios de Fim de Vida da Ferramenta

A vida da ferramenta no torneamento de peças duras deve ser cuidadosamente observada, pois o processo em si é, em geral, um processo de acabamento e possui rugosidades comparáveis com o processo de retificação, ou até melhor em alguns casos (BARTARYA e CHOUDHURY, 2012). Ao longo dos anos, muitos pesquisadores têm contribuído nesta área, verificando os mecanismos de desgaste estabelecendo modelos para a vida da ferramenta para o “Hard Turning”. Aslan *et al.* (2007) por exemplo, ao usinar o material AISI 4340 (63 HRC), utilizando ferramenta de cerâmica mista $Al_2O_3 + TiCN$, descobriu que com o aumento da velocidade de corte, o desgaste da ferramenta decresce. Isto pode ser atribuído à redução na resistência de escoamento do material, devido à elevada temperatura de corte, resultando em forças menores e, conseqüentemente, menor desgaste. Porém, na tentativa de produzir um acabamento superficial tão bom quanto ao da retificação, Davim e Figueira (2007) ao usinar o aço D2 com ferramentas de cerâmicas, constataram que o desgaste da ferramenta é altamente influenciado pela velocidade de corte para um determinado tempo de corte; foi também observado que há um desgaste excessivo para velocidades elevadas deteriorando a superfície da peça. Entretanto, a maioria das pesquisas utiliza ferramentas de CBN e PCBN para usinar este tipo de material.

A NORMA ISO 3685 estabelece os critérios de medição de desgaste de ferramenta.

Vida de ferramenta é o tempo em que a mesma trabalha efetivamente, sem perder o corte ou até que se atinja um critério de fim de vida previamente estabelecido (FERRARESI, 2003).

A vida da ferramenta pode ser influenciada pelos seguintes fatores:

- Aumento no nível de vibração;
- Aumento no nível de ruídos;
- Aumento das forças de usinagem;
- Aumento de rebarbas;
- Piora no acabamento da superfície;
- Comprometimento das tolerâncias dimensionais;
- Elevada temperatura na interface cavaco-ferramenta;
- Receio de quebra;

Assim pode-se expressar a vida da ferramenta através de:

- Volume do material removido;
- Velocidade de corte para uma determinada vida útil ($V_c = 250$ m/min para uma vida útil de 60 min);
- Percurso efetivo de corte (em m, km, etc.);
- Percurso do avanço (em mm);
- Número de peças produzidas;

Convencionou-se medir os desgastes no plano ortogonal da ferramenta. Na superfície de saída têm-se os desgastes: profundidade de cratera (KT), largura da cratera (KB) e distância do centro da cratera a aresta de corte (KM). Na superfície de folga mede-se a largura do desgaste de flanco (VB_B), que é um valor médio do desgaste na superfície de folga e a largura máxima do desgaste de flanco (VB_{Bmax}). A Figura 2.12 mostra o comportamento do desgaste de V_B e KT em relação à velocidade de corte. Mede-se ainda o valor dos desgastes gerados na superfície de folga pelos entalhes (VB_N e VB_C).

CrITÉRIOS de fim de vida de ferramentas de aço-rápido, metal duro e cerâmica, sugeridos pela Norma ISO 3685:

- Desgaste médio de flanco $VB_B = 0,3$ mm;
- Desgaste de flanco máximo $VB_{Bmax} = 0,6$ mm;
- Profundidade de cratera $KT = 0,06 + 0,3f$; onde f é o avanço em mm/rev;

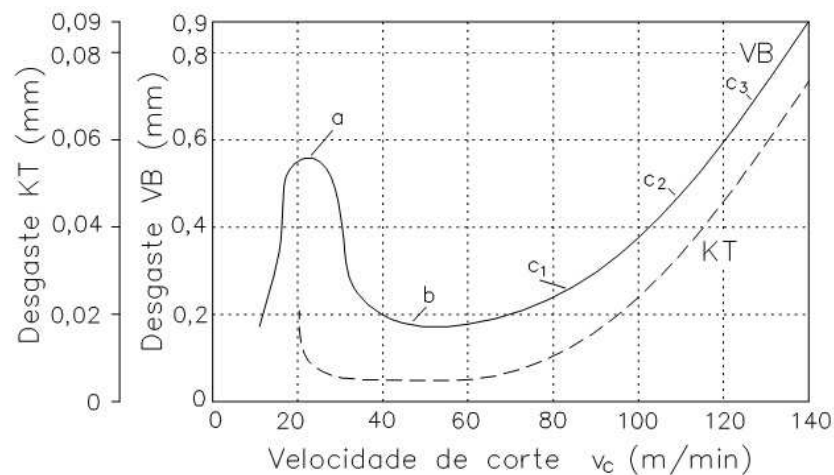


Figura 2.12 Desgaste VB e KT de uma ferramenta de metal duro em função da velocidade de corte, para o aço ABNT 1060 (FERRARESI, 2003)

2.6 Fluidos de Corte

2.6.1 História do Uso de Fluido de Corte

Em 1894, F. W. Taylor foi o primeiro pesquisador que constatou e mediu a influência de um fluido de corte durante o processo de usinagem. Ele aplicou quantidades de água na zona de corte, com a finalidade de diminuir a temperatura na região cavaco-ferramenta, conseguindo um aumento de 33% na velocidade de corte sem obter prejuízo na vida da ferramenta (FERRARESI, 1981).

Observa-se que o intuito primário com o fluido de corte foi de diminuir a temperatura, ou seja, sua ação inicial foi como refrigerante, pois a temperatura na usinagem sempre foi considerado um problema sério para o desgaste e vida da ferramenta. Ferraresi (1981) propôs uma excelente fundamentação da diminuição da temperatura com o uso de fluido de corte. Ele destacou especialmente a ação refrigerante e lubrificante nas zonas de cisalhamento e de contato em um processo de corte.

Sua ação lubrificante pode também diminuir a temperatura, uma vez que a lubrificação diminuirá o coeficiente de atrito (μ) na zona de cisalhamento secundário e na zona de contato da peça e a superfície de folga.

Na zona de cisalhamento primário a redução acontece pelo seguinte: a diminuição do coeficiente de atrito (μ), entre a ferramenta e o cavaco, implica em um ângulo de cisalhamento (Φ) maior, conseqüentemente ocorre um decréscimo da energia de

deformação por cisalhamento, gerando assim menor quantia de calor nesta região. O aumento do ângulo de cisalhamento (Φ) provoca também uma maior velocidade de saída do cavaco (V_{cav}).

Porém, mesmo o cavaco sendo uma fonte móvel de calor e grande parte do “calor gerado” é dissipado pelo cavaco, sua temperatura praticamente não terá influencia na temperatura da ferramenta, pois o tempo com que uma pequena porção do cavaco passa sobre a superfície de saída da ferramenta é muito curto para conduzir calor (TRENT, 2000). O controle de temperatura destas regiões identificadas permite o aumento das condições de corte.

Aumentar o valor de parâmetros como avanço, profundidade e principalmente velocidade de corte, sempre foram almejados em virtude de uma maior produção de peças. Nos dias atuais isto é possível, devido ao crescente uso de materiais de usinabilidade melhorada e, principalmente, pelo desenvolvimento de materiais, revestimentos e geometrias das ferramentas de corte (MIRANDA *et al.*, 2001; MACHADO *et al.*, 2011). Em contrapartida, a capacidade de usinar em condições mais severas gera altas temperaturas na região de corte, prejudicando a qualidade do trabalho por varias razões (SUAREZ, 2008):

1. Diminuição da vida útil da ferramenta;
2. Aumento da oxidação da superfície da peça e da ferramenta;
3. Dilatação, erros de medições e deformação da peça;

A Figura 2.13 apresenta os resultados obtidos por Schallbroch e Bethmann (1950) citados por Ferraresi (1981). O gráfico mostra o comportamento da temperatura em diferentes materiais quando usinados em diferentes velocidades de corte.

Na maior parte dos casos, é benéfico à redução das altas temperaturas na interface cavaco-ferramenta. Caso o calor não seja removido, alguns resultados podem ser negativos como desgaste prematuro e a troca frequente de ferramentas. Já para materiais endurecidos é interessante a temperatura elevada na peça, isso porque o calor favorece o cisalhamento do material e garante a formação do cavaco. Nestes casos, a aplicação do fluido de corte impediria estes benefícios.

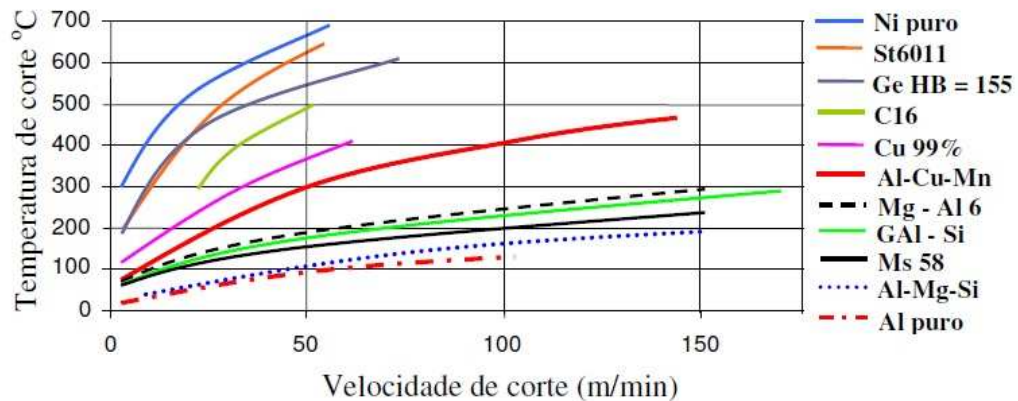


Figura 2.13 Medida da temperatura de corte pelo método do termopar ferramenta-peça-cavaco, para diferentes materiais (adaptado de FERRARESI, 1981)

Vale lembrar que independente do material usinado, tendo recebido algum tipo de tratamento térmico ou não, a ferramenta utilizada sempre sofrerá com temperaturas elevadas, sofrendo maior desgaste e diminuindo sua vida. A utilização do fluido de corte nestes casos seria especificamente para a redução deste desgaste e aumentar a vida da ferramenta, conseguindo uma maior produtividade com uma mesma ferramenta, não obtendo gastos excessivos com troca ou re-afiação da mesma, podendo garantir uma maior lucratividade para as empresas. Mas se o emprego do fluido implicar em aumento de desgaste ou avarias, a usinagem sem fluido de corte é recomendada. A usinagem de materiais endurecidos é exemplo clássico desta situação.

Na maioria dos casos, a usinagem de peças endurecidas é realizada sem a aplicação de fluido de corte, porém, alguns métodos estão sendo utilizados e se mostrando benéficos para o processo. Podem reduzir os mecanismos de desgaste abrasivo, adesivo e o desgaste de flanco, que é o maior causador do aumento da temperatura e formação da chamada “camada branca” na superfície usinada (BARTARYA e CHOUDHURY, 2012). A “camada branca” é uma das características a ser observada no torneamento de peças duras e precisa de uma atenção especial. Uma troca de ferramentas pode ser necessária dependendo do nível de tensão residual devido essa camada sobre a peça e/ou pelo deterioramento do acabamento superficial (BARTARYA e CHOUDHURY, 2012). Alguns fatores podem ser considerados para a formação da “camada branca” durante o torneamento de peças duras. Esses fatores podem ser a pressão da taxa de deformação e a taxa de resfriamento. Uma pressão de corte específica terá efeito significativo na temperatura de transformação. Desde que a densidade de austenita for maior que a ferrita,

a pressão irá reduzir a temperatura de transformação de fase. Assim como a alta taxa de deformação provoca a geração calor diminuindo a tensão necessária para esta deformação. “Hard Turning” é competitivo em tantos casos se comparado com a retificação, porém a formação da “camada branca” é prejudicial para a vida da ferramenta. Propriedades da “camada branca” nos dois processos são fundamentalmente diferentes em quatro aspectos, sendo a característica da estrutura na superfície, micro-dureza, microestrutura e composição química (GUO e SAHNI, 2004). Ao tornear a “camada branca” é muito mais tenso que retificar esta mesma camada. A espessura resultante desta camada é muito maior no processo de retificação do que no torneamento. A micro-dureza proveniente nos dois processos pode ser a mesma, mas a dureza atribuída a esta camada pelo processo de retificação pode chegar a 40% maior que no torneamento e, também, no após o torneamento, esta camada fica resistente a corrosão o que não acontece após a retificação (BARTARYA e CHOUDHURY, 2012).

Ranganath *et al.* (2009) analisou a formação da “camada branca” na liga de níquel e mostrou que as superfícies usinadas continham uma camada distorcida de grãos alongados. A relação com o raio da aresta da ferramenta se mostrou o fator mais dominante na determinação da deformação plástica da superfície usinada, formando a “camada branca” e grãos dobrados ao usinar a baixas velocidades.

Schwach *et al.* (2005) utilizaram nitrogênio líquido na forma de “spray” durante o torneamento dos aços AISI 52100 e AISI D2, com ferramentas de CBN e cerâmicas, ao investigar a formação da “camada branca” na superfície da peça. Observou-se que o nitrogênio líquido resultou em retenção da dureza do material da peça e eliminação das tensões no caso da utilização de ferramentas de alumina.

Singh *et al.* (2008) também usinaram o aço AISI 52100 porém utilizando lubrificantes sólidos de grafite e dissulfeto de molibdênio, com ferramentas de cerâmica mista. Esses lubrificantes produziram valores menores de rugosidade se comparados com a condição a seco. Também foi concluído que o dissulfeto de molibdênio teve um melhor desempenho do que o grafite.

Apesar de alguns autores como Bruni *et al.* (2008), afirmarem que a técnica de MQF não apresenta nenhuma vantagem sobre a condição a seco, o presente trabalho mostrará que em determinadas condições de corte o MQF se mostrou mais eficiente quanto ao desgaste da ferramenta e a rugosidade quando comparado com a condição a seco. Outros autores como Varadarajan *et al.* (2002) e Kumar e Ramamoorthy (2007) mostram que a

mínima lubrificação com aditivos a alta pressão podem reduzir as forças de usinagem, promovendo transferência de calor e redução da temperatura de corte com uma melhora no acabamento da superfície da peça.

2.6.2 Funções dos Fluidos de Corte

O propósito para o fluido de corte ser incorporado nos processos de usinagem é melhorar as características tribológicas inerentes ao mesmo, as quais estão presentes entre a superfície de contato da ferramenta com o cavaco e com a peça (SOKOVIC, 2001). De forma geral, usa-se fluido de corte a fim de obter um custo menor por partes usinadas, ou um aumento na taxa de produção. Isto pode ser conseguido pelos seguintes benefícios que o fluido de corte pode proporcionar (MACHADO *et al.*, 2011):

1. Redução das forças de corte devido à lubrificação, consequentemente, redução da potência;
2. Aumento da vida da ferramenta pela lubrificação e resfriamento;
3. Fácil remoção do cavaco da zona de corte;
4. Melhora no acabamento superficial da peça
5. Menos distorção da peça pela ação refrigerante (controle dimensional da peça);

Sendo assim, pode-se dizer que as principais funções dos fluidos de corte são:

- *Lubrificação*: geralmente a baixas velocidades de corte;
- *Resfriamento*: geralmente a altas velocidades de corte;

Para baixas velocidades, o resfriamento não tem tanta importância, o mais interessante é diminuir o atrito entre a superfície da peça e a ferramenta, ajudando também a diminuir a faixa de surgimento da APC (Aresta Postiça de Corte). Já para altas velocidades, a penetração do fluido na interface entre cavaco-ferramenta não é muito favorável, dificultando-o de exercer seu papel lubrificante. Nestas condições, o resfriamento passa a ter uma importância maior (MACHADO *et al.*, 2011).

O importante é compreender bem cada função do fluido. Como lubrificante, uma vez na interface, deve formar um filme com resistência ao cisalhamento menor que a

resistência do metal, independente do método como ele atinge esta penetração. Alguns autores, como Trent (2000) acreditam que o fluido não tem acesso à zona de aderência. Childs e Rowe (1973) afirmam que as atenções devem ser voltadas para a zona de escorregamento. Postnikov (1967) sugere que o lubrificante penetra contra o fluxo do metal, chegando à ponta da ferramenta, por ação capilar, assumindo que o contato na interface não é completo. Horne *et al.* (1978), utilizando ferramentas transparentes de safira em seus ensaios, demonstraram que o fluido de corte ganha acesso à interface pelos lados, ao invés de se movimentar contra o fluxo de saída do cavaco. Apesar dos métodos serem diversos, a eficiência da lubrificação dependerá das propriedades do fluido, como características de molhabilidade, viscosidade, oleosidade, etc. Estas propriedades podem ser conseguidas com uma mistura adequada de aditivos.

2.6.3 Aditivos dos Fluidos de Corte

Certas propriedades especiais são conferidas aos fluidos de corte por meio de aditivos, que são produtos químicos ou orgânicos. Os aditivos mais usados são (SUAREZ, 2008):

- *Antiespumantes*: evitam a formação de espumas que poderiam impedir a boa visão da região de corte e comprometer o efeito de resfriamento do fluido;
- *Anticorrosivos*: protegem a peça, a ferramenta e a máquina-ferramenta da corrosão (são produtos à base de nitrito de sódio);
- *Antioxidantes*: têm a função de impedir que o óleo se deteriore quando em contato com o oxigênio no ar;
- *Detergentes*: reduzem a deposição de lodo, lamas e borras (composto de magnésio, bário, cálcio, etc);
- *Emulgadores*: são responsáveis pela formação de emulsões de óleo na água;
- *Biocidas*: substâncias ou misturas químicas que inibem o crescimento de microorganismos;
- *Agentes EP (extrema pressão)*: para operações mais severas de corte, eles conferem aos fluidos de corte uma lubricidade melhorada para suportarem elevadas temperaturas e pressões de corte, reduzindo o contato da ferramenta

com o material. Os principais agentes EP são à base de enxofre, cloro e fósforo.

2.6.4 Direções e Métodos de Aplicação dos Fluidos de Corte

O presente trabalho tem como objetivo mostrar a influência da direção de aplicação do fluido de corte juntamente com o método que o mesmo será aplicado. Preocupações como questão ambiental, gases tóxicos, saúde do operador, entre outros fatores, são levados em consideração para uma melhor usinabilidade quando a aplicado fluido de corte na operação de torneamento (KHAN *et al.*, 2009).

Existem quatro direções de aplicação dos fluidos de corte, como mostra a Figura 2.14.

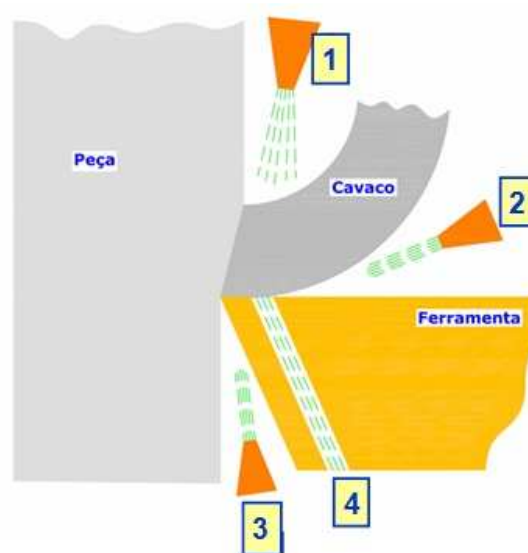


Figura 2.14 Direções de aplicação do fluido de corte: 1 – Sobre-cabeça; 2 – Superfície de Saída; 3 – Superfície de folga; 4 – Interior da ferramenta
(adaptado de DA SILVA, 2006)

Além da direção de aplicação, pode mudar também os métodos de aplicar o fluido. Basicamente existem três métodos de aplicação:

1. Jorro de fluido a baixa pressão (torneira a pressão normal);
2. Pulverização;
3. Sistema de alta pressão;

Pela sua simplicidade, o primeiro sistema é o mais utilizado. O segundo método oferece vantagens sobre o primeiro, devido o seu maior poder de penetração, velocidade e economia. O terceiro método é mais engenhoso, porém bons resultados foram obtidos com seu emprego.

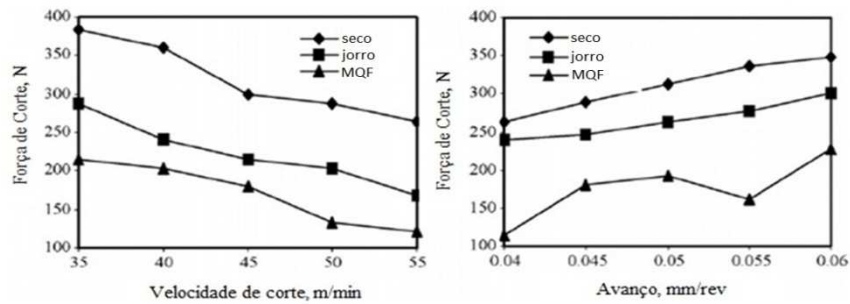
Machado (1990) desenvolveu vários experimentos analisando a influência das altas pressões na injeção do fluido de corte (14,5 MPa) direcionado à superfície de saída da ferramenta de metal duro da classe K10 no torneamento do Ti6Al4V e do Inconel 901, obtendo maiores tempos de vida da ferramenta para a liga de titânio, quando comparados com a aplicação em baixa pressão. Neste caso, a alta pressão do fluido de corte aumentou o poder refrigerante e reduziu a difusão, responsável pelo desgaste de flanco da ferramenta. Para a usinagem do Inconel 901 os resultados não foram os mesmos. Nesta aplicação o fluido a alta pressão acelerou o desgaste de entalhe que predominava, reduzindo a vida da ferramenta.

Uma tentativa de diminuir custos e atender as normas ambientais tem-se observado uma necessidade de reduzir o consumo de fluido de corte e, portanto, a técnica de baixos volumes de fluidos tem sido mais investigada. Esta técnica denominada MQF (*Minimum Quantity of Fluid*) também chamada por alguns autores de MQL (*Minimum Quantity of Lubricant*), tem sido objetivo de muitas pesquisas.

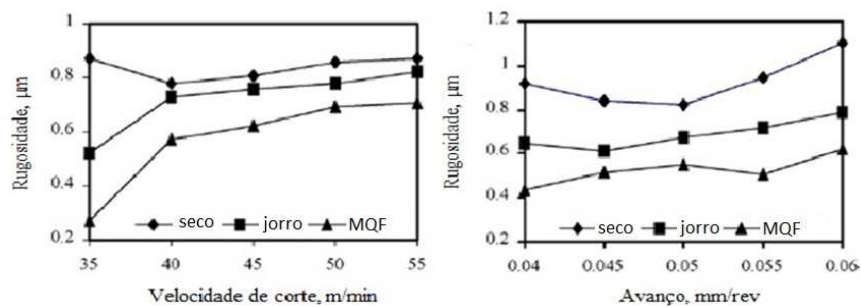
Nesta técnica o fluido é aplicado em volumes muito baixos, chegando a 2 ml/h (VARADARAJAN *et al.*, 2002). Normalmente, são aplicados juntamente com um fluxo de ar (método da pulverização), e direcionados contra a saída do cavaco ou entre a superfície de folga da ferramenta e a peça.

Estudos realizados por Kumar e Ramamoorthy (2007) na usinagem de materiais endurecidos com MQF mostraram que ao usinar o aço AISI 4340 (35 HRC), utilizando ferramenta de metal duro classe P30 revestida com TiCN, aplicando fluido de corte com o ar comprimido a uma pressão de 10 MPa e uma vazão do fluido de 8 ml/min, variando velocidade de corte e avanço, as forças de corte, a temperatura e a rugosidade superficial apresentaram resultados melhores, se comparados com o mesmo processo usinado à seco e com fluido de corte aplicado sobre cabeça, pelo método convencional, como pode ser visto na Figura 2.15.

a)



b)



c)

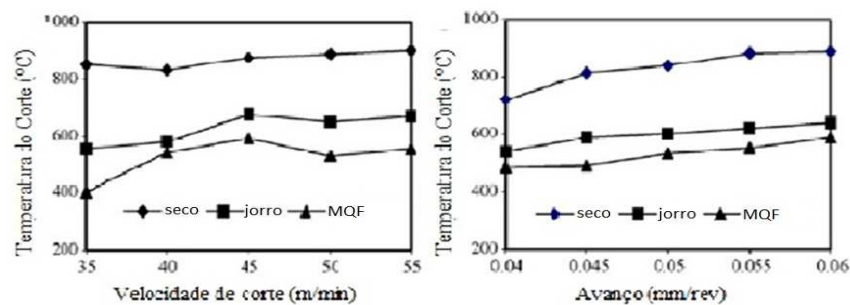


Figura 2.15 Variação da a) Força de Corte, b) Rugosidade e c) Temperatura; em relação à velocidade de corte e avanço (KUMAR; RAMAMMORTHY, 2007)

Liu *et al.* (2013) ao usinar ligas de titânio com ferramentas de carboneto de tungstênio revestidas com nanocompósitos de (nc-AlTiN)/(a-Si₃N₄) e (nc-AlCrN)/(a-Si₃N₄), descobriu que a aplicação de MQF, que tem sua função lubrificante e refrigerante, tem uma influência mais significativa para a melhoria da vida da ferramenta do que a condição a seco. Além disso, o revestimento (nc-AlTiN)/(a-Si₃N₄) confirmou-se ser mais adequado para usinar tal liga de titânio sob a condição com MQF, obtendo uma menor taxa de desgaste do que o revestimento (nc-AlCrN)/(a-Si₃N₄), promovendo uma maior vida para a ferramenta. Khan *et al.* (2009) também analisou a aplicação de MQF comparando com a usinagem a seco do aço-liga AISI 9310 utilizando óleo vegetal, com uma vazão de 100 ml/h, pressão de 0,6 MPa, velocidades de corte entre 223-483 m/min,

avanço entre 0,10-0,18 mm/rev, e profundidade de corte fixa em 1,0 mm. O autor descobriu que o MQF obteve um desempenho melhor do que a usinagem a seco pelo fato de reduzir substancialmente a temperatura na zona de corte, favorecendo a formação do cavaco e a interação cavaco-ferramenta. Além disso, o autor afirma que com o método MQF, o ambiente de usinagem é favorecido, mantendo a área de trabalho seca, evitando fumaça, gases tóxicos, vapores e sem poluição do ambiente, melhorando ainda as condições de usinabilidade.

2.6.5 Escolha do Fluido de Corte

A seleção de um fluido de corte ideal é difícil, devido a grande variedade de produtos disponíveis no mercado com alto grau de competitividade. O custo é alto e a utilização de um fluido de corte tem que compensar economicamente, isto é, os benefícios devem superar o custo do produto. Não existe um fluido universal já que a escolha de um fluido com determinada composição depende do material a ser usinado, do tipo de operação e da ferramenta utilizada. Quando o resfriamento for mais importante, os fluidos emulsionáveis e sintéticos são mais indicados. Os óleos minerais e graxos usados juntos ou separados, puros ou com aditivos especiais, são utilizados quando a lubrificação for o fator determinante.

Costa (2004) cita algumas dicas do uso de fluidos de corte, dependendo do material usinado.

- Para algumas ligas é necessário o fluido de corte, que pode ser uma emulsão com mistura de óleo mineral e graxo ou a maioria das emulsões. O uso de fluidos de origem vegetal apresenta boa adesividade do fluido à superfície de saída da ferramenta devido à ionização do mesmo. Na usinagem de alumínio não se requer aditivos EP e o enxofre ataca o metal instantaneamente;
- Os Ferros Fundidos cinzentos são normalmente usinados a seco, porém um óleo emulsionável pode ser útil na furação para ajudar a remover o cavaco, que é do tipo descontínuo;
- O magnésio e suas ligas normalmente são usinados secos e a altíssimas velocidades de corte, entretanto, um refrigerante pode ser usado. Emulsões são

proibidas, pois a água reage com o cavaco para liberar hidrogênio, que apresenta riscos de ignição. O enxofre ataca o metal;

- O cobre e suas ligas geralmente usam óleos emulsionáveis. O enxofre causa descoloração das peças;
- Devido a altas fragilidades das ferramentas cerâmicas, deve-se tomar cuidado ao aplicar um refrigerante, porque os choques térmicos podem causar trincas superficiais ou quebras nas ferramentas.

2.7 Rugosidade e Acabamento Superficial

Integridade superficial é o termo utilizado para denotar as condições e a qualidade de superfícies usinadas, resultado da combinação do processo de deformação plástica, propagação de trincas, reações químicas e forma de energia empregada para a remoção do cavaco (ALMEIDA, 2010).

A rugosidade de uma superfície é composta de irregularidades superficiais que tem origem durante o processo de fabricação. Estas irregularidades estão relacionadas ao processo de formação de cavaco e das deformações ocorridas devido à ação da aresta de corte, como as marcas de avanço, APC (Aresta Postiça de Corte), desgaste da ferramenta etc. De acordo com o espaçamento das irregularidades a textura da superfície usinada pode ser dividida em três classes (MILAN, 1999):

1. *Irregularidades de forma* – apresentam maior espaço entre si e são perceptíveis ao longo da superfície da peça;
2. *Ondulações* – são espaçamentos menores e surgem na superfície da peça devido a vibrações, deflexão da peça ou a outros fatores externos;
3. *Rugosidade* – apresenta pequenos espaços entre as irregularidades. A rugosidade é inerente ao processo de produção, deixado pelo atual agente da usinagem (marcas de avanço);
4. *Falhas* – são interrupções na topografia típica da superfície de um componente, sendo inesperadas e indesejáveis, causadas por efeitos tais como trincas, bolhas, inclusões, que podem surgir durante o processo de corte (ALMEIDA, 2010);

Quando se mede a rugosidade, o equipamento mostra o perfil da peça composto da rugosidade, ondulação e erro de forma (Figura 2.16). Através de uma filtragem adequada consegue-se separar os desvios de forma da rugosidade.

Um filtro de rugosidade separa os desvios de forma do perfil de rugosidade. O comprimento de onda do filtro, chamado de “*Cut-off*”, determina o que deve passar e o que não deve. A escolha de um “*Cut-off*” adequado determinará a qualidade da filtragem. Os sinais de baixa frequência caracterizam as ondulações, os de alta a rugosidade.

De fato a rugosidade de uma superfície depende de vários parâmetros, como máquina-ferramenta, propriedades do material da peça, geometria e material da ferramenta e operação de usinagem (MACHADO *et al.*, 2011).

A rugosidade sobrepõe à ondulação, que por sua vez sobrepõe às imperfeições de forma, formando o perfil de textura superficial. A distinção entre a classificação de um perfil de textura é subjetiva e feita qualitativamente.

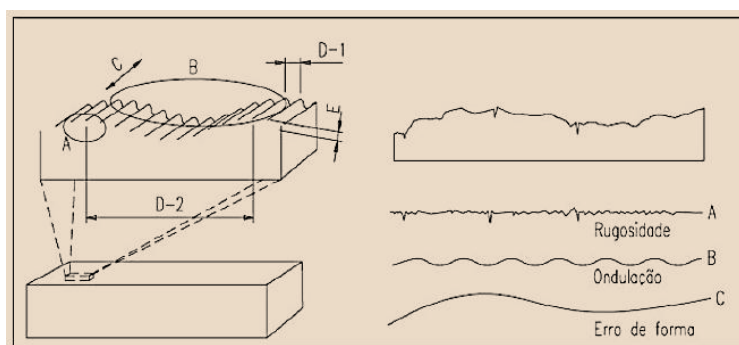


Figura 2.16 Elementos que compõem a superfície usinada (adaptado de CAMARGO, 2011)

A norma ABNT NBR ISO 4287 (2002) define os parâmetros de medição de rugosidade. Esta se dá pelo sistema de apalpamento e o sistema adotado é o chamado *Sistema M*, a qual dimensiona os desvios em relação à forma ideal (linha média). A linha média é definida como sendo a linha disposta paralelamente à direção do perfil, dentro do percurso de medição l_m , de modo que a soma das áreas superiores seja igual a soma das áreas inferiores, como mostra a Figura 2.17 (CAMARGO, 2011).

De acordo também com a norma ABNT NBR 4287 (2002), os parâmetros para avaliação de rugosidade de superfícies podem ser definidos como na Tabela 2.4. O comprimento de amostragem é definido pela Norma ABNT NBR ISO 4287 (2002), como

sendo o comprimento na direção do eixo X usado para identificar as irregularidades características do perfil sob avaliação.

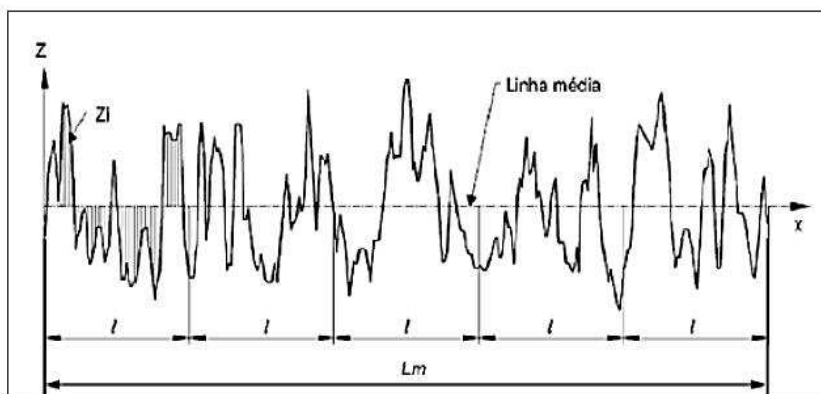


Figura 2.17 Representação da linha média (adaptado de NOVASKI, 2011)

O comprimento de avaliação pode conter um ou mais comprimentos de amostragem é utilizado para estabelecer o perfil a ser avaliado. Utiliza-se normalmente um comprimento de avaliação equivalente a cinco vezes o de amostragem (MOURA, 2012).

Tabela 2.4 Alguns parâmetros de rugosidade (adaptado de MACHADO *et al.*, 2011)

Símbolo	Nome	Definição
R_a	Desvio aritmético médio	Média aritmética dos valores absolutos das ordenadas no comprimento de amostragem.
R_q	Desvio médio quadrático	Raiz quadrada da média dos valores das ordenadas no comprimento de amostragem.
R_y	Altura total do perfil	Soma da maior altura de pico do perfil e da maior profundidade de vale do perfil no comprimento de avaliação.
R_z^*	Altura máxima do perfil	Soma da altura máxima dos picos e a maior das profundidades dos vales no comprimento de amostragem.
R_{sk}	Fator de assimetria do perfil	Quociente entre o valor médio dos valores das ordenadas e R_q ao cubo, no comprimento de amostragem.
R_{ku}	Fator de achatamento do perfil	Quociente entre o valor médio dos valores das ordenadas à quarta potência e o valor de R_q à quarta potência no comprimento de amostragem.

*A Norma DIN define o parâmetro R_z como sendo a media das cinco alturas máximas detectadas em cada comprimento de amostragem.

CAPÍTULO III

METODOLOGIA

Esta seção descreve as etapas e os passos seguidos no desenvolvimento da pesquisa, abrangendo desde a seleção da matéria prima, ferramenta de corte e máquina de torneamento até a execução dos experimentos. Os critérios e técnicas também são descritos. A seguir, a Figura 3.1 apresenta um fluxograma para facilitar a visualização da sequência das atividades e dos experimentos desenvolvidos neste trabalho.



Figura 3.1 Fluxograma representativo da sequência de desenvolvimento dos experimentos

Em um primeiro momento, foi escolhido o material AISI D6 (VC 131) para realização dos experimentos a seco e também com utilização de fluido de corte sendo aplicado na forma de MQF. Na usinagem a seco foram considerados os resultados de desgaste da ferramenta, rugosidade e força.

Ao aplicar o MQF, ficou definido três direções diferentes de aplicação, superfície de folga principal, superfície de folga secundária e sobre-cabeça. A direção da superfície de folga principal teve todos seus resultados comparados com a usinagem a seco, pois a mesma sequência de testes realizados a seco foi reproduzido com o MQF na direção de folga principal, sendo um total de 16 testes mais 16 réplicas para cada condição. Os

demais resultados foram comparados entre si, para melhor determinar a influência da direção de aplicação. Posteriormente, também foi feita a comparação das quatro condições (corte a seco mais MQF nas 3 direções) com relação ao desgaste da ferramenta. Na seção 4 e 4.1 é feita uma melhor discussão destes resultados. Para todos os testes, foram considerados os valores obtidos do desgaste das ferramentas, rugosidade e força.

3.1 Critérios para Seleção da Matéria-prima

Os parâmetros para a seleção da matéria-prima e da ferramenta de corte foram os seguintes:

- Dureza e característica de composição da matéria-prima;
- Tipo de ferramenta e sua geometria (ângulo de saída, raio de ponta, composição química);
- Condições de corte: avanço, profundidade de corte, velocidade de corte;

3.2 Matéria-prima

Materiais com diferentes composições químicas, microestruturas e propriedades devem apresentar comportamentos diferenciados quando submetidos ao processo de usinagem (SANTOS e SALES, 2007). A característica do material é definida como usinabilidade e representa o grau de dificuldade com que um material é usinado. Porém a usinabilidade está relacionada com propriedades e condições do próprio material da peça (estado metalúrgico) e por condições externas (condições de usinagem). Dentre as condições do próprio material pode-se destacar a microestrutura, propriedades mecânicas (dureza, resistência etc.), composição química e propriedades físicas (condutividade térmica e elétrica, densidade etc.). Para as condições externas tem-se: tipo de corte (contínuo ou interrompido), parâmetros de corte (avanço, profundidade de corte, velocidade de corte etc.), geometria da ferramenta, uso de fluido de corte etc. A consideração de todas estas condições ajudará para a escolha da matéria-prima ideal a ser utilizada nesta pesquisa. A Tabela 3.1 mostra algumas informações de aços para trabalho a frio (VILLARES METALS, 2011).

Tabela 3.1 Informações e características dos principais aços para trabalho a frio (VILLARES METALS, 2011)

COMPOSIÇÃO QUÍMICA E CARACTERÍSTICAS DOS PRINCIPAIS AÇOS PARA TRABALHOS A FRIO									
Designação do Produtor	Normas Similares	Composição Química							Dureza Rockwell Recomen- dada (HRC)
		Carbono	Cromo	Manganês	Molibdênio	Silício	Vanádio	Tungstênio	
		C	Cr	Mn	Mo	Si	V	W	
VC131	AISI D6 ABNT D6	2,10%	11,50%				0,15%	0,70%	56 - 62
VS7	AISI S7	0,50%	3,20%	0,70%	3,20%	0,35%	0,07%		52 - 57
VF800AT	sem similar	0,85%	8,00%	0,40%	2,00%	0,90%	0,50%		56 - 62
VD2	AISI D2 ABNT D2	1,50%	12,00%		0,95%	0,30%	0,90%		56 - 60
VND	AISI O1 ABNT O1	0,95%	0,50%	1,25%			0,12%	0,50%	56 - 60
VW3	AISI S1 ABNT S1	0,45%	1,40%		0,20%	1,00%	0,20%	2,00%	54 - 58

O aço utilizado para este trabalho está identificado na tabela. Perceba que sua composição química apresenta apenas cromo, vanádio e tungstênio. Toda a dureza adquirida é garantida pelo tratamento térmico realizado com o aço.

O foco principal do trabalho é testar a condição de aplicação do fluido de corte por MQF na direção entre a superfície de folga da ferramenta e a peça, no torneamento de materiais endurecidos. Assim, o material da peça pode recair em qualquer material que apresente durezas elevadas (após tratamento térmico), acima de 45 HRC. Observe na Tabela 3.1 que o material VC 131 (AISI D6), se comparado aos outros materiais, possui o mais alto percentual de carbono, consequentemente a faixa de dureza Rockwell apresentada por este material é uma das mais elevadas (56-62 HRC). Estas foram as características que justificaram a escolha deste material.

3.3 Ferramenta

Para a escolha da ferramenta de corte, logicamente o principal critério é a dureza, pois em usinagem a regra básica é que a ferramenta, obrigatoriamente, tem que possuir dureza superior à da peça. Além disto, deve-se ter uma ferramenta que não apresente

problemas de choques térmicos, que poderiam impedir a aplicação do fluido de corte, mesmo sendo aplicado pela técnica MQF, caso da maioria das cerâmicas, por exemplo. Portanto, a ferramenta de corte selecionada para a realização dos testes foi uma pastilha de PCBN (Figura 3.2).

Ela é fabricada pela Sandvik Coromant[®], classe S (indicada para usinagem de super ligas) e seu código é SNGA 120412 S0103A 7015.

A faixa de trabalho indicada pelo fabricante para a utilização desta ferramenta é velocidade de corte (V_c) de 150-250 m/min, avanço (f) de 0,05-0,30 mm/rev e profundidade de corte (a_p) de 0,07-1,20 mm.

Mais detalhes sobre a ferramenta utilizada neste trabalho estão apresentados na Tabela 2.2 na seção 2.4 *Materiais para Ferramenta de corte*.

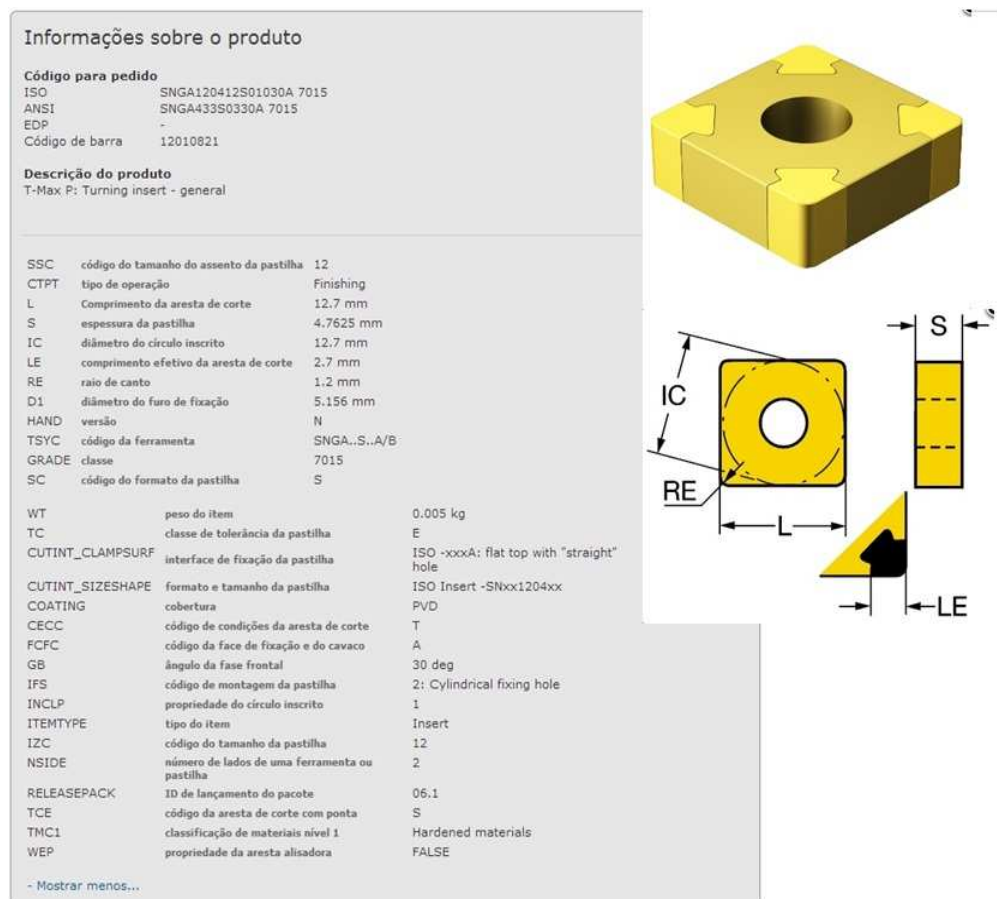


Figura 3.2. Detalhes das dimensões da pastilha SNGA 120412S0103A 7015 (SANDVIK COROMANT, 2013)

A classe CB7015 de CBN com cobertura PVD tem ligante de cerâmica, indicada para torneamento contínuo e cortes levemente interrompidos em aços endurecidos. Trata-se de

uma ferramenta de baixo teor de CBN (50%) e os outros 50% são ligantes cerâmicos $TiNC + Al_2O_3$. O fabricante não ofereceu informações de tamanho do grão, apenas relatou como sendo composta de grãos finos e médios.

Dez ferramentas foram adquiridas para um total de 56 experimentos. Cada ferramenta possui 8 arestas de corte efetivas, sendo respeitado a própria numeração impressa no corpo da ferramenta (identificando cada aresta de corte) e a disposição destas pastilhas em suas caixas de origem, devidamente numeradas, para controle.

3.4 Suporte porta-ferramenta

O suporte utilizado nos experimentos foi o Sandvik Cromant® PSBNR 2525M 12 conforme Figura 3.3. Este suporte é compatível com a pastilha utilizada e atendeu as necessidades experimentais.

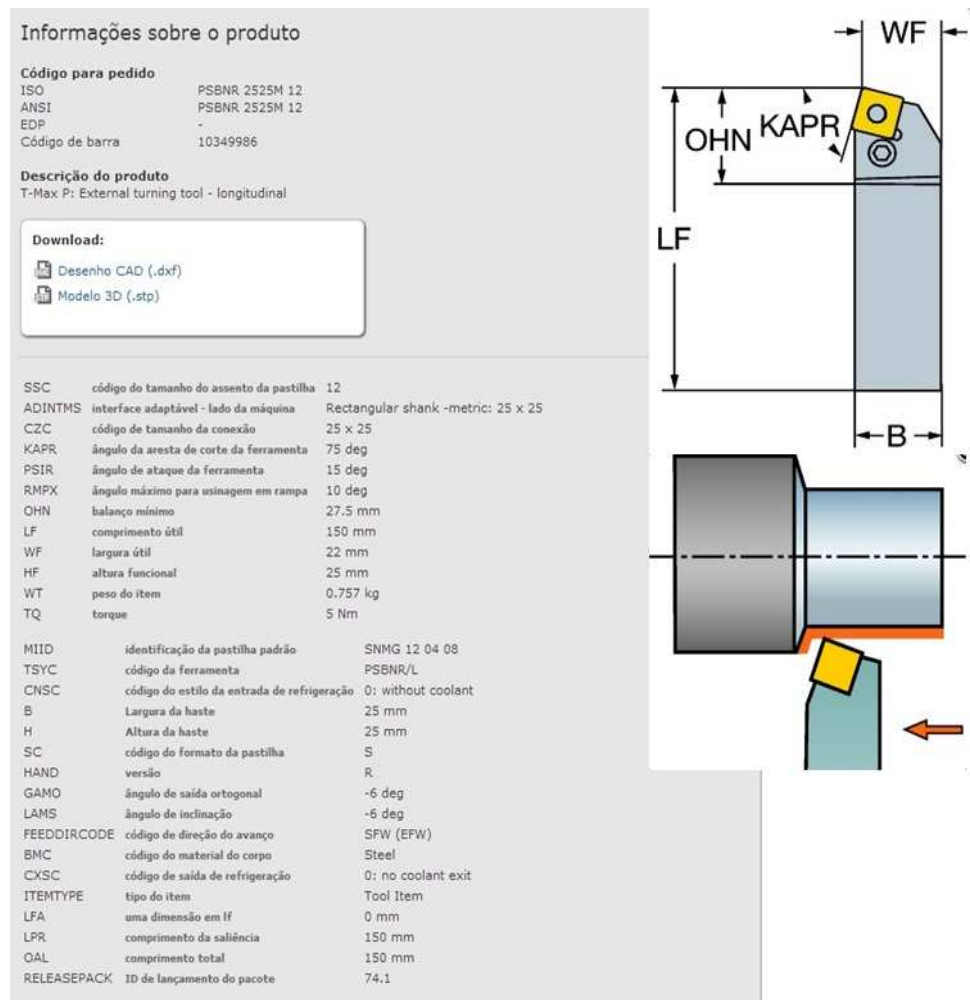


Figura 3.3 Detalhes das dimensões do suporte utilizado para os experimentos (SANDVIK COROMANT, 2013)

3.5 Equipamentos

3.5.1 Máquina-ferramenta

Os testes foram realizados em um Torno CNC Romi[®] linha Multiplic modelo 35D, conforme mostra Figura 3.4. A Figura 3.5 mostra o layout da máquina-ferramenta e suas dimensões.



Figura 3.4. Torno CNC Romi[®] Multiplic modelo 35D (ROMI, 2013)

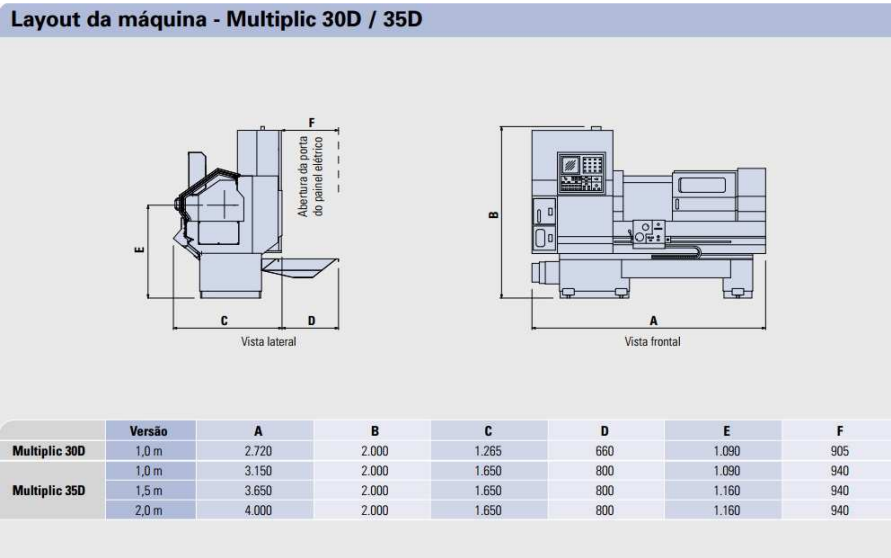


Figura 3.5 Layout da máquina Torno CNC Multiplic modelo 35D (ROMI, 2013)

A Tabela 3.2 mostra algumas especificações técnicas dos tornos CNC linha Multiplic. Em destaque o modelo 35D que foi utilizado nos experimentos.

Tabela 3.2 Especificações técnicas dos tornos universais programáveis CNC linha Multiplic (ROMI, 2013)

Linha Multiplic		Tornos Universais Programáveis						
Especificações técnicas		30D	35D	40	40A	60	60A	60B
Capacidade								
Altura de pontas	mm	215	255	290	350	425	550	650
Distância entre pontas	m	1,0	1,0 / 1,5 / 2,0	1,0 / 2,0 / 3,0	1,0 / 2,0 / 3,0	2,0 / 3,5 / 5,0	2,0 / 3,5 / 5,0	2,0 / 3,5 / 5,0
Diâmetro admissível sobre o barramento	mm	430	520	580	685	850	1.100	1.300
Diâmetro admissível sobre o carro transversal	mm	204	260	306	430	550	700	900
Diâmetro admissível sobre as asas da mesa	mm	400	450	440	540	830	1.040	1.200
Curso transversal do carro (eixo X)	mm	220	280	360	360	475	575	575
Curso longitudinal do carro (eixo Z)	m	1,0	1,0 / 1,5 / 2,0	1,0 / 2,0 / 3,0	1,0 / 2,0 / 3,0	2,0 / 3,5 / 5,0	2,0 / 3,5 / 5,0	2,0 / 3,5 / 5,0
Barramento								
Largura	mm	305	340	380	380	600	600	600
Altura	mm	350	336	400	400	460	460	460
Cabeçote (standard)								
Nariz do eixo-árvore	ASA	A2-5"	A2-6"	A2-8"	A2-8"	A2-11"	A2-15"	A2-15"
Diâmetro do furo do eixo-árvore	mm	53	65	80	104	137	175	175
Faixa de velocidades	rpm	4 a 4.000	3 a 3.000	2 a 2.500	2 a 1.800	7 a 1.200	6 a 1.000	6 a 670
Faixa I	rpm	-	-	2 a 629	2 a 441	7 a 260	6 a 210	6 a 210
Faixa II	rpm	-	-	8 a 2.500	8 a 1.800	12 a 1.200	10 a 1.000	7 a 670
Cabeçote (opcional)								
Nariz do eixo-árvore	ASA	A2-6"	A2-8"	-	A2-11"	A2-15"	A2-20"	A2-20"
Diâmetro do furo do eixo-árvore	mm	65	80	-	160	252	375	375
Faixa de velocidades	rpm	3 a 3.000	2 a 2.000	-	2 a 1.000	5 a 750	3 a 500	3 a 500
Faixa I	rpm	-	-	-	2 a 245	5 a 170	3 a 100	3 a 100
Faixa II	rpm	-	-	-	10 a 1.000	8 a 750	5 a 500	5 a 500
Avanços								
Avanço rápido longitudinal (eixo Z)	m/min	10	10	7,5	7,5	8	8	8
Avanço rápido transversal (eixo X)	m/min	7,5	7,5	7,5	7,5	8 / 5 (*)	8 / 5 (*)	8 / 5 (*)
Cabeçote móvel manual		Standard	Standard	Standard	Standard	Opcional	Opcional	Opcional
Curso máximo da manga	mm	120	130	180	180	250	250	250
Diâmetro da manga	mm	60	80	100	100	150	150	150
Sede interna da manga	CM	4	4	5	5	6	6	6
Acionamento da manga		manual	manual	manual	manual	manual	manual	manual
Cabeçote móvel automático (opcional)								
Posicionamento do corpo		manual	manual	manual	manual	manual / arraste (mesa)	manual / arraste (mesa)	manual / arraste (mesa)
Curso máximo da manga	mm	120	130	180	180	300	300	300
Diâmetro da manga	mm	60	80	100	100	200	200	200
Sede interna da manga	CM	4	4	5	5	6	6	6
Potência instalada								
Motor principal CA	cv / kW	10 / 7,5	15 / 11	20 / 15	30 / 22	50 / 37	60 / 44,5	60 / 44,5
Potência total instalada	kVA	15	20	25	40	57	68	68
Área ocupada (**)								
entre pontas 1 m	m	2,72 x 1,27	3,15 x 1,65	3,46 x 2,03	3,46 x 2,03	-	-	-
entre pontas 1,5 m	m	-	3,65 x 1,65	-	-	-	-	-
entre pontas 2 m	m	-	4,15 x 1,65	4,46 x 2,03	4,46 x 2,03	6,35 x 2,43	6,51 x 2,92	6,51 x 3,20
entre pontas 3 m	m	-	-	5,46 x 2,03	5,46 x 2,03	-	-	-
entre pontas 3,5 m	m	-	-	-	-	7,88 x 2,43	8,04 x 2,92	8,04 x 3,20
entre pontas 5 m	m	-	-	-	-	9,40 x 2,43	9,56 x 2,92	9,56 x 3,20
entre pontas 6,5 m	m	-	-	-	-	10,93 x 2,43	10,93 x 2,92	10,93 x 3,20
entre pontas 8 m	m	-	-	-	-	12,45 x 2,43	12,45 x 2,92	12,45 x 3,20

3.5.2 Estereoscópio Zeiss Discovery V12

As medições do desgaste das ferramentas foram feitas no Laboratório de Pesquisa em Usinagem – LAUS da PUCPR, utilizando um estereoscópio Zeiss Discovery V12. A Figura 3.6 mostra o setup do estereoscópio, juntamente com o computador que contém o software ZEN11[®], utilizado para a obtenção das imagens.

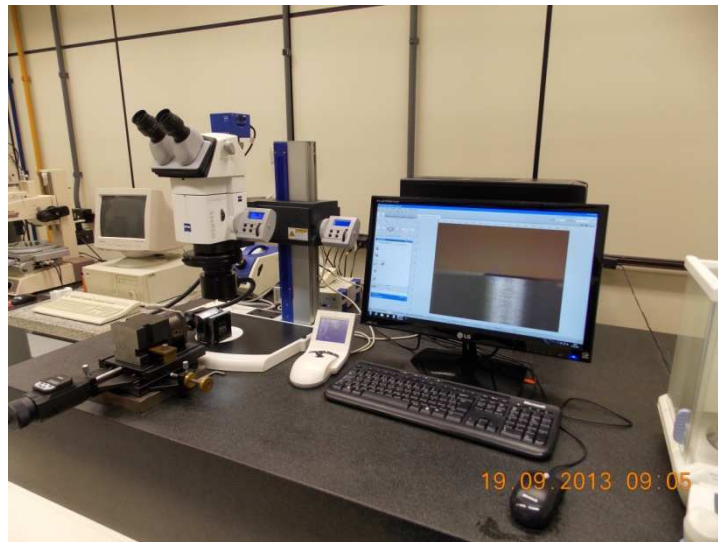


Figura 3.6 Estereoscópio Zeiss, computador e software para captação das imagens

A Figura 3.7 é um exemplo das imagens obtidas no estereoscópio, com o detalhe da escala de 100 μm .



Figura 3.7 Desgaste da ferramenta utilizada durante teste com MQF na direção de folga principal

3.5.3 Dinamômetro

Como mostrado na seção 2.3.2, as componentes das forças atuantes no processo durante a usinagem foram medidas através de um dinamômetro em cada um dos experimentos. O dinamômetro utilizado foi o Kistler®, modelo 9265B, como mostra a Figura 3.8.



Figura 3.8 Dinamômetro Kistler® utilizado para medição das forças nos experimentos (KISTLER, 2013)

Foram feitas as medições dos sinais de forças de corte na direção do eixo-X (F_x), do eixo-Y (F_y) e do eixo-Z (F_z), correspondentes às componentes F_f – Força de avanço; F_p – Força passiva e F_c – Força de corte, respectivamente. A realização de tais medições ocorreu através da leitura dos sinais obtidos pelo dinamômetro. As leituras foram feitas numa taxa de aquisição de 5 KHz captados durante 5 segundos, sendo que cada teste teve de 4 a 6 leituras ao longo da barra durante a realização do corte. Os valores das forças apresentados nas Tabelas 4.3 e 4.4 são valores médios das leituras obtidas durante a usinagem.

3.5.4 Sistema ACCU-LUBE

Accu-Lube é um sistema de aplicação mínima de fluido de corte. Ele utiliza ar comprimido para criar uma “nuvem” lubrificante atingindo o alvo com uma pressão que pode chegar a 1,2 MPa (ACCU-LUBE, 2013).

A Figura 3.9 mostra em detalhes as três direções de aplicação do fluido de corte com o método MQF.

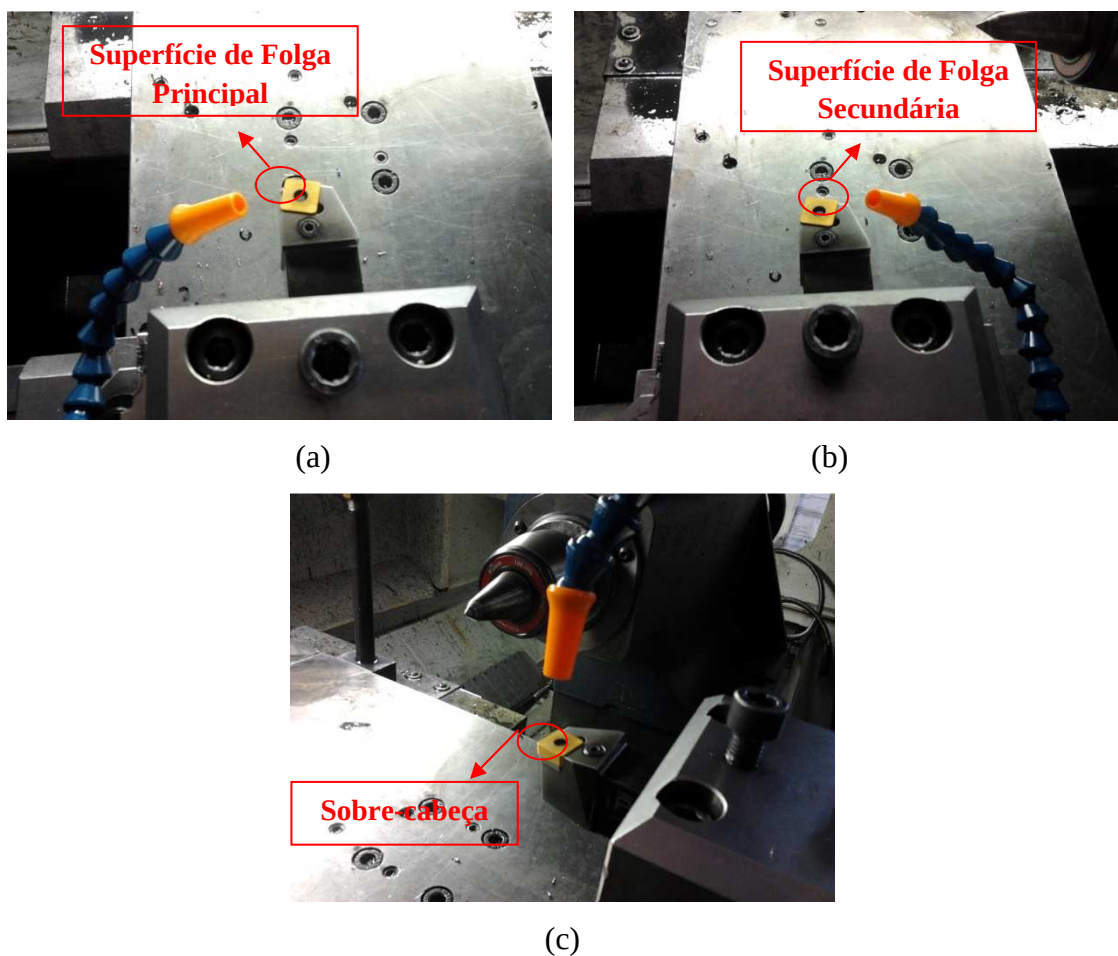


Figura 3.9 Direções de aplicação do fluido de corte: (a) Superfície de folga principal, (b) Superfície de folga secundária e (c) Sobre-cabeça

A regulação interna controla a quantidade de fluido de corte que será misturada ao ar comprimido, sendo este regulado pela válvula externa do dispositivo Accu-Lubbe. O dispositivo possui um copo superior onde fica o fluido de corte que será aplicado, sendo neste caso o fluido de corte mineral LB 2000 (fluido indicado para este tipo de dispositivo).

Durante os processos experimentais, a pressão utilizada pelo MQF foi de 0,6 MPa, com uma vazão de 60 ml/h. Estes valores de pressão e vazão foram determinados durante a realização dos pré-testes, sendo os valores que obtiveram melhor comportamento de todo o sistema de aplicação, evitando vazamentos do fluido e oscilações da pressão do ar comprimido. A distância empregada do bico da mangueira de aplicação do MQF até a zona de corte foi aproximadamente 4 a 5 cm, concentrando a nuvem de fluido e ar comprimido num único local, desde que não atrapalhasse a saída do cavaco.

3.5.5 Rugosímetro

Foram medidas rugosidades em 9 (nove) pontos diferentes do corpo de prova, a cada passada e os parâmetros considerados foram R_a , R_z e R_q (seção 2.8). O *cut-off* utilizado foi de 0,8 mm. O resultado considerado foi a média das 9 medições. O rugosímetro portátil digital é de fabricação Mitutoyo, modelo SJ-201 (Figura 3.10).



Figura 3.10 Rugosímetro Mitutoyo modelo SJ-201

3.5.6 MEV – Microscópio Eletrônico de Varredura

Após os testes de vida, as ferramentas de corte foram levadas ao MEV (Microscópio Eletrônico de Varredura) para análise dos desgastes. O modelo do MEV utilizado nos experimentos foi o TM3000, mostrado na Figura 3.11.



Figura 3.11 Microscópio eletrônico de varredura TM3000

Para melhor exemplificar como seria a imagem utilizando o MEV, a Figura 3.12 representa uma destas imagens que serão analisadas na seção 4.2 – *Avaliação dos Mecanismos de Desgaste das Ferramentas de Corte*.

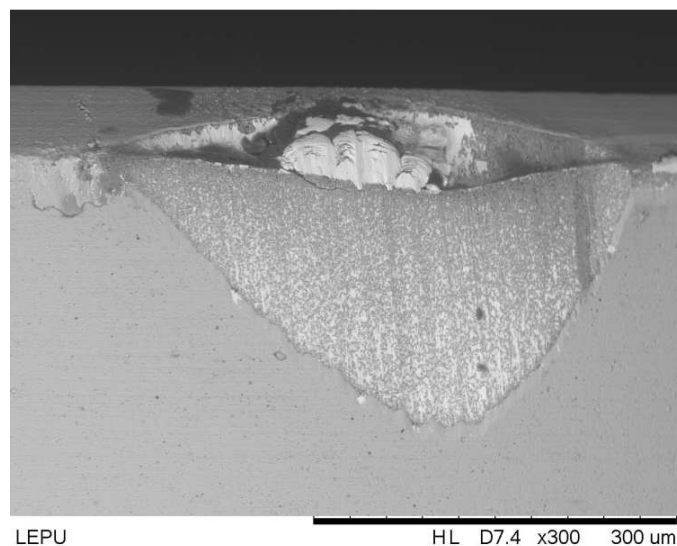


Figura 3.12 Desgaste obtido em ferramenta durante teste com MQF aplicado na direção da superfície de folga secundária

3.6 Procedimentos Experimentais

Antes de realizar os experimentos para o presente trabalho, foram feitos alguns testes para observar o comportamento da máquina durante o procedimento de usinagem.

Também serviu para melhor conhecer sobre o processo de usinagem com aços endurecidos e o comportamento das ferramentas de PCBN.

Como foi empregada a técnica MQF, os primeiros testes serviram para ajustar a vazão e a pressão da nuvem de fluido de corte que seria aplicada.

Os parâmetros de corte indicado pelo fabricante das ferramentas para aços endurecidos são (SANDVIK COROMANT, 2013):

- Velocidade de corte: $V_c = 150$ a 250 m/min;
- Avanço: $f = 0,05$ a $0,30$ mm/rev;
- Profundidade de corte: $a_p = 0,07$ a $1,20$ mm

Este trabalho baseia-se nas condições de corte determinadas por Camargo (2011), que realizou pré-testes, descritos a seguir, para determinar os parâmetros de corte adequados de acordo com seus testes para usinar tal material. Para a profundidade de corte foram testados 3 valores para estabelecer qual seria o valor mais adequado para usinar aços com dureza entre 58-62 HRC, com velocidade de corte $V_c = 250$ m/min.

Com a profundidade de corte de $0,25$ mm foi observada mais intensa vibração durante o processo, aumentando a taxa de desgaste da ferramenta exponencialmente.

Com $0,1$ mm de profundidade de corte, houve uma leve queda na vibração e uma diminuição no desgaste da ferramenta, porém o desgaste de flanco em uma única passada foi elevado, $VB_B = 0,57$ mm, acima do recomendado (vide critérios para medição de desgaste e vida da ferramenta na seção 2.5.2).

O último valor testado para profundidade de corte foi $a_p = 0,05$ mm. Este valor foi considerado o mais adequado para os testes, pois as vibrações praticamente não existiram e, portanto, não interferiram no processo.

O desgaste reduziu drasticamente para valores adequados e esperados para os testes. Ressalta-se que os pré-testes foram realizados sem a utilização de fluido de corte.

Sendo assim, os ensaios de torneamento utilizaram velocidades de corte $V_c = 160$ a 340 m/min, avanço $f = 0,05$ a $0,25$ mm/rev e profundidade de corte (a_p) constante no

valor de 0,05 mm. Para o presente trabalho, foram adotadas as condições de corte do trabalho desenvolvido por Camargo (2011), que usinou a seco e utilizou as condições apresentadas na Tabela 3.3.

Tabela 3.3 Condições de corte (CAMARGO, 2011)

Ensaio	V_c	f
1	160	0,05
2	160	0,25
3	190	0,05
4	190	0,15
5	190	0,25
6	250	0,05
7	250	0,10
8	250	0,15
9	250	0,15
10	250	0,20
11	250	0,25
12	310	0,05
13	310	0,15
14	310	0,25
15	340	0,05
16	340	0,25

Estas condições foram testadas a seco no mesmo material e na mesma máquina-ferramenta em trabalho anteriormente desenvolvido por Camargo (2011). Desta forma, nesta dissertação, apenas os testes com MQF foram realizados e os resultados comparados com aqueles levantados por Camargo (2011). As condições de aplicação do MQF são: pressão de 0,6 MPa, vazão de 60 ml/h. O fluido utilizado foi o óleo mineral LB 2000. Foi feito uma réplica de todos os testes, para ter uma melhor abordagem estatística. Este mesmo procedimento foi adotado por Camargo (2011) nos ensaios a seco. Assim, foi realizado um total de 32 testes com MQF, incluindo as réplicas, mostrado na Tabela 3.3.

Para melhor entender o efeito do fluido de corte aplicado na forma de MQF, além de aplicá-lo entre a superfície de folga principal e a peça (superfície principal em usinagem) nos 16 testes da Tabela 3.3, foram escolhidos seis ensaios para serem realizados mudando a direção de aplicação do fluido, como mostra a Tabela 3.4. Primeiro, o MQF foi aplicado na direção sobre-cabeça e depois entre a superfície de folga secundária e a peça

(superfície secundária de usinagem). Foram feitas réplicas, totalizando mais 24 testes. Com isso, o presente trabalho se resumiu a 32 testes com MQF aplicado na direção da superfície de folga principal, 12 testes com MQF aplicado na direção da folga secundária e mais 12 testes com MQF aplicado na direção sobre-cabeça, totalizando 56 testes.

Tabela 3.4 Ensaios selecionados para testes com MQF na direção secundária de folga e sobre-cabeça

Ensaio	V_c	f
1	160	0,05
6	250	0,05
11	250	0,25
12	310	0,05
15	340	0,05
16	340	0,25

A estratégia de teste foi utilizar um percurso de avanço fixo de 250 mm (que era o comprimento útil da barra) e medir o desgaste no final, sendo este valor o parâmetro comparativo de vida da ferramenta. Os testes foram executados aleatoriamente, dentro daqueles indicados na Tabela 3.3, mesmo procedimento e critério utilizados no processo sem fluido de corte, feito por Camargo (2011). Cada teste foi realizado com uma aresta nova da ferramenta. Durante todo o experimento foram medidas as componentes de força de usinagem (F_x , F_y e F_z), o desgaste da ferramenta (VB_{Bmax}) e a rugosidade (R_a , R_z e R_q). Também a critério de comparação, foi calculada a Taxa de Desgaste (T_d) em cada teste realizado. Este cálculo é feito através da razão entre o desgaste da ferramenta e o tempo de usinagem, como mostra a Equação 6, onde VB é o desgaste da ferramenta e t o tempo de usinagem:

$$Td = \frac{VB}{t} \quad [6]$$

Assim, os parâmetros principais de usinabilidade considerados foram a vida da ferramenta e mecanismos de desgastes, as forças e o acabamento superficial. Ao final dos testes de vida as ferramentas foram analisadas com o Estereoscópio Zeiss e Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV) para analisar as imagens e complementar o estudo dos mecanismos de desgaste. Todos os testes foram realizados no LPU / FEMEC / UFU.

CAPÍTULO IV

RESULTADOS E DISCUSSÕES

Este capítulo descreve os resultados dos experimentos realizados de modo a verificar o grau de influência de cada um dos fatores, velocidade de corte, avanço e, principalmente, a aplicação do fluido de corte na forma de MQF no desgaste da ferramenta. Com os procedimentos experimentais, o conhecimento sobre o comportamento do material durante a usinagem, no que diz respeito às forças de usinagem e à vida da ferramenta e a influência dos parâmetros de corte foram consideravelmente ampliados.

Num primeiro momento, os resultados foram discutidos estatisticamente, sem se preocupar, no entanto, com os fenômenos responsáveis pelos efeitos observados. Na metodologia (seção 3.6) foram descritos os procedimentos dos testes. Os testes foram executados de maneira aleatória com uma repetição para cada condição de corte, de acordo com a Tabela 3.3, lembrando que a profundidade de corte foi mantida constante em 0,05 mm.

Como o presente trabalho mostra a comparação dos resultados com MQF e a seco, as Tabelas 4.1 e 4.2 trazem os resultados dos ensaios e réplicas dos testes, respectivamente, contendo as forças (F_x , F_y e F_z), as rugosidades (R_a , R_q e R_z) e os valores de desgaste (VB_{Bmax}) obtidos por Camargo (2011).

Os valores para rugosidade nos testes a seco foram obtidos através de um valor médio de três resultados (medições realizadas na extremidade e no centro da amostra).

As componentes de força foram obtidas através de medições feitas pelo dinamômetro, utilizando uma frequência de 3 KHz respectivos aos sinais monitorados para cada componente de força.

Vale ressaltar que os valores das forças estão em módulo, isto é, o sinal negativo que aparece em alguns valores simplesmente representam a direção do vetor força, de acordo com o sentido adotado pelo dinamômetro.

Tabela 4.1 Dados experimentais obtidos nos ensaios sem uso de fluido de corte, usinagem a seco (CAMARGO, 2011)

Resultados dos Ensaio Usinagem a seco											
Experimento	Velocidade de corte	Avanço	Ferramenta	Aresta	Rugosidade			Forças			Desgaste
	Vc	f			Ra	Rz	Rq	Fx	Fy	Fz	VB _{Bmax}
	(m/min)	(mm/rev)			μm	μm	μm	N	N	N	mm
1	160	0,05	2	2	0,49	2,47	0,59	1,41	30,10	45,03	0,21
2	160	0,25	1	6	1,25	5,42	1,45	-5,48	-0,47	-0,55	0,13
3	190	0,05	2	8	0,81	3,67	0,95	6,98	58,13	-9,13	0,25
4	190	0,15	2	6	0,68	3,65	0,83	4,77	78,87	5,42	0,16
5	190	0,25	1	7	1,62	6,99	1,88	13,39	128,64	26,05	0,15
6	250	0,05	1	5	0,86	3,87	1,01	1,87	46,48	-2,28	0,26
7	250	0,10	2	7	0,54	2,70	0,65	10,94	79,42	-6,92	0,24
8	250	0,15	3	1	0,70	3,42	0,83	4,83	1,74	-6,46	0,16
9	250	0,15	2	5	0,70	3,59	0,84	10,09	88,24	17,62	0,19
10	250	0,20	2	4	0,75	3,92	0,92	4,91	84,90	0,66	0,17
11	250	0,25	8	1	1,09	5,20	1,32	2,63	65,15	8,18	0,16
12	310	0,05	2	3	0,50	2,71	0,60	1,15	48,35	-15,18	0,33
13	310	0,15	2	1	0,94	4,65	1,11	9,57	80,06	8,42	0,24
14	310	0,25	8	3	1,28	6,17	1,56	14,40	109,76	16,98	0,22
15	340	0,05	1	8	0,52	2,84	0,62	6,46	54,21	-31,79	0,61
16	340	0,25	8	2	1,15	5,69	1,35	-0,65	7,82	11,02	0,19

Tabela 4.2 Dados experimentais obtidos nas réplicas sem uso de fluido de corte, usinagem a seco (CAMARGO, 2011)

Resultados das Réplicas Usinagem a seco											
Experimento	Velocidade de corte	Avanço	Ferramenta	Aresta	Rugosidade			Forças			Desgaste
	Vc	f			Ra	Rz	Rq	Fx	Fy	Fz	VB _{Bmax}
	(m/min)	(mm/rev)			μm	μm	μm	N	N	N	mm
1	160	0,05	4	3	1,23	5,22	1,42	3,31	53,00	30,44	0,16
2	160	0,25	3	7	1,38	5,52	1,58	6,19	103,09	8,44	0,12
3	190	0,05	5	1	0,55	2,72	0,66	10,54	67,06	45,42	0,23
4	190	0,15	4	7	0,57	2,93	0,70	10,11	92,55	62,14	0,16
5	190	0,25	3	8	1,39	5,98	1,63	5,59	104,35	10,65	0,15
6	250	0,05	3	6	0,62	2,94	0,73	3,94	46,48	-11,99	0,30
7	250	0,10	4	8	0,63	3,02	0,75	6,66	65,74	46,95	0,23
8	250	0,15	3	2	0,66	3,34	0,80	26,95	135,35	11,04	0,21
9	250	0,15	4	6	0,64	3,14	0,78	8,66	90,27	50,54	0,20
10	250	0,20	4	5	0,72	4,10	0,92	4,94	92,56	35,43	0,19
11	250	0,25	3	5	1,36	5,84	1,55	4,50	92,54	30,75	0,16
12	310	0,05	4	4	0,85	3,97	1,01	-0,31	36,44	14,03	0,34
13	310	0,15	4	2	0,78	3,95	0,95	9,68	110,86	15,72	0,21
14	310	0,25	3	4	1,31	6,83	1,62	10,17	94,41	11,72	0,23
15	340	0,05	4	1	0,98	4,38	1,14	1,70	48,07	-3,75	0,40
16	340	0,25	3	3	1,10	5,93	1,34	-4,82	19,63	-12,29	0,19

As Tabelas 4.3 e 4.4 trazem os resultados dos ensaios e réplicas dos testes, respectivamente, contendo as forças (F_x , F_y e F_z), as rugosidades (R_a , R_q e R_z) e os valores de desgaste obtidos para a aplicação do fluido de corte na forma de MQF na superfície de folga das ferramentas.

Para os testes com MQF os valores das forças de corte foram obtidos através da média de 4 a 6 medições para cada ensaio, sendo que em cada medição utilizou uma frequência de 5 KHz respectivos aos sinais monitorados para cada componente de força. Alguns resultados terão que ser reavaliados por apresentarem problemas com os sinais da plataforma piezoelétrica anexada ao dinamômetro.

A cada rugosidade também foi feita uma média de nove leituras realizadas ao longo da barra, sendo três leituras (no início, no meio e no final da barra usinada) e em três eixos diferentes.

Observa-se que na Tabela 4.1, o experimento 15 obteve o maior desgaste entre todos os testes realizados a seco com $VB_{Bmax} = 0,60$ mm, atingindo o valor máximo de desgaste sugerido pela Norma ISO 3685 que é $VB_{Bmax} = 0,6$ mm. Provavelmente por ser uma condição muito severa de corte, onde a velocidade de corte é elevada e avanço pequeno, o tempo de usinagem é maior, podendo resultar até mesmo numa possível quebra da aresta de corte.

Na Tabela 4.2, o maior desgaste novamente foi o experimento 15, obtendo o valor de $VB_{Bmax} = 0,40$ mm. Nesta repetição o valor do desgaste não chegou a atingir o valor máximo exigido pela Norma ISO 3685, porém ainda sim ficou acima do desgaste médio de flanco que é $VB_B = 0,3$ mm, como mostrado na seção 2.5.2.

Nos testes com MQF nenhum experimento obteve VB maior que 0,28 mm, apenas o experimento 16 na Tabela 4.3 onde o valor de $VB_{Bmax} = 0,38$ mm, porém neste caso além de ser uma condição de maior taxa de desgaste da ferramenta (velocidade de corte e avanço elevados), houve uma quebra na aresta efetiva de corte durante o processo de usinagem (Figura 4.1), prejudicando inclusive os valores de rugosidade e das componentes de força.

Tabela 4.3. Dados experimentais obtidos nos ensaios com MQF aplicado na superfície de folga

Resultados dos Ensaios Utilizando MQF na superfície de folga											
Experimento	Velocidade de corte	Avanço	Ferramenta	Aresta	Rugosidade			Forças			Desgaste
	Vc	f			Ra	Rz	Rq	Fx	Fy	Fz	VB _{Bmax}
	(m/min)	(mm/rev)			μm	μm	μm	N	N	N	mm
1	160	0,05	15	4	0,25	1,41	0,32	3,72	29,78	36,56	0,12
2	160	0,25	3	8	1,42	6,63	1,71	11,09	121,31	80,76	0,16
3	190	0,05	3	5	0,33	1,87	0,38	1,76	9,29	9,89	0,19
4	190	0,15	1	5	0,92	4,17	1,09	1,26	67,98	4,53	0,19
5	190	0,25	15	1	1,56	6,92	1,84	7,47	116,7	82,40	0,17
6	250	0,05	2	7	0,45	2,11	0,49	1,02	42,01	12,15	0,17
7	250	0,10	4	8	0,88	4,01	1,04	5,81	2,44	12,37	0,23
8	250	0,15	5	1	1,14	4,81	1,25	3,53	5,68	8,47	0,16
9	250	0,15	15	7	1,04	4,55	1,22	2,40	13,07	5,68	0,21
10	250	0,20	3	3	1,08	5,52	1,34	8,54	93,34	73,48	0,19
11	250	0,25	4	6	1,04	5,45	1,25	3,56	91,40	70,28	0,17
12	310	0,05	1	3	0,35	1,94	0,39	3,65	38,90	12,13	0,25
13	310	0,15	2	1	1,27	5,40	1,47	2,77	51,34	36,70	0,21
14	310	0,25	1	6	0,98	5,08	1,20	8,70	144,02	106,82	0,17
15	340	0,05	5	8	0,42	2,14	0,50	9,54	45,12	33,67	0,25
16	340	0,25	4	2	2,55	8,90	1,83	2,52	157,92	83,80	0,38

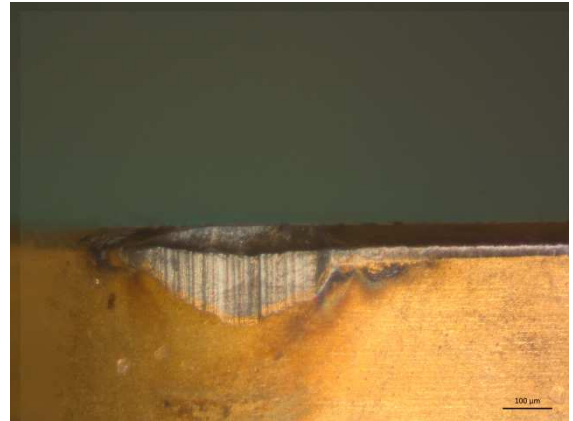
Tabela 4.4 Dados experimentais obtidos nas réplicas com MQF aplicado na superfície de folga

Resultados das Réplicas Utilizando MQF na superfície de folga											
Experimento	Velocidade de corte	Avanço	Ferramenta	Aresta	Rugosidade			Forças			Desgaste
	Vc	f			Ra	Rz	Rq	Fx	Fy	Fz	VB _{Bmax}
	(m/min)	(mm/rev)			μm	μm	μm	N	N	N	mm
1	160	0,05	6	1	0,28	1,66	0,34	1,74	12,14	4,57	0,19
2	160	0,25	10	6	1,50	6,67	1,77	12,37	158,03	109,84	0,16
3	190	0,05	10	4	0,28	1,50	0,34	13,85	53,15	58,50	0,19
4	190	0,15	7	2	0,74	3,39	0,87	0,09	0,06	0,07	0,17
5	190	0,25	6	2	1,50	6,33	1,72	14,09	108,84	79,75	0,18
6	250	0,05	9	5	0,29	1,83	0,34	3,78	17,26	11,81	0,17
7	250	0,10	6	7	0,80	3,40	0,92	2,49	9,12	11,31	0,20
8	250	0,15	8	5	0,72	3,57	0,90	21,73	89,18	66,72	0,18
9	250	0,15	8	8	0,77	3,40	0,83	18,33	87,43	65,22	0,21
10	250	0,20	10	5	0,79	4,05	0,97	21,42	107,83	95,07	0,19
11	250	0,25	7	4	1,33	6,51	1,55	16,73	98,09	80,38	0,19
12	310	0,05	8	2	0,34	1,88	0,40	15,76	50,10	30,7	0,23
13	310	0,15	9	6	0,88	3,94	1,02	14,87	60,94	41,15	0,19
14	310	0,25	9	3	1,06	5,68	1,31	13,40	76,11	55,26	0,18
15	340	0,05	7	8	0,39	2,01	0,44	7,58	54,61	34,26	0,28
16	340	0,25	7	7	1,02	5,97	1,29	12,89	83,45	64,93	0,23

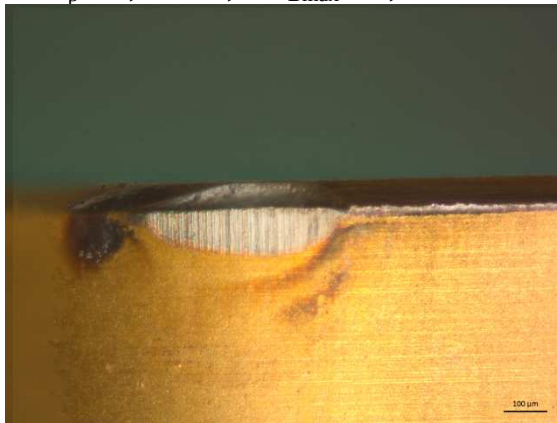
A Figura 4.1 mostra as imagens com os aspectos dos desgastes de flanco das ferramentas.



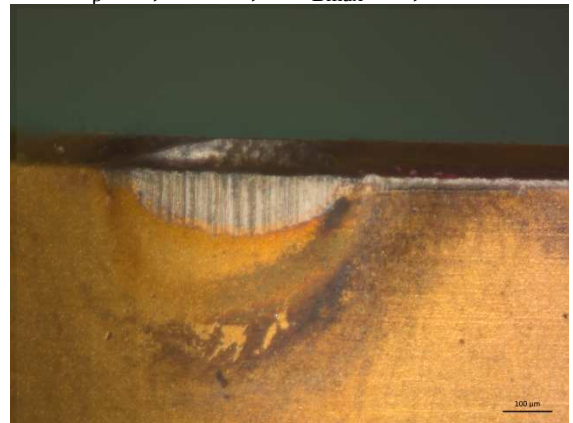
(a) $V_c = 310$ m/min; $f = 0,05$ mm/rev;
 $a_p = 0,05$ mm; $VB_{Bmax} = 0,25$ mm



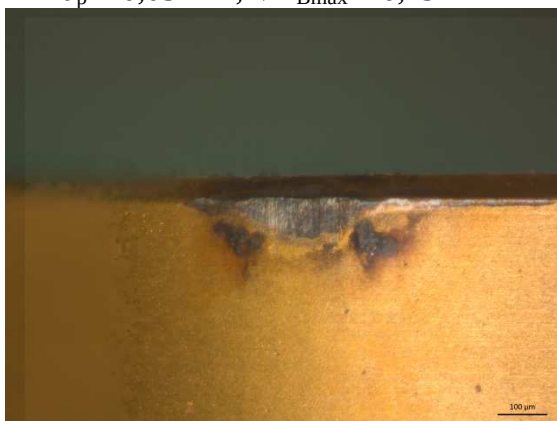
(d) $V_c = 310$ m/min; $f = 0,15$ mm/rev;
 $a_p = 0,05$ mm; $VB_{Bmax} = 0,21$ mm



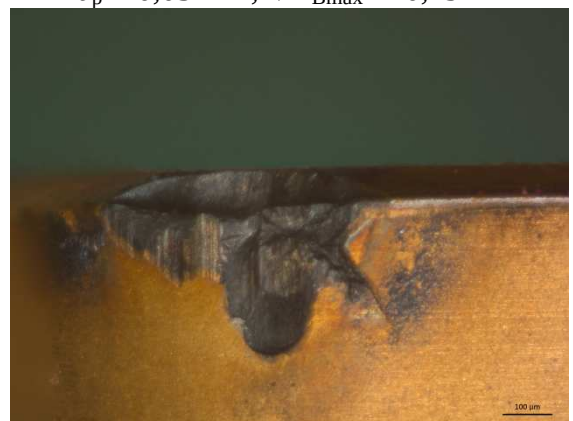
(b) $V_c = 190$ m/min; $f = 0,15$ mm/rev;
 $a_p = 0,05$ mm; $VB_{Bmax} = 0,19$ mm



(e) $V_c = 250$ m/min; $f = 0,20$ mm/rev;
 $a_p = 0,05$ mm; $VB_{Bmax} = 0,19$ mm



(c) $V_c = 250$ m/min; $f = 0,05$ mm/rev;
 $a_p = 0,05$ mm; $VB_{Bmax} = 0,17$ mm



(f) $V_c = 340$ m/min; $f = 0,25$ mm/rev;
 $a_p = 0,05$ mm; $VB_{Bmax} = 0,38$ mm

Figura 4.1 Resultados dos desgastes para algumas amostras obtidas durante os ensaios

Estas fotos são resultado das medições do desgaste de flanco máximo VB_{Bmax} de apenas algumas arestas de corte, com uma escala de 100 μm nas imagens, obtidos através do estereoscópio Zeiss Discovery V12 para as ferramentas utilizadas nos ensaios.

Nas imagens obtidas já é possível se ter uma idéia dos mecanismos de desgaste que atuam na ferramenta durante o processo, sendo o mecanismo de desgaste abrasivo (descrito na seção 2.5.1) o mais atuante neste tipo de ferramenta com materiais endurecidos. Apesar de observar nas imagens a tendência dos mecanismos destes desgastes, imagens no MEV (Microscópio Eletrônico de Varredura) também serão utilizadas (seção 4.2) para se ter mais detalhes e discussões sobre o comportamento destes mecanismos de desgaste.

Observa-se nas imagens o mecanismo de desgaste abrasivo é caracterizado pelos sulcos paralelos formados na região de desgaste, formando uma espécie de “linhas paralelas”. Nas imagens (a) e (c) parece haver um pouco de material aderido envolta da área desgastada. Nas imagens (d) e (e) é possível verificar abaixo da área de desgaste o gradiente da temperatura (coloração semelhante ao arco-íris) devido ao calor gerado durante o processo de usinagem. Vale lembrar que para este tipo de material, as temperaturas podem variar entre 1275-1300 °C na zona de cisalhamento primária (Bhattacharyya *et al.*, 1978). A imagem (f) é a aresta de corte da ferramenta na qual houve uma pequena trinca durante os ensaios, resultando na falha detectada pela figura. Como dito anteriormente, esta condição de corte é a mais severa dentre os todos os testes realizados, possuindo o maior valor para velocidade de corte, maior valor do avanço, aumentando assim a velocidade de avanço e acelerando a taxa de desgaste. A soma destes fatores resultou na falha da aresta de corte prejudicando também os valores de rugosidade e força.

A Figura 4.2 apresenta os valores de desgaste máximo de flanco das ferramentas de PCBN obtidos nos ensaios e nas réplicas e suas respectivas médias, para cada um dos testes de usinagem da Tabela 3.3 para a aplicação do fluido na forma de MQF.

A primeira observação é com relação aos valores médios dos desgastes obtidos. Nota-se que nenhum valor ultrapassou ao valor de 0,30 mm, valor médio para desgaste de flanco.

A análise destes resultados mostra que existe repetitividade nos ensaios, com pouca variação dos desgastes em uma passada na mesma condição de corte, isto é, os valores de desgaste no teste são bem próximos dos valores na réplica. Apenas a condição mais extrema, com $V_c = 340$ m/min e $f = 0,25$ mm/rev, apresentou o desgaste da ferramenta no

primeiro ensaio de 0,38 mm, e no segundo ensaio (réplica) um VB_{Bmax} de 0,23 mm, sendo, portanto, uma diferença significativa, como mostra a Figura 4.2. Isso pode ser explicado pela forte dependência que o mecanismo de desgaste tem pela velocidade de corte (V_c) e pelo avanço (f), conforme mostrado na seção 2.5.1. Em elevadas condições de corte o desgaste é acelerado, podendo apresentar interação dos mecanismos envolvidos (principalmente a abrasão, adesão e difusão), ocasionando assim, menores valores de repetitividade ou até mesmo a quebra da aresta efetiva de corte.

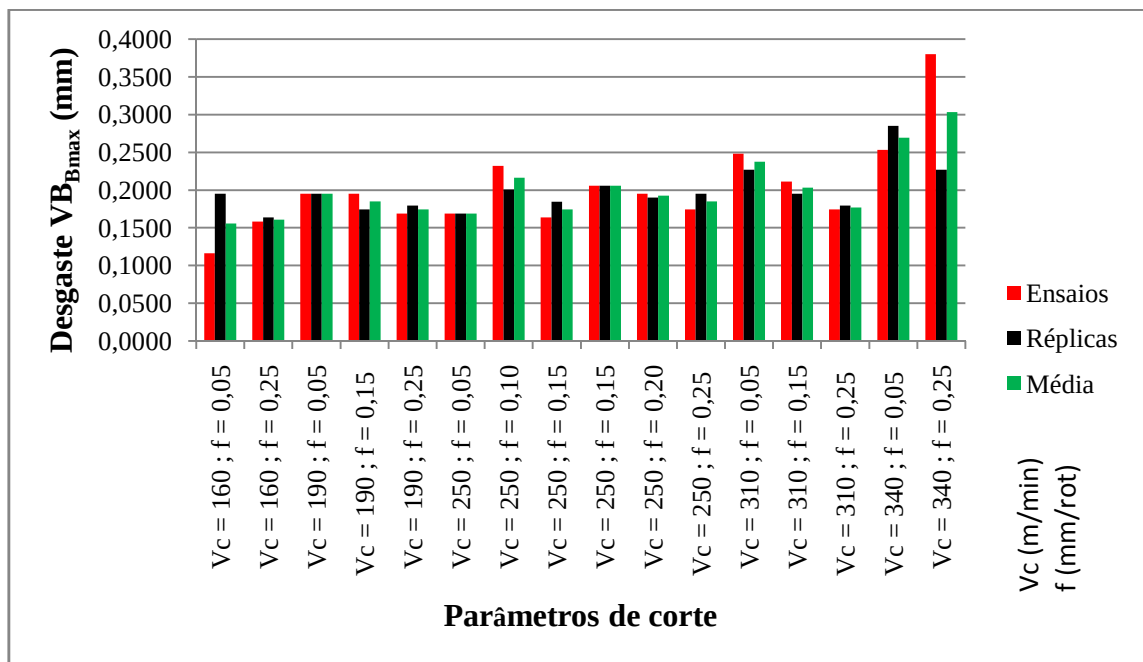


Figura 4.2 Gráfico do desgaste das ferramentas de corte com MQF

Vale ressaltar também que esta condição de corte do experimento 16, possui a maior taxa de desgaste (Figura 4.3), pois tanto a velocidade de corte quanto o avanço possuem valores elevados. Ao observar os demais desgastes, verificou-se que os valores estão bem próximos em ambos os ensaios (teste e réplica), tornando fato a consistência nos experimentos realizados.

A taxa de desgaste é dependente da rotação de peça de trabalho (em rpm), do percurso total de avanço (em mm), do diâmetro da peça (em mm) e da velocidade de avanço (em mm/min). Como os ensaios tiveram parâmetros de corte diferentes, cada uma das grandezas citadas anteriormente será única para cada ensaio, fazendo com que a taxa de desgaste seja mais sensível às mudanças das condições de corte. Novamente pode-se observar um padrão nos valores obtidos para a taxa de desgaste, sendo valores muito próximos entre o ensaio e sua réplica, o que confirma a consistência e a repetitividade nos

experimentos realizados. O ensaio que se destacou foi a condição mais severa, com velocidade de corte (V_c) igual a 340 m/min e avanço (f) igual a 0,25 mm/rev, que apresentou a taxa de desgaste mais alta de todos os experimentos, o que não é nenhuma novidade, pois é a condição mais rápida de usinagem, ou seja, o tempo de corte nestas condições foi o menor entre os demais experimentos.

Vale lembrar que os valores para as condições de corte recomendados pelo fabricante da ferramenta são $V_c = 160$ a 250 m/min, $f = 0,05$ a 0,25 mm/rev e $a_p = 0,07$ a 1,20 mm, ou seja, o parâmetro de corte dos Ensaio 12 ao 16 (Tabela 3.3) são condições com valores acima dos recomendados, acarretando uma exigência bem maior do que era esperado pela ferramenta. Desta forma, acredita-se que esse fator possivelmente tem uma influência direta no aumento do desgaste a partir de $V_c = 250$ m/min, combinado com o avanço de 0,25 mm/rev.

A Figura 4.3 apresenta os resultados na forma de taxa de desgaste para as mesmas 16 diferentes condições de corte dos testes da Tabela 3.3. A taxa de desgaste é uma grandeza calculada pelo valor do desgaste medido no final do teste (final da passada), dividido pelo tempo gasto para dar um passe.

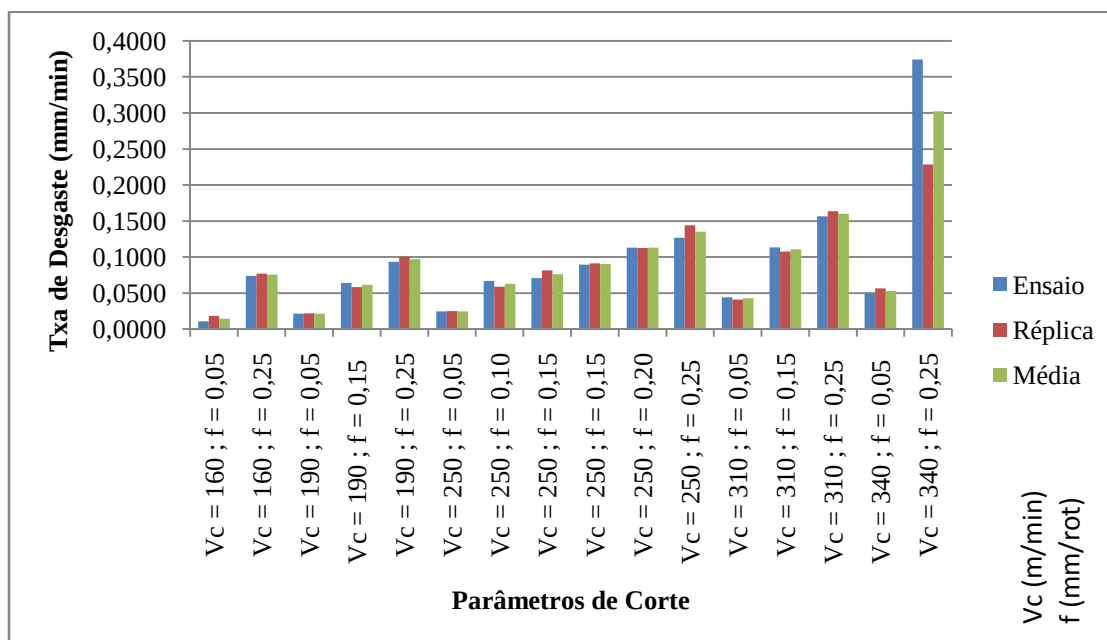


Figura 4.3 Gráfico da Taxa de Desgaste das ferramentas com MQF

Nota-se que os parâmetros de corte com avanço de 0,05 mm/rev apresentaram taxas de desgaste bem menores que os demais valores de avanço, mesmo com seu tempo de corte efetivo maior que os demais parâmetros de corte, enaltecendo ainda mais a grande

influência que este parâmetro de corte tem sobre o desgaste e os mecanismos de desgaste das ferramentas.

Até o momento, as Figuras 4.2 e 4.3 serviram para analisar os resultados obtidos nos ensaios e nas réplicas comparando-os entre si, realizados para os mesmos parâmetros de corte, utilizando MQF. No entanto, a Figura 4.4 apresenta a comparação do desgaste da ferramenta na usinagem do mesmo material sem a utilização de fluido de corte, ou seja, corte a seco, com a usinagem deste material utilizando o método de aplicação MQF para o fluido de corte. Observa-se que as condições com menores avanços, também apresentaram desgastes menores ao ser comparados com a condição a seco, sendo que alguns casos essa diferença foi considerável. O mesmo não acontece quando o desgaste com MQF se mostrou maior, pois a diferença não atingiu grandes valores, ou seja, mesmo quando o valor do desgaste com MQF foi maior, ainda sim ficou próximo do desgaste da ferramenta na usinagem a seco.

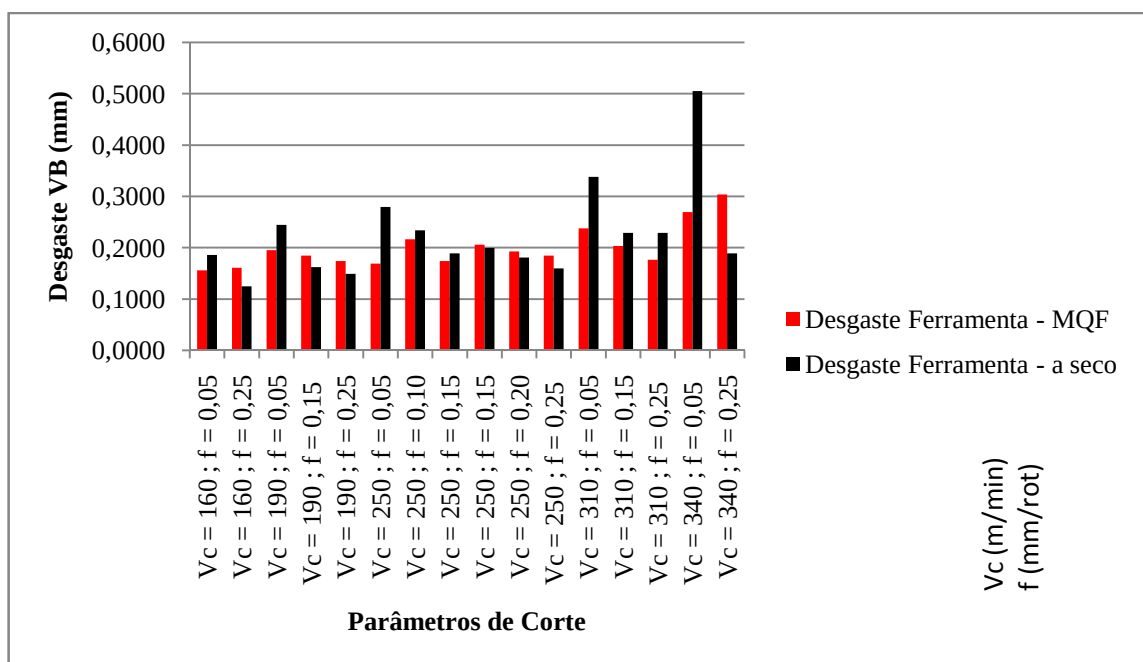


Figura 4.4 Gráfico da comparação entre desgaste da ferramenta com MQF e a seco

Vale ressaltar também que para $V_c = 310$ m/min, todos os avanços utilizados tiveram um menor desgaste quando se utilizou MQF, mostrando ser uma condição mais favorável para o uso de fluido de corte. Como neste caso o avanço não se mostrou influente para a condição MQF e a seco, pode ser que seja uma velocidade onde a temperatura atua de maneira positiva na peça, fazendo com que o resfriamento não prejudique o cisalhamento

e a lubrificação ajude a diminuir o desgaste da ferramenta. Ainda vale observar que conforme o valor do avanço aumenta, diminui o valor do desgaste para a condição MQF. Mas esse fenômeno pode ser explicado pela taxa de desgaste, pois conforme aumenta o avanço, a velocidade de avanço também aumenta para uma velocidade de corte constante, implicando em um menor tempo de usinagem. Se o tempo de usinagem fosse o critério para o desgaste certamente o avanço com valor de 0,25 mm/rev teria um desgaste maior que para o avanço de 0,05 mm/rev, com uma mesma velocidade de corte de 310 m/min.

Outro parâmetro a ser observado neste trabalho é a rugosidade R_a , R_z e R_q . As Tabelas 4.1, 4.2, 4.3 e 4.4 apresentam os valores médios de cada parâmetro para cada um dos experimentos, nos ensaios e réplicas a seco e ensaios e réplicas utilizando MQF, respectivamente. As Figuras 4.5 a 4.7 mostram a comparação dos resultados de rugosidade obtidos com MQF com testes sem resfriamento, isto é, a seco. Trata-se de valores médios dos parâmetros obtidos nos testes e réplicas para cada condição.

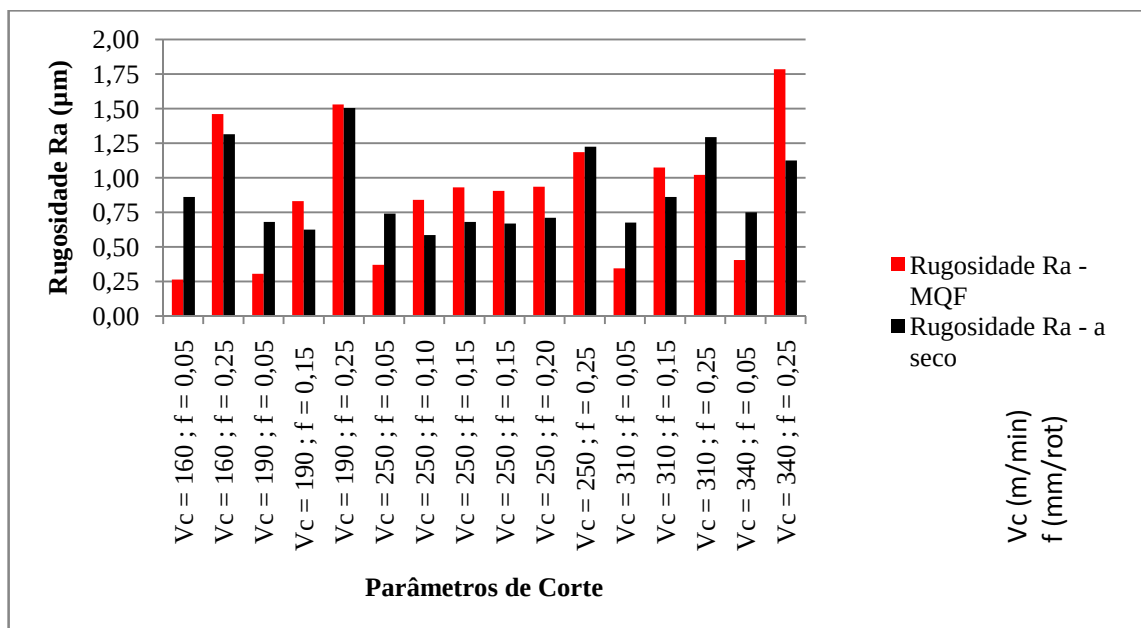


Figura 4.5 Rugosidade R_a com MQF e a seco

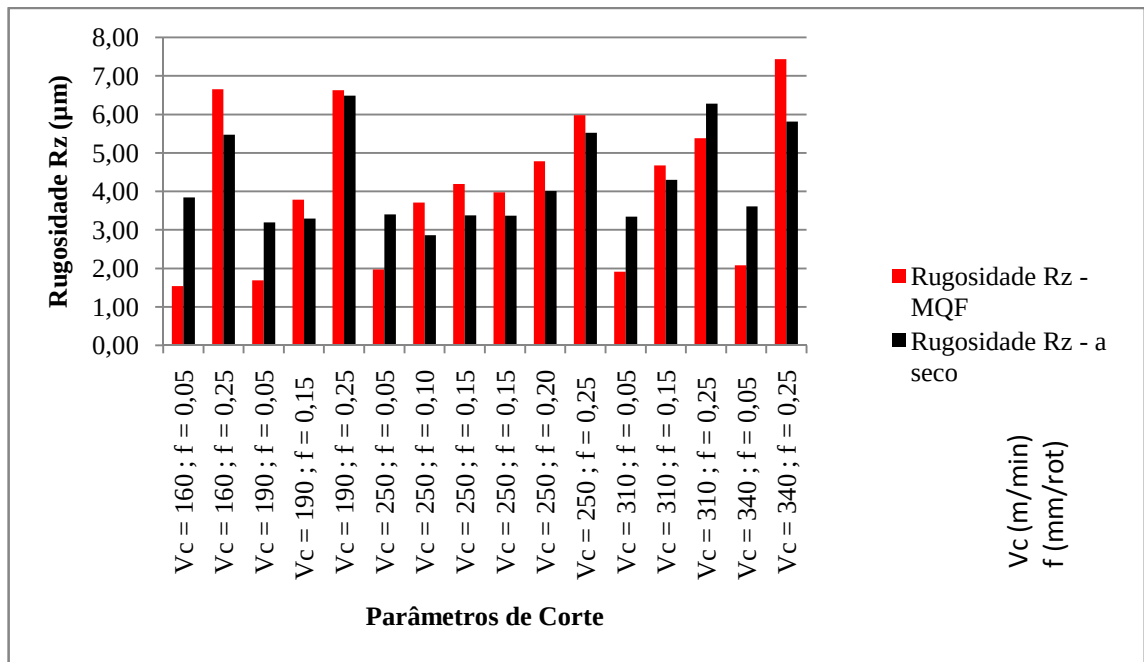


Figura 4.6 Rugosidade R_z com MQF e a seco

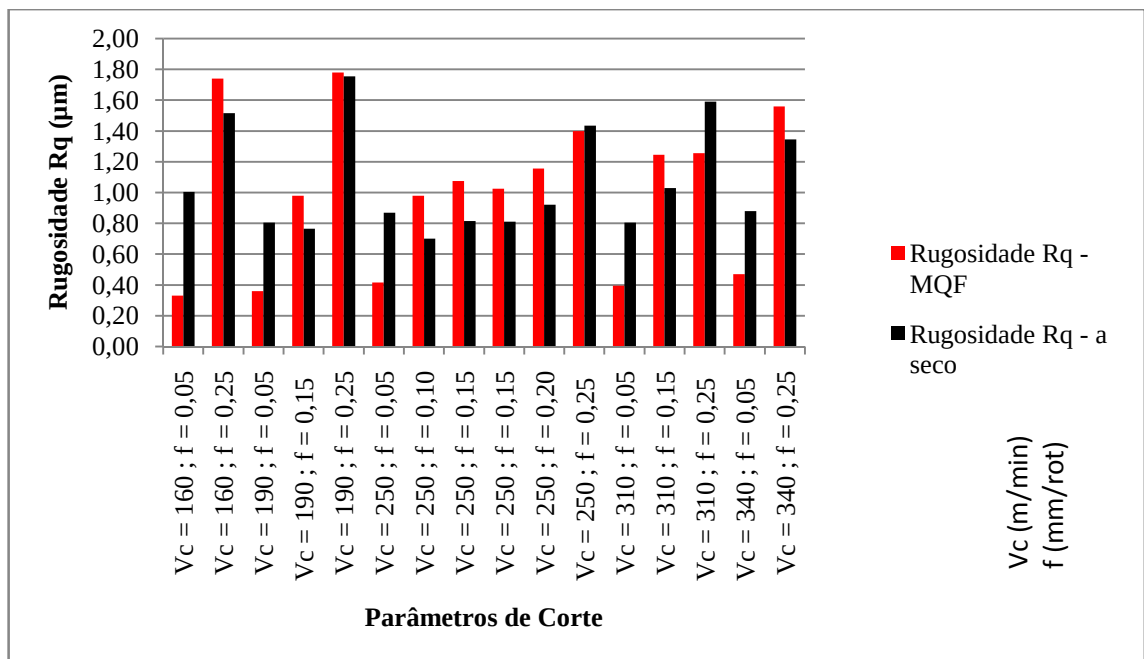


Figura 4.7 Rugosidade R_q com MQF e a seco

Os parâmetros de corte que utilizam o menor avanço de 0,05 mm/rev apresentaram rugosidade bem menor, independentemente se R_a , R_z ou R_q , como era esperado, uma vez que o avanço, juntamente com o raio de ponta da ferramenta (que neste caso foi constante), é a variável mais influente no acabamento superficial (MACHADO *et al.*, 2011). Este fenômeno fica mais evidente para $V_c = 250$ m/min, pois possui uma faixa

maior de avanços testados. Nota-se que, conforme aumenta o avanço para uma mesma velocidade de corte, aumenta também os valores da rugosidade. Nestes menores avanços de 0,05 mm/rev observa-se também que a condição MQF sempre apresentou parâmetros de rugosidade menores que a condição a seco. Exceto nos ensaios número 5 e 14, que mesmo tendo avanço elevado ($f = 0,25$ mm/rev), a média das rugosidades obteve valores próximos e a rugosidade com MQF é menor do que os valores da rugosidade nos ensaios a seco. O inverso acontece para os valores de avanço elevados, que obtiveram valores menores de rugosidade nos ensaios a seco do que os ensaios utilizando MQF (MACHADO *et al.*, 2011).

Dhar *et al.* (2006) ao usinar o aço AISI 4340 com o método MQF também observou uma redução significativa na taxa de desgaste e uma melhora na rugosidade por causa do efeito que o MQF causou, principalmente pela redução da temperatura, na zona de corte, favorecendo à interação entre cavaco-ferramenta e ferramenta-peça. Por causa do menor desgaste adquirido com o MQF, a rugosidade também obteve valores melhores, como por exemplo, com uma velocidade de corte de 110 m/min, um avanço de 0,16 mm/rev e uma profundidade de corte de 1,5 mm, a condição de MQF conseguiu uma rugosidade R_a com valor máximo de $4,5 \mu\text{m}$ após 45 minutos de usinagem, enquanto que a rugosidade para a condição a seco atingiu o valor de $5,25 \mu\text{m}$ e a para o método utilizando jorro convencional obteve o maior valor de rugosidade, igual a $6,0 \mu\text{m}$ (DHAR *et al.*, 2006). Estes resultados implicam que devido a redução do desgaste da ferramenta, houve uma melhora no acabamento superficial.

Com o aumento da vida da ferramenta, permitiria velocidades de corte e avanços superiores, aumentando assim a produtividade. Entretanto, vale ressaltar que o aumento da velocidade de corte combinado com o aumento do avanço faz com que a velocidade de avanço também seja maior, resultando num maior valor de desgaste, portanto mesmo para os avanços com valor de 0,05 mm/rev, conforme aumenta a velocidade de corte, aumenta também o valor das rugosidades (R_a , R_z e R_q). Mais detalhes sobre a diferença entre os parâmetros de rugosidade encontram-se na seção 2.7.

4.1 Resultados e Discussões com MQF Aplicado em Outras Direções

Todos os resultados apresentados até o momento foram dos ensaios realizados com MQF na direção da superfície de folga principal (mostrado na Figura 2.14). Porém este trabalho também complementou seus estudos realizando alguns experimentos mudando a

direção de aplicação do MQF, sendo nas direções sobre-cabeça e na superfície de folga secundária. Das condições de corte apresentadas na Tabela 3.3, foram escolhidos seis parâmetros de corte para realizar tais experimentos. Os critérios para a seleção destas condições foram às observações dos resultados nos ensaios anteriores, sendo selecionados os parâmetros de corte que apresentaram resultados de desgaste e rugosidade bem diferentes quando comparados com as mesmas condições da usinagem a seco. Também houve uma tentativa de testar as condições mais extremas, isto é, condições que exigissem grandes esforços de corte com outras que exigissem menos esforços da máquina-ferramenta. Portanto, houve uma tentativa de mesclar velocidade de corte e avanço com valores baixos e elevados. As condições escolhidas são apresentadas na Tabela 4.5.

Tabela 4.5 Condições de corte utilizadas para os ensaios com MQF nas direções sobre-cabeça e na superfície de folga secundária

Ensaio	Velocidade de Corte (m/min)	Avanço (mm/rev)
1	160	0,05
6	250	0,05
11	250	0,25
12	310	0,05
15	340	0,05
16	340	0,25

As Tabelas 4.6 e 4.7 mostram os resultados obtidos para os ensaios realizados com MQF direcionado na posição sobre-cabeça (teste e réplica) e as Tabelas 4.8 e 4.9, mostram os resultados para os ensaios com MQF na direção da superfície de folga secundária (teste e réplica). Lembrando que, para obter os valores de desgaste, das rugosidades e das forças, a metodologia empregada foi a mesma descrita anteriormente.

Com relação aos desgastes apresentados, observa-se que os maiores valores de VB_{Bmax} apresentados foram 0,35 mm e 0,29 mm para os ensaios com MQF na direção sobre-cabeça e superfície de folga secundária, respectivamente. Se comparar estes resultados com os obtidos anteriormente (com MQF na direção de folga principal), observa-se que são valores próximos, não havendo condições de afirmar se há ou não uma direção que tenha um resultado mais satisfatório que as outras.

Tabela 4.6 Resultados obtidos nos testes com MQF aplicado na direção sobre-cabeça

Ensaio – MQF Sobre-cabeça									
Ensaio	Vel. De Corte (m/min)	Avanço (mm/rev)	Rugosidade			Forças			Desgaste
			Ra	Rz	Rq	Fx	Fy	Fz	VB _{Bmax} (mm)
1	160	0,05	0,26	1,60	0,39	15,08	6,05	16,39	0,15
6	250	0,05	0,31	1,77	0,37	13,37	0,72	11,72	0,21
11	250	0,25	0,91	4,52	1,06	24,30	2,41	8,47	0,13
12	310	0,05	0,35	2,02	0,41	21,76	3,31	16,50	0,18
15	340	0,05	0,44	2,42	0,58	11,91	14,81	23,77	0,26
16	340	0,25	1,00	5,01	1,20	21,30	4,27	4,32	0,21

Tabela 4.7 Resultados obtidos nas réplicas com MQF aplicado na direção sobre-cabeça

Réplicas – MQF Sobre-cabeça									
Ensaio	Vel. De Corte (m/min)	Avanço (mm/rev)	Rugosidade			Forças			Desgaste
			Ra	Rz	Rq	Fx	Fy	Fz	VB _{Bmax} (mm)
1	160	0,05	0,30	1,55	0,41	13,60	5,12	11,25	0,13
6	250	0,05	0,35	1,74	0,44	13,84	0,85	13,22	0,16
11	250	0,25	0,88	4,39	1,02	25,22	2,18	7,52	0,14
12	310	0,05	0,33	2,00	0,48	22,45	3,99	18,74	0,26
15	340	0,05	0,40	2,35	0,70	13,54	18,08	24,51	0,35
16	340	0,25	0,99	4,89	1,18	20,24	3,99	1,98	0,19

Tabela 4.8 Resultados obtidos nos testes com MQF aplicado na direção da superfície de folga secundária

Ensaio – MQF Superfície Folga Secundaria									
Ensaio	Vel. De Corte (m/min)	Avanço (mm/rev)	Rugosidade			Forças			Desgaste
			Ra	Rz	Rq	Fx	Fy	Fz	VB _{Bmax} (mm)
1	160	0,05	0,28	1,46	0,31	12,10	2,86	9,40	0,14
6	250	0,05	0,40	2,25	0,40	10,88	0,32	16,02	0,17
11	250	0,25	1,11	5,29	1,30	24,90	5,54	43,44	0,17
12	310	0,05	0,36	1,99	0,38	11,97	13,21	5,33	0,27
15	340	0,05	0,49	2,59	0,58	30,35	6,28	26,31	0,26
16	340	0,25	0,86	4,27	1,12	26,47	10,93	46,42	0,17

Tabela 4.9 Resultados obtidos nas réplicas com MQF aplicado na direção da superfície de folga secundária

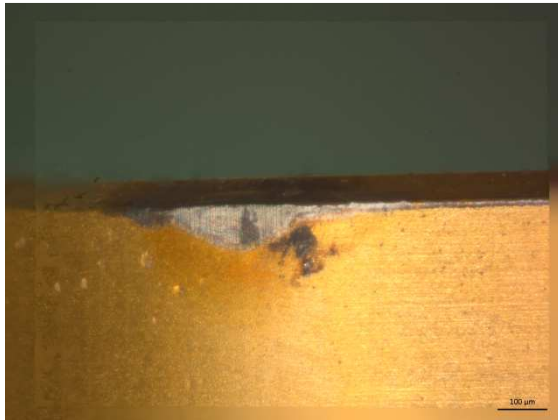
Réplicas – MQF Superfície Folga Secundária									
Ensaio	Vel. De Corte (m/min)	Avanço (mm/rev)	Rugosidade			Forças			Desgaste
			Ra	Rz	Rq	Fx	Fy	Fz	VB _{Bmax} (mm)
1	160	0,05	0,32	1,50	0,33	13,02	4,16	11,70	0,15
6	250	0,05	0,39	2,28	0,39	11,64	0,92	13,00	0,17
11	250	0,25	1,14	5,33	1,28	25,73	6,23	44,90	0,17
12	310	0,05	0,38	1,97	0,43	16,18	18,08	15,77	0,29
15	340	0,05	0,53	2,45	0,60	32,95	3,98	20,92	0,25
16	340	0,25	0,90	4,30	1,15	26,05	7,99	46,73	0,20

Como feito anteriormente, após a observação dos valores obtidos com relação ao desgaste das ferramentas, a Figura 4.8 ilustra este desgaste de flanco das ferramentas utilizadas para os testes e réplicas dos ensaios com MQF na direção sobre-cabeça e superfície secundária de folga.

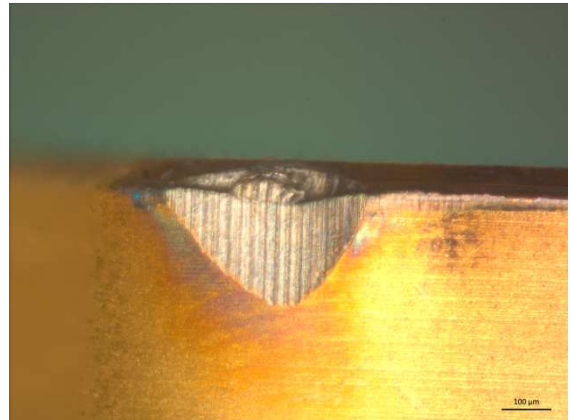
Fica evidente que, mesmo utilizando uma direção diferente para a aplicação do MQF, o padrão de desgaste desta ferramenta ao usinar este tipo de material endurecido é semelhante para todas as direções. Observe que o padrão do desgaste também é o mecanismo abrasivo, onde são formados sulcos parecendo “linhas paralelas” na área desgastada. Próximo da região desgastada é possível observar uma coloração diferente do revestimento da ferramenta, isto se deve pelo gradiente da temperatura devido ao calor gerado durante a usinagem.

A imagem (d) apresenta o que parece ser material aderido na região da aresta desgastada, lembrando que todas as ferramentas foram limpas superficialmente com algodão e álcool etílico 70%. Mesmo tendo o maior tempo de usinagem, o desgaste da imagem (a) foi o menor, com $VB_{Bmax} = 0,14$ mm, mostrando que a velocidade de avanço é o maior influente para a taxa de desgaste. A imagem (e) é possível detectar o início de uma falha na aresta de corte bem no meio da região de desgaste.

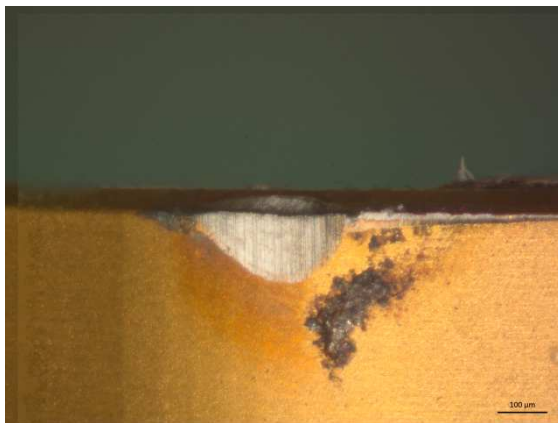
A Figura 4.9 mostra o gradiente de temperatura da mesma aresta de corte da imagem (e) da Figura 4.8.



(a) $V_c = 160$ m/min; $f = 0,05$ mm/rev;
 $a_p = 0,05$ mm; $VB_{Bmax} = 0,14$ mm



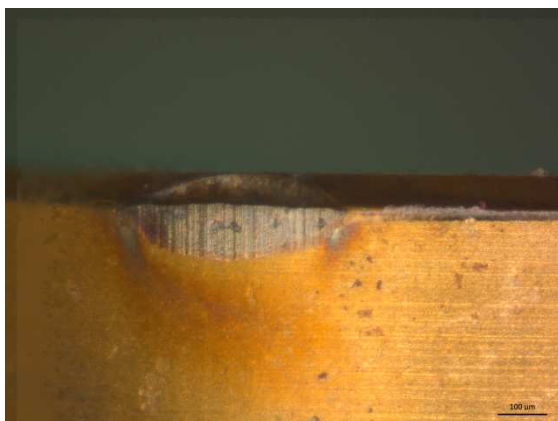
(d) $V_c = 340$ m/min; $f = 0,05$ mm/rev;
 $a_p = 0,05$ mm; $VB_{Bmax} = 0,26$ mm



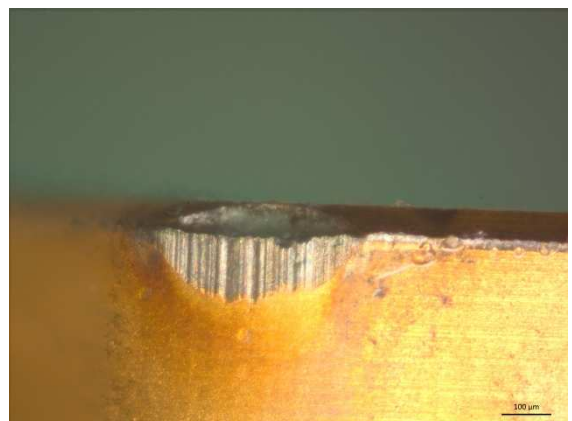
(b) $V_c = 250$ m/min; $f = 0,05$ mm/rev;
 $a_p = 0,05$ mm; $VB_{Bmax} = 0,17$ mm



(e) $V_c = 310$ m/min; $f = 0,05$ mm/rev;
 $a_p = 0,05$ mm; $VB_{Bmax} = 0,27$ mm



(c) $V_c = 250$ m/min; $f = 0,25$ mm/rev;
 $a_p = 0,05$ mm; $VB_{Bmax} = 0,17$ mm



(f) $V_c = 340$ m/min; $f = 0,25$ mm/rev;
 $a_p = 0,05$ mm; $VB_{Bmax} = 0,17$ mm

Figura 4.8 Desgaste das ferramentas usadas nos ensaios com MQF aplicado na direção da superfície de folga secundária

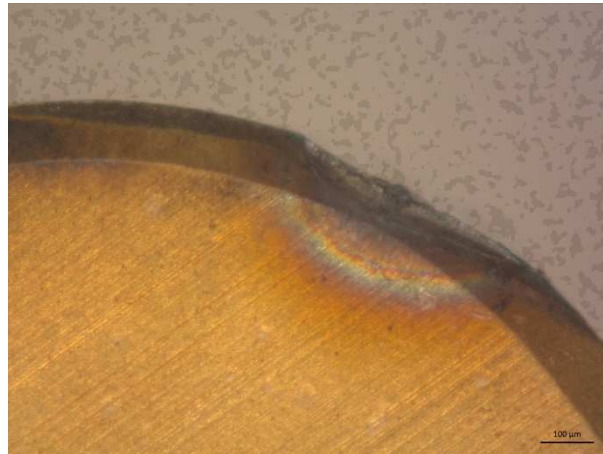


Figura 4.9 Visualização do Gradiente de Temperatura da ferramenta utilizada nos testes com $V_c = 310$ m/min; $f = 0,05$ mm/rev; $a_p = 0,05$ mm; $VB_{Bmax} = 0,27$ mm

Os resultados gráficos dos desgastes medidos com MQF nas direções sobre-cabeça e superfície de folga secundária apresentados nas Tabelas 4.6 a 4.9 são ilustrados nas Figuras 4.10 e 4.11, respectivamente.

Observa-se boa repetitividade nos resultados para os padrões de usinagem, com valores de desgaste obtidos nos ensaios e réplicas muito próximos entre si. As Figuras 4.12 e 4.13 mostram os resultados na forma de taxa de desgaste para os ensaios e réplicas com MQF nas direções sobre-cabeça e superfície de folga secundária, respectivamente. A repetitividade se mostra presente também nestes resultados. Este quesito permite inferir que os erros sistemáticos não existiram ou tiveram pouco efeito, nos ensaios experimentais, indicando que os resultados obtidos possuem um alto valor significativo. Analisando as figuras com o desgaste das ferramentas observa-se que a direção sobre-cabeça obteve valores um pouco maiores de desgaste se comparado com o desgaste das ferramentas utilizadas com MQF na direção de folga secundária.

Talvez pela direção de aplicação, a nuvem de “spray” com o fluido de corte não consiga atingir a região da zona de cisalhamento pelo fato de que, possivelmente, possa estar atingindo mais aos cavacos que estão sendo gerados pela usinagem do que de fato na região entre a peça e a ferramenta. Porém, esta diferença não significa que a direção de aplicação da superfície secundária de folga seja melhor do que a direção de aplicação sobre-cabeça. Tanto que os valores de desgaste, apesar de diferentes, são bem próximos e possuem uma mesma tendência ao fazer a análise observando os parâmetros de corte.

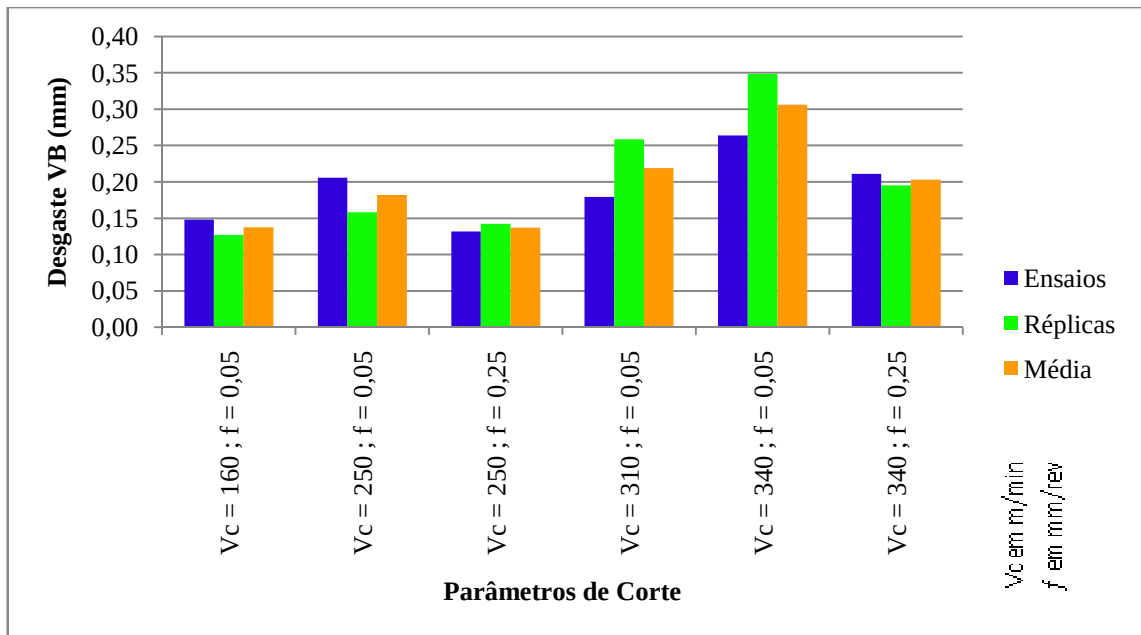


Figura 4.10 Desgaste das ferramentas de corte com MQF na direção sobre-cabeça

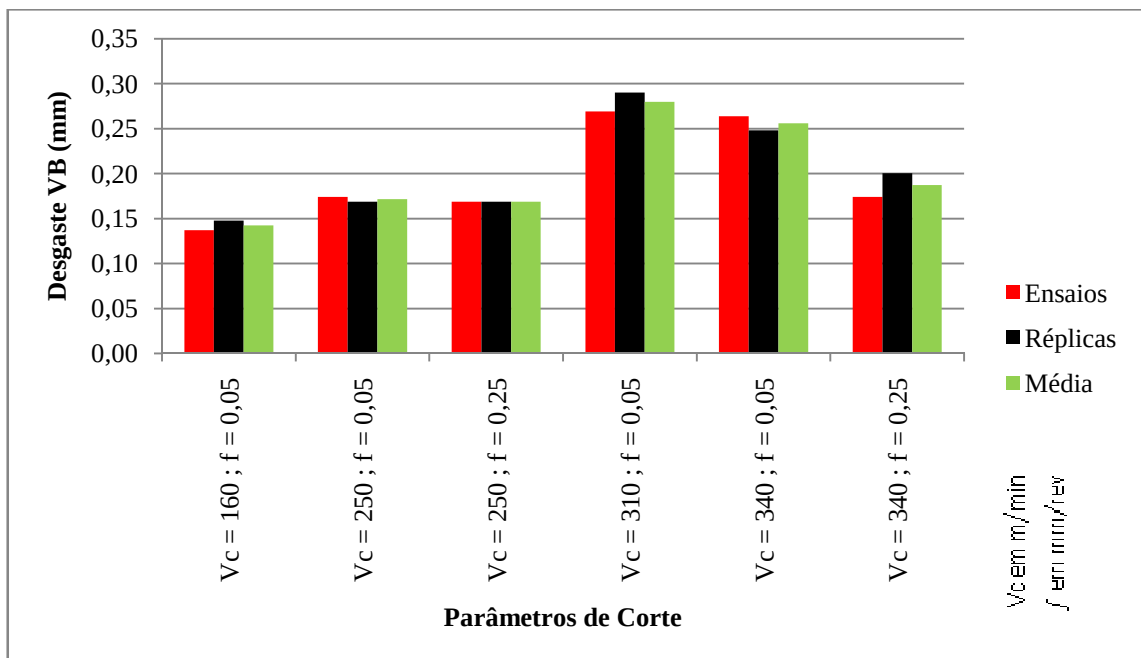


Figura 4.11 Desgaste das ferramentas de corte com MQF na direção da superfície de folga secundária

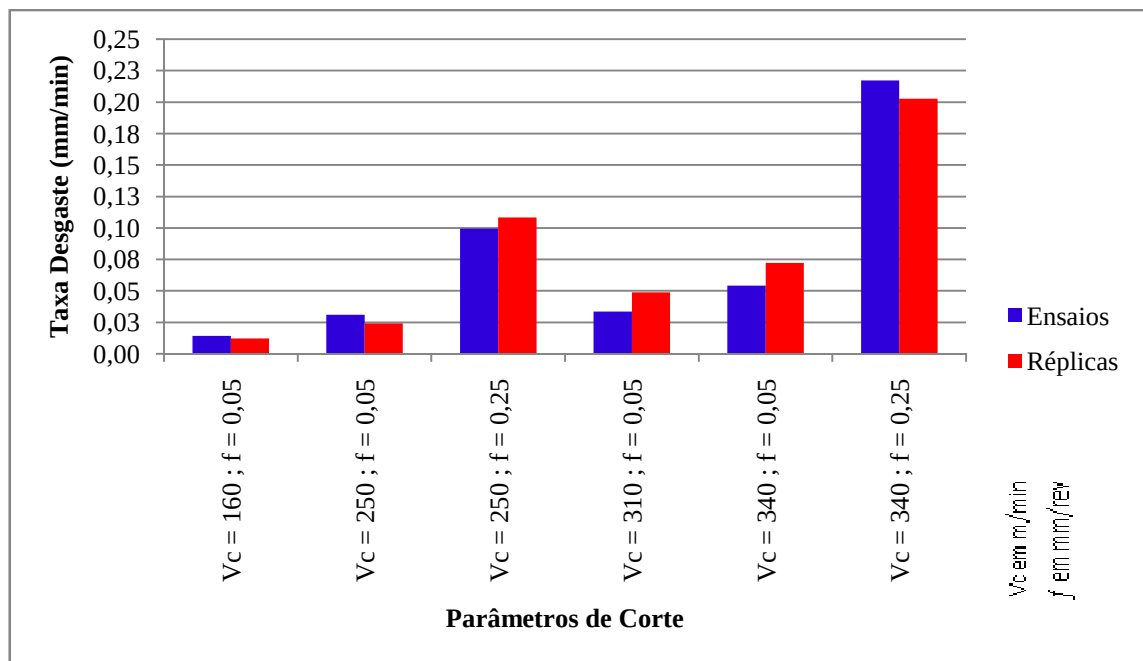


Figura 4.12 Taxa de desgaste das ferramentas de corte com MQF na direção sobre-cabeça

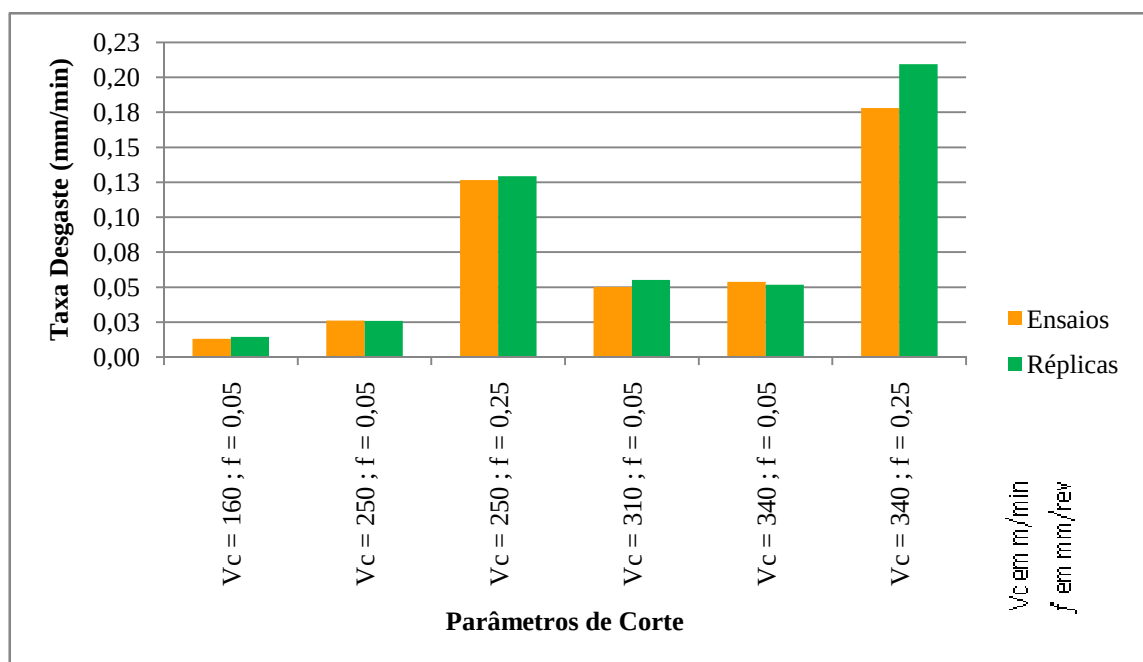


Figura 4.13 Taxa de desgaste das ferramentas de corte com MQF na direção da superfície de folga secundária

Analisando os gráficos da taxa de desgaste, novamente se vê a influência nítida que os parâmetros velocidade de corte (V_c) e avanço (f) têm sobre o desgaste das ferramentas. Quanto maior a velocidade de corte maior a taxa de desgaste das ferramentas. Para o

avanço menor de 0,05 mm/rev, a taxa de desgaste é bem menor do que para o maior avanço de 0,25 mm/rev, mesmo tendo seu tempo efetivo de corte maior.

Com o objetivo de complementar o trabalho, a Figura 4.14 mostra a comparação do desgaste da ferramenta na usinagem a seco, aplicando MQF na superfície de folga, nas condições de corte utilizadas para aplicação do MQF sobre-cabeça e na superfície de folga secundária.

Observa-se que para os parâmetros de corte escolhidos, a condição a seco demonstrou um maior desgaste para a ferramenta, na maioria dos casos, ou melhor, sempre que o avanço possuir o valor de 0,05 mm/rev. Coincidentemente, são as mesmas condições que possuem as menores taxas de desgaste ao utilizar MQF.

Pesquisas mostram que a temperatura na ferramenta é afetada, na grande maioria dos casos, pela velocidade de corte, enquanto que a profundidade de corte e a velocidade de avanço não têm características tão severas assim (WANG e LIU, 1999). Talvez por isso, para velocidades maiores combinadas com avanços elevados, o desgaste da ferramenta na condição a seco tenha obtido melhores resultados, afinal sua temperatura foi possivelmente maior, facilitando o cisalhamento do material (ABRÃO, 1995).

Com relação à aplicação do MQF em diferentes posições, com exceção do ensaio 16, o desgaste se mostrou com resultados bem próximos, independente da direção aplicada. Para os seis testes realizados, a direção de aplicação sobre-cabeça obteve um desgaste maior em três destas condições. Isso se deve pela dificuldade maior que a nuvem de fluido de corte encontra para atingir a região do corte, pelo fato de estar posicionado em uma direção (ângulo de 90° entre a direção da nuvem de MQF e a superfície da ferramenta) que atinge mais a região de saída do cavaco e a peça do que a zona de cisalhamento.

Vale lembrar que a área de contato peça-ferramenta é pequena, com profundidade de corte (a_p) igual a 0,05 mm, e portanto, o MQF atingiria toda esta área independente da direção de aplicação. Mas mesmo levando em consideração esta observação, a dificuldade de atingir a zona de corte para o MQF na direção sobre-cabeça é maior que nas direções de superfície de folga principal e secundária.

Após o gráfico (Figura 4.14) é feita a discussão e a interpretação dos resultados apresentados.

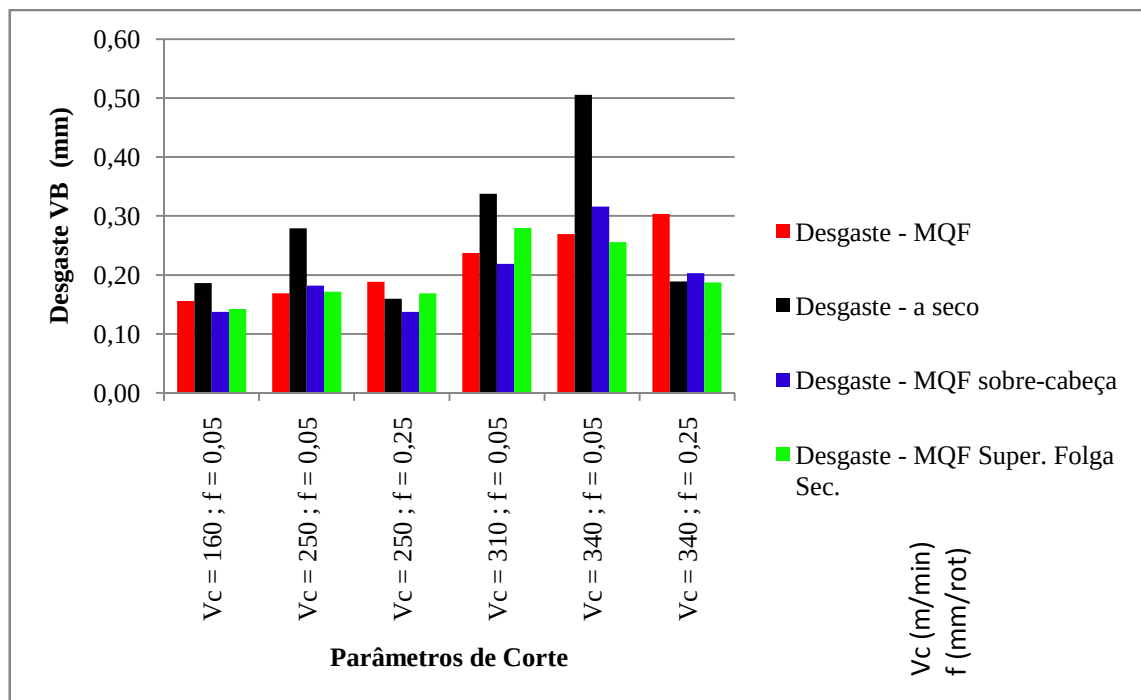


Figura 4.14 Desgaste da ferramenta de corte com MQF na superfície de folga, superfície de folga secundária, sobre-cabeça e a seco

Até o momento, fica claro que há certa influência do fluido de corte no processo de usinagem deste tipo de material, devido à comparação com os resultados obtidos no processo a seco. A maior parte das condições de corte utilizando MQF teve um desgaste menor que o corte a seco, demonstrando o efeito benéfico que se propôs o fluido para este tipo de material (Figura 4.14). Vale lembrar que o método de aplicação também teve sua participação, uma vez que a nuvem de MQF, neste processo com este tipo de material, tem uma função mais lubrificante do que refrigerante, na tentativa de não atrapalhar o cisalhamento do material.

No entanto, a direção de aplicação do MQF parece não ter relação entre si, de acordo com os resultados. Mesmo variando a direção, com os mesmos parâmetros de corte, os resultados obtidos com os experimentos verificaram um mesmo padrão, tanto no desgaste da ferramenta, quanto nas rugosidades e taxa de desgaste.

4.2 Avaliação dos Mecanismos de Desgaste das Ferramentas de Corte

O objetivo de analisar as ferramentas de corte através do microscópio eletrônico de varredura (MEV) é verificar os mecanismos de desgastes (descritos na seção 2.5.1) que atuam nas ferramentas durante o processo de usinagem. Foram produzidas imagens de

algumas destas ferramentas onde é possível detalhar estes mecanismos de desgaste. A Tabela 4.10 apresenta a relação das imagens produzidas pelo MEV de algumas das ferramentas de corte, as quais detalham os mecanismos de desgaste. Lembrando que as ferramentas utilizadas para a obtenção das imagens foram limpas com o auxílio de algodão e de álcool etílico 70%.

Tabela 4.10 Tabela da lista de imagens do MEV – microscópio eletrônico de varredura

Imagem	Descrição	Parâmetros de Corte		
		V_c (m/min)	f (mm/rev)	Desgaste (mm)
Figura 4.15	Ferramenta 4, Aresta 4	310	0,05	0,27
Figura 4.16	Ferramenta 5, Aresta 2	340	0,05	0,17
Figura 4.17	Ferramenta 9, Aresta 2	310	0,05	0,18
Figura 4.18	Ferramenta 9, Aresta 6	310	0,15	0,19
Figura 4.19	Ferramenta 10, Aresta 8	340	0,05	0,26
Figura 4.20	Ferramenta 7, Aresta 1	250	0,05	0,21

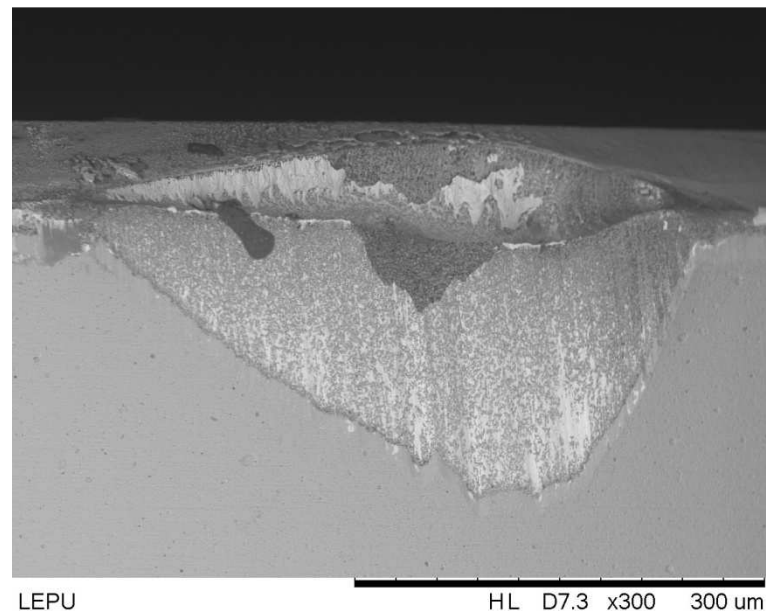


Figura 4.15 MQF aplicado na direção da superfície de folga secundária. Ferramenta 4, Aresta 4; $V_c = 310$ m/min, $f = 0,05$ mm/rev, $VB_{Bmax} = 0,27$ mm

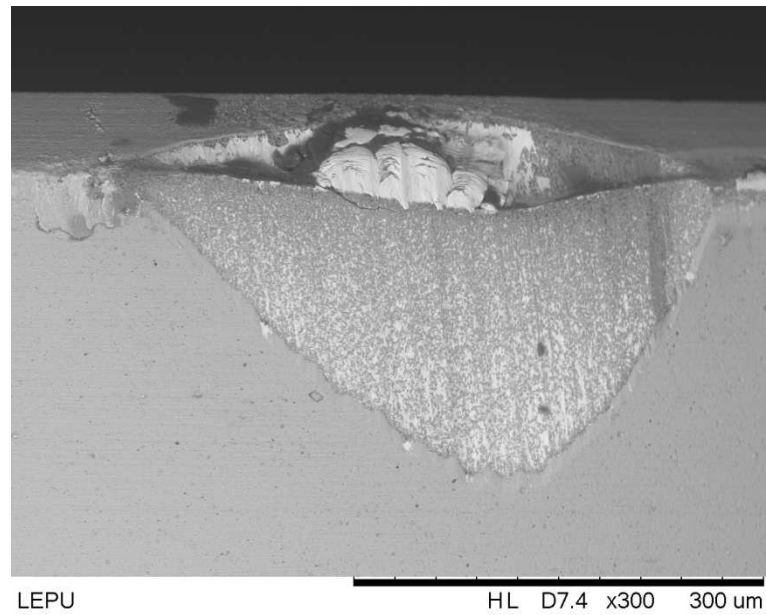


Figura 4.16 MQF aplicado na direção da superfície de folga secundária. Ferramenta 5, Aresta 2; $V_c = 340$ m/min, $f = 0,05$ mm/rev, $VB_{Bmax} = 0,17$ mm

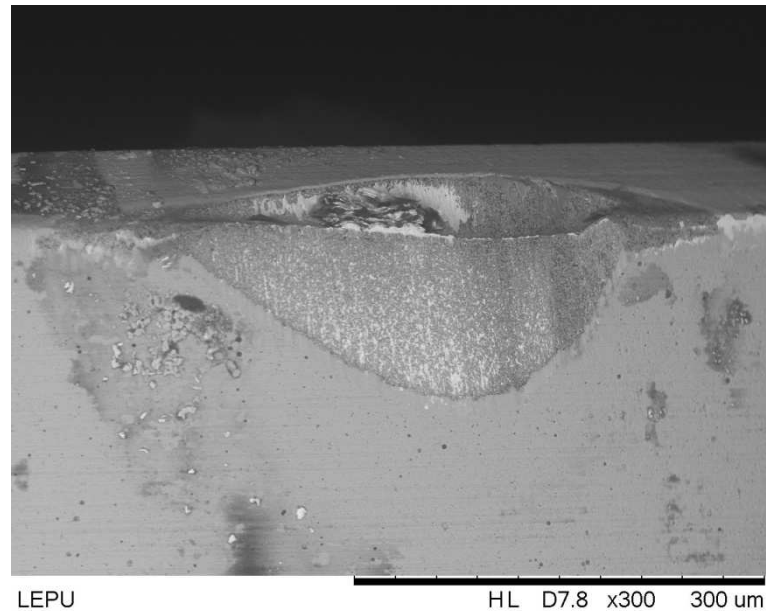


Figura 4.17 MQF aplicado na direção sobre-cabeça. Ferramenta 9, Aresta 2; $V_c = 310$ m/min, $f = 0,05$ mm/rev, $VB_{Bmax} = 0,18$ mm

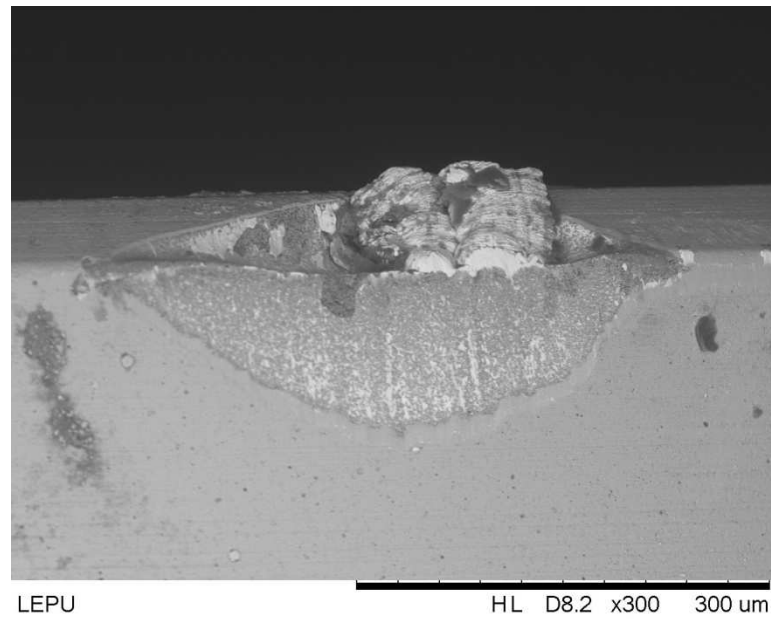


Figura 4.18 MQF aplicado na direção da superfície de folga principal. Ferramenta 9, Aresta 6;
 $V_c = 310 \text{ m/min}$, $f = 0,15 \text{ mm/rev}$, $VB_{B_{\max}} = 0,19 \text{ mm}$

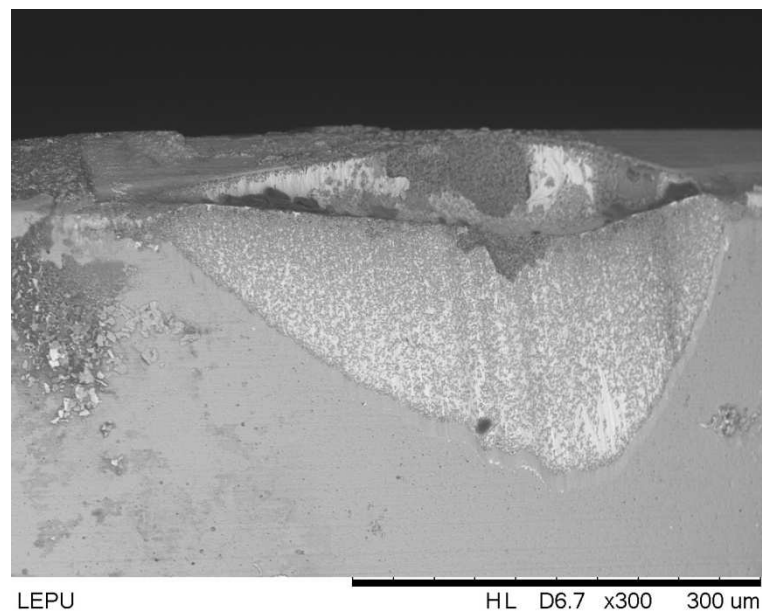


Figura 4.19 MQF aplicado na direção sobre-cabeça. Ferramenta 10, Aresta 8, $V_c = 340 \text{ m/min}$,
 $f = 0,05 \text{ mm/rev}$, $VB_{B_{\max}} = 0,26 \text{ mm}$

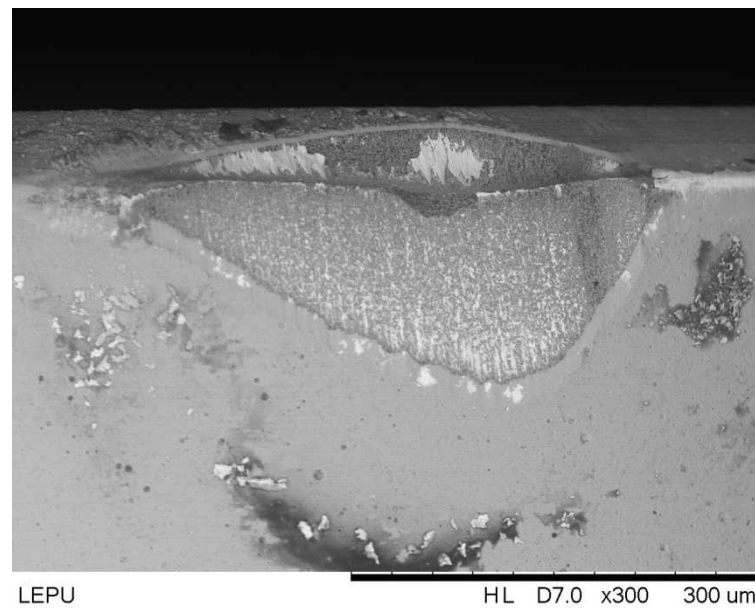


Figura 4.20 MQF aplicado na direção sobre-cabeça. Ferramenta 7, Aresta 1, $V_c = 250$ m/min, $f = 0,05$ mm/rev, $VB_{Bmax} = 0,21$ mm

Observando detalhadamente as imagens das ferramentas utilizadas nos testes da Tabela 4.10, pode-se concluir:

Notam-se nitidamente marcas de abrasão em todas as imagens adquiridas através do MEV (sulcos paralelos, isto é, linhas paralelas similares a marcas de “unhas” riscando a superfície). Como previsto anteriormente na seção 2.5.1, isto se deve ao elevado teor de elementos formadores de carbonetos duros, presentes na microestrutura do aço endurecido. Lahiff *et al.* (2007) mostra que existem quatro mecanismos de desgaste que mais atuam no torneamento de peças endurecidas, sendo estes o mecanismo de abrasão, adesão (*attrition*), difusão e reação química. Além disso, os autores ainda afirmam que aços contendo grande quantidade de carbonetos são propensos a desgastar mais as ferramentas, e ainda constatarem que ferramentas com baixo teor de CBN tem melhor desempenho do que ferramentas com alto teor de CBN (HUANG *et al.*, 2007). As figuras obtidas no MEV mostram também muito material aderido na região de desgaste, sendo mais evidente nas Figuras 4.16, 4.17 e 4.18. Isto é um bom indicativo da possibilidade do mecanismo de desgaste por adesão (*attrition*) estar presente. Neste caso, este mecanismo libera partículas duras de CBN, que podem atuar como fontes de partículas para a abrasão. Yallese *et al.* (2009) constatou que durante o torneamento de peças duras

utilizando a ferramenta CBN, usinando a baixas velocidades de corte, o mecanismo de desgaste predominante é o abrasivo, enquanto que para velocidades mais altas além do mecanismo de desgaste abrasivo também aparece o mecanismo de desgaste difusivo, ou seja, quando aumenta-se a velocidade de corte, o desgaste de flanco da ferramenta também aumenta, levando assim a degradação da qualidade da superfície da peça. Portanto, em velocidades de corte maiores não se descarta a possibilidade do mecanismo de difusão, pois as elevadas temperaturas presentes na interface cavaco-ferramenta, podendo ultrapassar 1.100 °C para o aço estudado, criam ambientes propícios para este mecanismo de desgaste (SANTOS; SALES, 2007).

Para uma conclusão precisa da presença do desgaste difusivo exigiriam análises mais aprofundadas, com retirada do material da peça aderido da região desgastada (com uso de ácido apropriado), o que não foi feito nesta análise.

No entanto, dificilmente um mecanismo de desgaste irá atuar isoladamente. O que acontece é que nestas condições de corte, um pode predominar sobre o outro, mas de fato todos são importantes. Existem evidências de que, no mínimo, dois mecanismos de desgaste foram atuantes pra tais condições de corte (abrasivo e adesivo), não descartando a possibilidade do mecanismo de difusão.

4.3 Análise Estatística para os Resultados

Nesta etapa os dados experimentais obtidos são analisados através do software *Statistica*®. Esta análise consiste em um teste comparativo entre as médias, englobando todas as respostas individualizadas. Este software utiliza um modelo matemático, onde este será válido caso o teste de significância seja inferior a 5% ou o grau de correlação superior a 90%.

Como as condições de corte apresentadas na Tabela 3.3 não representam um PCC (Planejamento Composto Central), os dados coletados serão tratados através de uma regressão múltipla, onde primeiro é feito a adimensionalização das variáveis V_c e f , para posteriormente verificar a influência de cada uma dessas variáveis com os resultados obtidos. Velocidade de corte e avanço são as variáveis de entrada, representadas por X_1 e X_2 , respectivamente; rugosidade (R_a , R_z e R_q), força (F_x , F_y e F_z) e desgaste são as variáveis de saída.

A Tabela 4.11 mostra os coeficientes de regressão do modelo completo que representa o desgaste em função das variáveis V_c e f , e suas interações, com relação aos resultados obtidos para o desgaste VB_{Bmax} para os ensaios. Este modelo inclui os fatores significativos e não significativos. No caso particular do desgaste, todos os fatores foram significativos ($p \leq 0,05$).

Em seguida, a Figura 4.21 mostra o gráfico dos resíduos que indica se há ou não tendência nos resultados, isto é, análise dos resíduos é fundamental na qualidade de qualquer modelo, pois um modelo que deixa resíduos consideráveis é um modelo ruim. Nota-se pelo gráfico que a distribuição dos resíduos é aleatória, provando que o modelo não apresenta um resultado tendencioso, sendo adequado para confirmar as variações nesta faixa experimental. A Figura 4.22 apresenta o gráfico da superfície de resposta comparando V_c , f e VB_{Bmax} , conforme modelo apresentado pela Tabela 4.11.

Observa-se que o grau de correlação (R^2) entre a velocidade de corte e o avanço para este tratamento obteve um valor igual a 0,9825; valor considerado muito bom quando se trata de mais de uma variável.

Para a regressão múltipla realizada na Tabela 4.11 foi utilizado a relação de 11 experimentos dos 16 realizados ($N = 11$), sendo feito um “outlier” de cinco ensaios (sendo as condições de corte 3, 6, 8, 14 e 16). “outlier” é quando se observa que os valores obtidos que não são significativos, e estes atrapalham o valor do grau de correlação, ao detectar quais testes possuem estes valores, então os mesmos podem ser retirados da análise, ou seja, isto ocorre porque os valores obtidos para estas condições não foram significativos para o grau de correlação entre V_c e f .

Estatisticamente, realizar o “outlier” não atrapalha no resultado final, pelo contrário, ele ajuda a não danificar toda uma bateria de testes apenas por alguns que tenham, possivelmente, algum tipo de erro sistemático.

Sendo assim, ao realizar o “outlier” o valor de R^2 obteve quase que 99%, chegando-se a um modelo mais simplificado contendo apenas os ensaios significativos para o tratamento estatístico dos dados, demonstrando que o modelo é adequado para representar o desgaste da ferramenta.

Tabela 4.11 Coeficientes de regressão múltipla – desgaste – Ensaio com MQF

Regression Summary for Dependent Variable: Vb (Miguel - alisson-Adimensional-outliervb2) R= .99119642 R²= .98247034 Adjusted R²= .96494068 F(5,5)=56.046 p<.00022 Std.Error of estimate: .00764						
N=11	Beta	Std.Err. of Beta	B	Std.Err. of B	t(5)	p-level
Intercept			0,216779	0,004089	53,02097	0,000000
X1	0,303688	0,092817	0,012066	0,003688	3,27192	0,022151
X2	-0,547118	0,093072	-0,013844	0,002355	-5,87847	0,002023
X1X2	-0,688146	0,085917	-0,016065	0,002006	-8,00940	0,000490
X1X1	-0,400520	0,090823	-0,017539	0,003977	-4,40989	0,006957
X2X2	-0,237483	0,073534	-0,005069	0,001569	-3,22956	0,023217

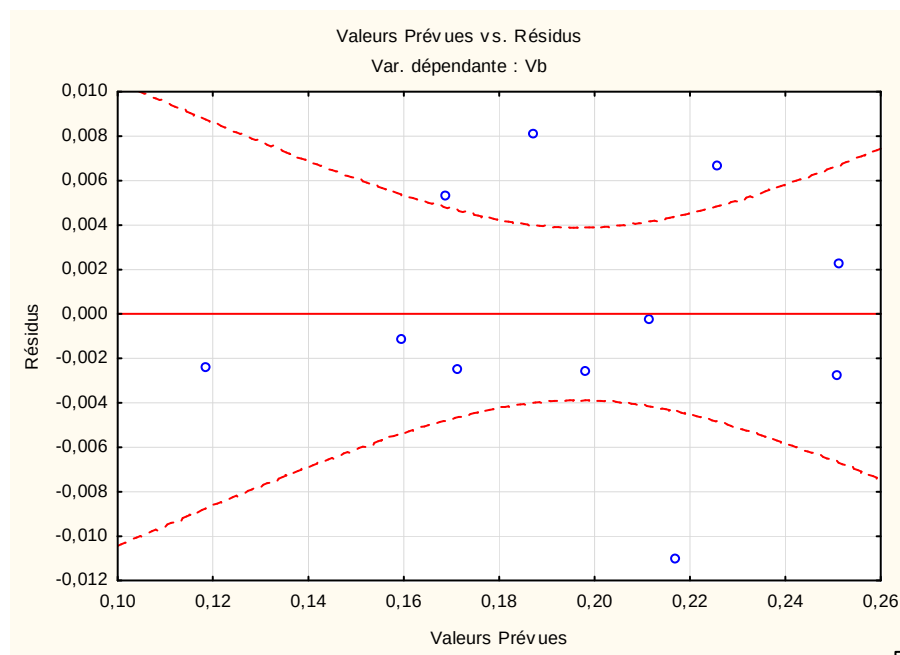


Figura 4.21 Gráfico de distribuição dos resíduos pelos valores previstos – desgaste

Através dos coeficientes de regressão, análise de resíduos e da superfície de resposta para o desgaste pode-se concluir que os fatores velocidade de corte e avanço influenciam diretamente para o desgaste da ferramenta (MACHADO *et al.*, 2011), inclusive a interação entre estes dois fatores é significativa para o resultado de desgaste.

A mesma análise feita para o desgaste da ferramenta através da regressão múltipla foi também realizada para as variáveis de resposta rugosidade (R_a , R_z , R_q) e força (F_x , F_y , F_z). Esta duas variáveis possuem três componentes de estudo. Para facilitar o tratamento dos

dados, os parâmetros de rugosidade foram analisados juntos. Além disso, os valores utilizados foram às médias entre os ensaios e as réplicas realizadas.

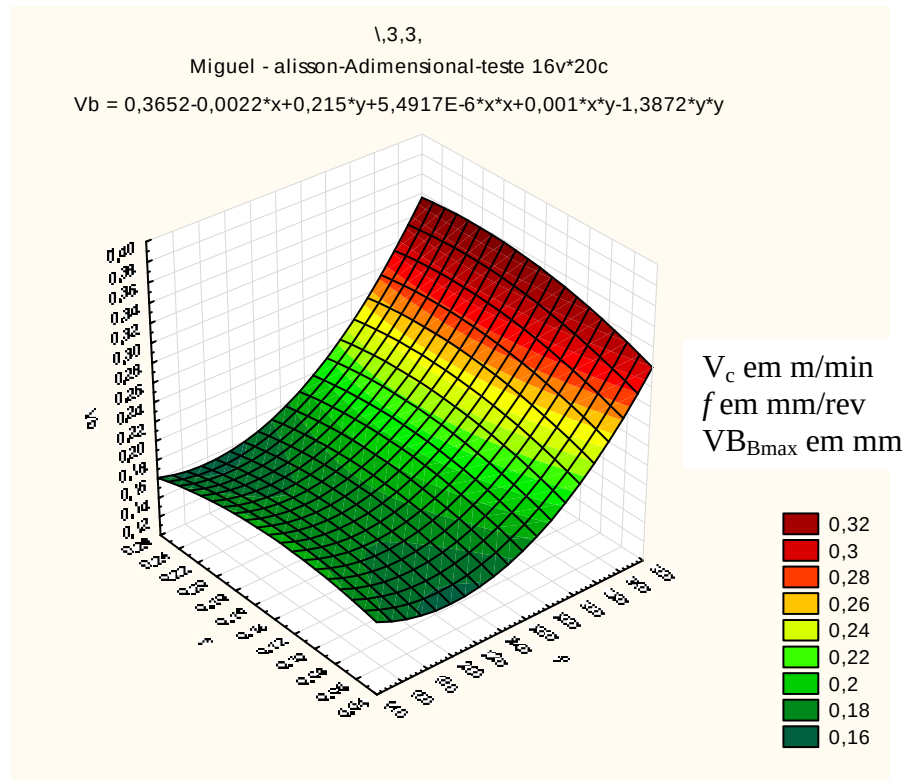


Figura 4.22 Superfície de resposta para o desgaste obtido nos ensaios

Com isso consegue-se uma relação direta entre as variáveis V_c e f e suas interações com a variável de resposta rugosidade. O mesmo foi feito com a força, pois possui também três componentes e os valores utilizados foram às médias entre os ensaios e as réplicas.

A Tabela 4.12 mostra os coeficientes de regressão do modelo que representa a rugosidade (R_a , R_z , R_q) em função dos parâmetros V_c e f (efeitos lineares, quadráticos e suas interações), representados por X1 e X2, respectivamente, para os ensaios realizados utilizando MQF. Este modelo inclui os fatores significativos e não significativos.

A Figura 4.23 apresenta a distribuição dos resíduos relacionados com a rugosidade. Nota-se novamente que a distribuição segue um padrão aleatório não sendo tendenciosa, demonstrando que o modelo analisado é ideal para a atual faixa de experimentos.

O grau de correlação (R^2) entre V_c e f para a resposta rugosidade foi significativa, com valor igual a 0,9945. Novamente foi possível simplificar o modelo realizando o “outlier” de três condições de corte (sendo eles, ensaio 7, 10 e 13), portanto $N = 13$.

Tabela 4.12 Coeficientes de regressão múltipla – rugosidade – ensaio com MQF

Synthèse de la Régression; Variable Dép. : Ra (Miguel - alisson-Adimensional-replic R= ,99726213 R²= ,99453176 R² Ajusté = ,99062587 F(5,7)=254,62 p<,00000 Err-Type de l'Estim.: ,04477						
N=13	b*	Err-Type de b*	b	Err-Type de b	t(7)	valeur p
OrdOrig.			0,723718	0,026640	27,16682	0,000000
X1	-0,159912	0,028268	-0,068649	0,012135	-5,65702	0,000769
X2	0,953513	0,027950	0,241500	0,007079	34,11551	0,000000
X1X2	-0,239805	0,027950	-0,053269	0,006209	-8,57991	0,000058
X1X1	-0,019522	0,031549	-0,009804	0,015845	-0,61879	0,555647
X2X2	0,083481	0,031843	0,022007	0,008394	2,62163	0,034328

Através da Tabela 4.12 observa-se que quando aumentando a velocidade de corte (X1) e diminuindo o avanço (X2) tem-se um melhor acabamento superficial, obtendo menores valores de rugosidade. Aslan *et al.* (2007) observou que o aumento da velocidade há um decréscimo no desgaste da ferramenta, mantendo um acabamento superficial satisfatório conforme o desgaste da ferramenta é reduzido. Entretanto, este aumento da velocidade não pode ser excessivo demais, pois Davim e Figueira (2007) verificaram que para velocidades elevadas, o tempo de corte influencia diretamente no desgaste da ferramenta, podendo até ocorrer o deterioramento da superfície da peça. Também se pode afirmar que houve significância na interação V_c e f . Somente o fator quadrático da velocidade de corte (X1X1) não foi significativo.

De maneira similar, a Tabela 4.13 mostra os coeficientes de regressão do modelo que representa as forças (F_x , F_y , F_z) em função dos parâmetros V_c e f (efeitos lineares, quadráticos e suas interações), representados por X1 e X2, respectivamente, para os ensaios realizados utilizando MQF. Este modelo inclui os fatores significativos e não significativos. O grau de correlação (R^2) entre V_c e f para a resposta força foi significativa, com valor igual a 0,9236. Foi possível simplificar o modelo realizando o “outlier” de seis condições de corte (sendo eles, ensaio 2, 4, 5, 11, 12 e 15), portanto $N = 10$. Nota-se que o fator significativo para a força foi apenas o variável avanço (f), ou seja, em nenhum dos testes realizados a interação entre V_c e f obteve uma interferência significativa.

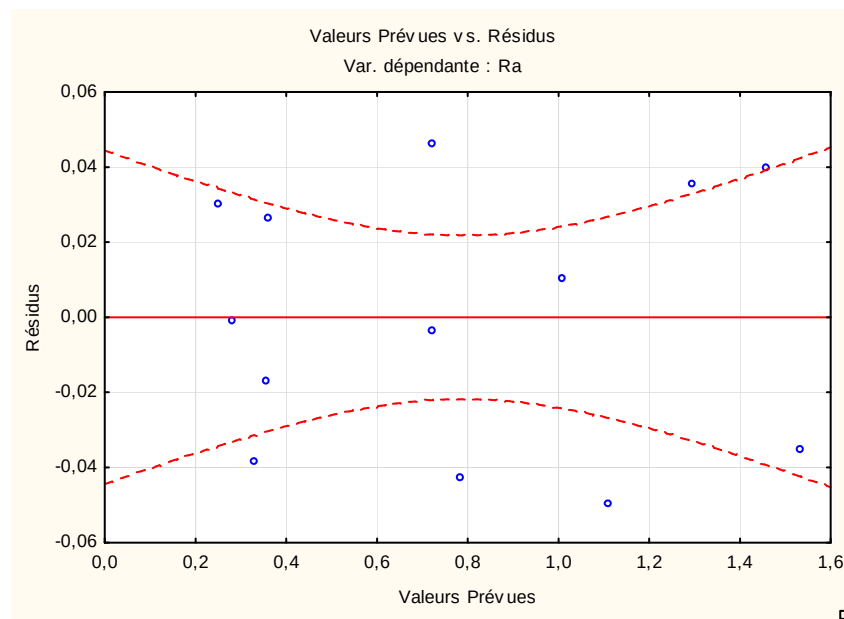


Figura 4.23 Gráfico da distribuição dos resíduos pelos valores previstos – rugosidade

A Figura 4.24 mostra a distribuição dos resíduos relacionados com a força. Mesmo a interferência de V_c e f não sendo significativo, nota-se novamente que a distribuição segue um padrão aleatório não sendo tendenciosa, demonstrando que o modelo analisado é ideal para a atual faixa de experimentos.

Tabela 4.13 Coeficientes de regressão múltipla – força – ensaio com MQF

Synthèse de la Régression; Variable Dép. : Fx (Miguel - alisson-Adimensional-media) R= ,96104679 R²= ,92361093 R² Ajusté = ,82812460 F(5,4)=9,6727 p<,02361 Err-Type de l'Estim.: 2,8482						
N=10	b*	Err-Type de b*	b	Err-Type de b	t(4)	valeur p
OrdOrig.			-9,34194	1,639517	-5,69798	0,004688
X1	0,63316	0,362011	4,79713	2,742758	1,74902	0,155195
X2	-1,40986	0,372594	-6,25217	1,652306	-3,78391	0,019370
X1X2	1,16457	0,759495	6,00048	3,913330	1,53334	0,199967
X1X1	-0,38697	0,524241	-2,91227	3,945318	-0,73816	0,501382
X2X2	-0,25708	0,344276	-0,91408	1,224106	-0,74674	0,496723

Através deste tópico, onde se utiliza a análise estatística dos resultados, pode-se concluir que existe influência significativa entre V_c e f , incluindo a interação entre estas duas variáveis. Para a variável de resposta desgaste, tanto a velocidade de corte quanto o avanço possuem interferências relevantes para o resultado final, ou seja, a interação entre

V_c e f está diretamente relacionada com o resultado final do desgaste da ferramenta, onde uma melhor combinação entre estas duas variáveis pode resultar em um menor valor do desgaste.

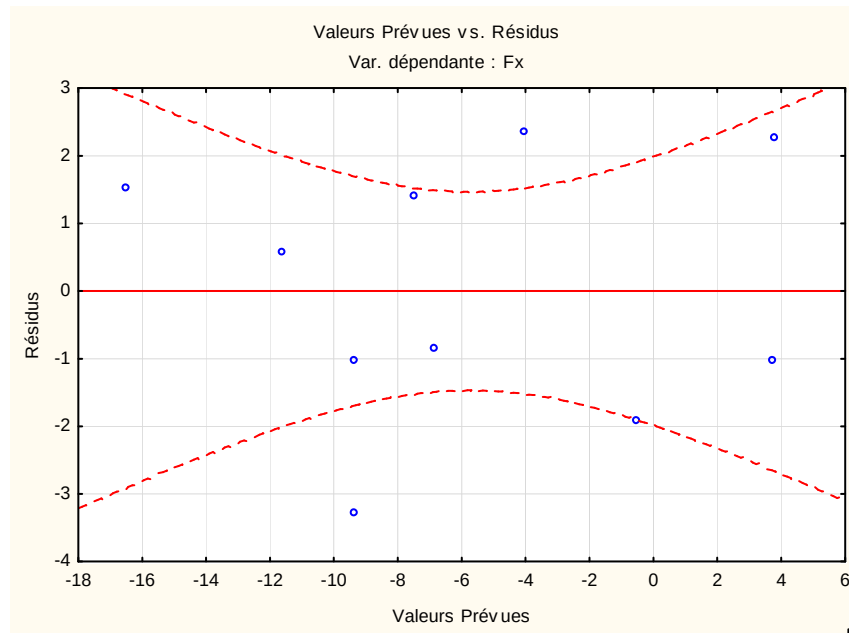


Figura 4.24 Gráfico da distribuição dos resíduos pelos valores previstos – força

Com relação à rugosidade, os fatores V_c e f também têm influências significativas, tanto analisadas linearmente quanto a interação entre as duas. Dependendo da combinação utilizada dessas duas variáveis pode-se garantir um melhor acabamento final da peça. Lembrando que foram analisados três parâmetros de rugosidade, tornando a análise mais completa. Estes resultados são coerentes com a literatura (MACHADO *et al.*, 2011), onde estes dois parâmetros de corte influenciam muito a rugosidade, sendo que o avanço tem efeito na segunda potência. Já a variável de resposta força não obteve um fator significativo com relação a velocidade de corte, bem como a interação entre as duas variáveis (V_c e f), que não apresentaram resultados significativos. Apenas a variável avanço se mostrou significativa. Estes resultados são, também, coerentes com a literatura (MACHADO *et al.*, 2011; TRENT e WRIGHT, 2000), onde a velocidade de corte tem influência maior apenas para faixas de valores menores que os utilizados nesta pesquisa (a menor velocidade aqui testada foi de 160 m/min), principalmente na faixa de APC (Aresta Postiça de Corte). Com relação ao avanço, este interfere diretamente nas componentes de força, pois altera diretamente a área da seção de corte.

CAPÍTULO V

CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

5.1. Conclusões

Os resultados obtidos neste trabalho permitem a comparação da aplicação do fluido na forma MQF com a condição a seco e, através do *software* Statística[®], constatar que os modelos para desgaste, rugosidade e força formaram uma abordagem útil e precisa ao se tratar de torneamento de peças duras utilizando MQF.

Perante as condições de corte apresentadas, a minimização do desgaste com relação aos parâmetros de corte (velocidade de corte, avanço e profundidade de corte) foi obtida quando se utiliza valores menores para avanço (f), independentemente das velocidades de corte empregadas durante a usinagem. Mesmo com avanços menores, onde o contato entre a peça e a ferramenta ocorre por mais tempo e a temperatura durante o processo teria valores elevados, o desgaste foi menor se comparado aos valores maiores de avanço, e também com a usinagem a seco, mostrando que o MQF exerceu certo resfriamento e/ou lubrificação durante a usinagem, fazendo com que o valor de VB_{Bmax} fosse menor mesmo com maior tempo de usinagem. Lembrando que para a velocidade de corte com o valor de 310 m/min, todos os avanços utilizados apresentaram um desgaste menor do que o esperado, principalmente se comparar com a usinagem a seco, mostrando a influência do MQF cumprindo seu papel lubrificante. Ao analisar a taxa de desgaste, fica mais evidente a influência do avanço em combinação com o MQF no resultado obtido, concluindo que quanto menor o avanço utilizado, maior será a vida da ferramenta.

Com relação a rugosidade, conclui-se que a interação entre V_c e f é muito importante, pois se pode garantir ótimo acabamento superficial sem prejudicar a produção. Uma condição ideal para obter uma rugosidade de alta qualidade é usinar com avanços menores e alta velocidade de corte. Pelas Figuras 4.5, 4.6 e 4.7 mostradas na seção 4, notam-se que independente das velocidades utilizadas, a rugosidade se manteve com valores semelhantes dependendo apenas do avanço utilizado. Quando comparado com a usinagem a seco, a diferença ainda é mais nítida. Para avanços maiores, a rugosidade para a usinagem com MQF e a seco obtiveram resultados próximos, mas quando os avanços

foram de 0,05 mm/rev, a rugosidade com MQF foi sempre menor do que a usinagem a seco, comprovando mais uma vez a influencia do fluido de corte enquanto lubrificante.

As direções de aplicação do MQF sobre-cabeça e na superfície de folga secundária também foram estudadas neste trabalho. Pode-se concluir que não houve interferência significativa nos resultados entre as diferentes direções de aplicação do MQF. Mesmo sendo testados em apenas seis condições de corte, ficou comprovado que os resultados foram próximos, não comprovando a influência da direção de aplicação do fluido de corte.

5.2. Sugestões para Trabalhos Futuros

A realização deste trabalho permitiu sugerir propostas para o desdobramento futuro da pesquisa.

Foi investigado apenas um material endurecido, sendo avaliado apenas o comportamento das condições de corte diante de um material de difícil usinagem. A proposta seria avaliar estas mesmas condições de corte para materiais de diferentes valores de dureza, comparando-os entre si. Seria feito a usinagem a seco (recomendado para este tipo de material) e posteriormente utilizando MQF, como foi realizado com o AISI D6.

A aplicação de MQF neste trabalho não variou a vazão e nem a pressão utilizada, ficando em torno de 60 ml/h e 0,6 MPa, respectivamente. A proposta é variar diferentes valores de vazão combinados com outros valores da pressão de aplicação. Um modelo pode ser construído baseado na combinação dessas duas variáveis, comparados posteriormente com os resultados obtidos experimentalmente.

O torneamento de materiais endurecidos é considerado uma alternativa para outros processos que trabalham com material endurecido, como o processo de retífica. Outra proposta é realizar os dois processos com os mesmos materiais e, se possível, comparar os processos e os benefícios que cada um apresenta para um melhor resultado final. Uma grandeza que seria interessante analisar é a rugosidade, já que o acabamento superficial da retificação é muito bom se comparado com outros processos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT NBR ISO 4287, 2002, “Rugosidade: Método de Perfil – termos, definições e parâmetros da rugosidade”;

ABRÃO, A. M., May 1995, “The machining of annealed and hardened steels using advanced ceramic cutting tools”, School of Manufacturing and Mechanical Engineering, University of Birmingham, Edgbaston, Birmingham, B152TT, 241 pgs.;

ABRÃO, A. M., ASPINWALL, D. K., WISE, M. L. H., 1995, “Tool wear, cutting forces and temperature evaluation when turning hardened bearing steel using PCBN and ceramic tool materials”, 31st International MATADOR Conference; pp. 209-211, UMIST, Manchester, UK;

ACCU-LUBE, Acesso em maio 2013, Manual de Produtos, Disponível em: <http://www.accu-lube.com/new_website/englich/framesets/frameset.html>;

ALMEIDA, C. M., 2010, “Avaliação do Desgaste da Ferramenta de Metal Duro Revestida com TiN no Fresamento do Aço ABNT 4140 Laminado a Quente e Temperado/Revenido”, Dissertação Mestrado, Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais – PUC/MG, Programa de Pós-Graduação, Belo Horizonte – MG;

ASLAN, E., CAMUSCU, N., BIRGOREN, B., 2007, “Design Optimization of Cutting Parameters When Turning Hardened AISI 4140 Steel (63 HRC) with Al₂O₃+TiCN Mixed Ceramic Tool”, Materials and Design, v. 28, pp. 1618-1622;

ÁVILA, R.F.; ABRÃO, A.M., 2001, “The effects of cutting fluids on the machining of hardened AISI 4340 steel”, Journal of Material Processing and Technology, v. 119, pp 21-26;

BARTARYA, G., CHOUDHURY, S. K., 2012, “State of the Art in Hard Turning”, International Journal of Machine Tools and Manufacture, v. 53, pp. 1-14;

BHATTACHARYYA, S. K., ASPINWALL, D. K., NICOL, A. W., 1978, “The application of polycrystalline compacts for ferrous machining”, Proc of the 19th International MTDR Conference, pp. 425-434;

BOUACHA, K., YALLESE, M. A., MABROUKI, T., RIGAL, J. F., 2010, “Statistica Analysis of Surface Roughness and Cutting Forces Using Response Surface Methodology in Hard Turning of AISI 52100 Bearing Steel with CBN Tool”, International Journal of Refractory Metals and Hard Materials, v. 28, pp. 349-361;

BROOKES, K. J., Outubro de 1986, “Hard and Superhard Tools are Cut Above the Rest”, Metal Working Production, pp. 92-104;

BRUNI, C., FORCELESE, A., GABRIELLI, F., SIMONCINI, M., 2008, “Hard Turning of an Alloy Steel on a Machine Tool with a Polymer Concret Bed”, Journal of Materials Processing Technology, v. 202, pp. 493-499;

CAMARGO, J. C., 2011, “Construção de um modelo para representar o desgaste de ferramenta de corte em processo de torneamento de aço beneficiado”, Universidade Estadual de Santa Cruz, Ilhéus, Bahia, 124 pgs;

CHILDS, T. H. C., ROWE, G. W., 1973, “Physics in Metal Cutting”, Rep. Prog. Physics, v. 36, pp. 223-288;

COSTA, E. S., 2004, “Furação de Aços Microligados com Aplicação de Mínima Quantidade de Fluido de corte – MQF”. Tese de Doutorado, Universidade Federal de Uberlândia – UFU, Uberlândia, Minas Gerais, Brasil;

DA SILVA, R. B., 2006, “Performance of different cutting tool materials in finish turning of Ti-6Al-4V alloy with high pressure coolant supply technology”, Universidade Federal de Uberlândia - UFU, Uberlândia, Minas Gerais, 299 pgs;

DAVIM, J. P., FIGUEIRA, F., 2007, “Machinability Evaluation in Hard Turning of Cold Work Tool Steel (D2) with Ceramic Tools Using Statistical Techniques”, Materials and Design, v. 28, pp. 1186-1191;

DEARNLEY, P. A., TRENT, E. M., February, 1982, “Wear Mechanisms of Coated Carbides Tools”, *Metals Technology*, v. 9, pp. 60-75;

DHAR, N. R., KAMRUZZAMAN, M., AHMED, M., 2006, “Effect of Minimum Quantity Lubricant (MQL) on Tool Wear and Surface Roughness in Turning AISI 4340 Steel”, *Journal of Materials Processing Technology*, v. 172, pp. 299-304;

DILBAG, S., RAO, P. V., 2008, “Performance Improvement of Hard Turning with Solid Lubricants”, *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, v. 38, pp. 529-535;

DIN “Krafte und Leistungen”, DIN 6584 (ENT WRF), Berlin, Buethvertrieb GmbH, October, 1963.

DINIZ, A. E., DE OLIVEIRA, A. J., 2008, “Hard Turning of Interrupted Surface Using CBN Tool”, *Journal of Materials Processing Technology*, v. 195, pp. 275-281;

EBRAHIMI, A., MOSHKARSAR, M. M., 2009, “Evaluation of Machinability in Turning of Micro-alloyed and Quenched-tempered Steels: Tool Wear, Statistical Analysis, Chip Morphology”, *Journal of Material Processing Technology*, v. 209, pp. 910-921;

FERRARESI, D., 1981, “Fundamentos da Usinagem dos Metais”, Editora Edgard Blücher Ltda, vol. 1, SP, 751 pgs.;

FERRARESI, D., 2003, “Fundamentos da Usinagem dos Metais”, [SI], Editora Edgard Blücher Ltda;

GAITONDE, V. N., KARNIK, S. R., LUIS FIGUEIRA, DARVIM, J. P., 2009, “Machinability investigations in hard turning of AISI D2 cold work tool steel with conventional and wiper ceramic inserts”, *International Journal of Refractory Metals & Hard Materials* 27, pp. 754-763;

GRZESIK, W., RECH, J., WANAT, T., 2007, “Surface Finish on Hardened Bearing Steel Parts Produced by Super hard an Abrasive Tools”, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, v. 47, pp. 255-262;

GUO, Y. B., SAHNI, J., 2004, “A Comparative Study of Hard Turned and Cylindrically Ground White Layers”, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, v. 44, pp. 135-145;

HEATH, P. J., 1986, “Properties and Uses of Amborite”, *Industrial Diamond Review*, n° 3, pp. 120-127;

HORNE, J. G., DOYLE, E. D., TABOR, D., 1978, “Direct Observation of Contact and Lubrification at a Chip-Tool Interface”, *Proc. Int. Conf. on Lubrification Challenges in Metal Working and Processing*, III Research Institute, Chicago, Illinois, USA, 7-9 June, 7 pgs;

HUANG, Y., CHOU, Y. K., LIANG, S. Y., 2007, “CBN Tool Wear in Hard Turning: a Survey on Research Progresses”, *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, v. 35, pp. 443-453;

KHAN, M. M. A., MITHU, M. A. H., DHAR, N. R., 2009, “Effects of Minimum Quantity Lubrication on Turning AISI 9310 Alloy Steel Using Vegetable Oil-Based Cutting Fluid”, *Journal Materials Processing Technology*, v. 209, pp. 5573-5583;

KISTLER GROUP. Acesso em março/2013. Multicomponentes – Placa de Força – Ampla Gama de Medição. Disponível em: <<http://www.kistler.com/br/en/product/force/9265B>>

KLOCKE, F., EISENBLATTER, G., 1997, “Dry cutting”, *Annals of the CIRP* 46, pp. 519–526;

KONIG, W., LUNG, D., 1987, “Machining of Hard Ferrous Materials”, *Proceedings of the 6th International Conference on Production Engineering Osaka*, pp. 123-127;

KONIG, W., KOMANDURI, R., TOSHOFF, H.K., ACKERSHON, G., 1984, “Machining of hard materials”, *Annals of the CIRP* 33, pp. 417–427;

KORN, D., 2004, “Hard Turning Might Not Be as Hard as You Think”, Article from Modern Machine Shop Review, disponível em: <<http://www.mmsonline.com/articles/archive/a2739cbb-b019-4f18-8352-b0f94df5b452>>;

KRESS, D., 1997, “Dry cutting with finish machining tools”, Ind. Diam. Rev. 57 [574], pp. 81-85;

KUMAR, R. V., RAMAMOORTHY, B., 2007, “Performance of coated tools during hard turning under minimum fluid application”, Elsevier, Journals of Materials Processing Technology, v. 185, pp. 210-216;

LAHIFF, C., GORDON, S., PHELAN, P., 2007, “PCBN Tool Wear Modes and Mechanisms in Finish Hard Turning”, Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, v. 23, pp. 638-644;

LALWANI, D. I., MEHTA, N. K., JAIN, P. K., 2008, “Experimental Investigations of Cutting Parameters Influence on Cutting Forces and Surface Roughness in Finish Hard Turning of MDN250 Steel”, Journal of Materials Processing Technology, v. 206, pp. 167-179;

LIN, H. M., LIAO, Y. S., WEI, C. C., 2008, “Wear Behavior in Turning High Hardness Alloy Steel by CBN Tool”, Wear, v. 264, pp. 679-684;

LIU, Z., AN, Q., XU, J., CHEN, M., HAN, S., 2013, “Wear Performance of (nc-AlTiN)/(a-Si₃N₄) Coating and (nc-AlCrN)/(a-Si₃N₄) Coating in High-Speed Machining of Titanium Alloys Under Dry and Minimum Quantity Lubrication (MQL) Conditions”, Wear, v. 305, pp. 249-259;

MACHADO, A. R., 1990, “Machining of Ti6Al4V and Inconel 901 with a High Pressure Coolant System”, PhD Thesis, University of Warwick, England;

MACHADO, A. R., ABRÃO, A. M., COELHO, R. T., DA SILVA, M. B., 2011, “Teoria da Usinagem dos Materiais”, 2º Ed., São Paulo – SP, Edgard Blucher, 397 pgs;

MACHADO, A. R., GIANINI, W. L., BOHES, L., Dezembro 1996, “Verificação Experimental do Comportamento das Forças de Corte e de Avanço no

Torneamento do Ferro Fundido ABNT FC-250 Utilizando-se Pastilhas de Metal Duro, Cerâmica Oxida e Cerâmica Não Oxida”, VII CBCIMAT, UFSC, Florianópolis - SC, pp. 155-159;

MACHADO, A. R., WALLBACK, J., 1997 “The Effect of Extremely Low Lubricant Volumes in Machining”, Wear v. 210, pp. 76-82;

MALKIN, S., October, 1999, “Turning of hardened steels”, 3rd International Machining & Grinding Conference, pp. 497-510;

MILAN, J. C. G., 1999, “Usinabilidade de aços para moldes para plástico”, Dissertação Mestrado, Universidade Federal de Uberlândia – UFU, 112 pgs;

MIRANDA, G. W. A., COPPINI, N. L., DINIZ, A. E., BRAGA, D. U., 2001, “Quando as Brocas de Metal Duro Revestidas Dispensam os Fluidos de Corte”, O Mundo da Usinagem, ISSN1518-6091, RG.BN 217.147, pp. 20-25;

MOURA, R. R., 2012, “Fresamento de Aço para Matrizes VP20ISO com Ferramentas Re-afiadas”, Dissertação Mestrado, Universidade Federal de Uberlândia – UFU, 107 pgs;

NAKAYAMA, K., ARAI, M., KANDA, T., January 13, 1998, “Machining characteristics of hard materials”, Annals of the CIRP, v. 37 (1), pp. 88-92;

NORIIKO, N., AKIO, O., 1998, “Improved Grooving of Beta-Titanium Alloy with Some Trial Techniques, Progress of Cutting and Grinding”, Proceedings of the Fourth International Conference on Progress of Cutting and Grinding, October 5-9, Urumqi and Turpan, China, International Academic Publishers, pp. 7-12;

NOVASKI, O., 2011, “Introdução à Engenharia de Fabricação Mecânica”, São Paulo, Edgar Blucher;

PASTOR, H., 1987, “Present Status and Development of Tool Materials Part 1 – Cutting Tools”, International Journal of Refractory and Metals, v. 6, n° 4, pp. 196-209;

PEREIRA, J. A., 2009, “Efeito da sequência de arestas utilizadas nos testes de vida com insertos quadrados de metal duro”, Dissertação Mestrado, Universidade Federal de Uberlândia – UFU, 122 pgs;

POSTINIKOV, S. N., 1967, “Penetrating Ability of Cutting Fluids”, *Wear*, v. 10, pp. 142-150;

POULACHON, G., MOISAN, A., JAWAHIR, I. S., 2001, “Tool-Wear Mechanisms in Hard Turning With Polycrystalline Cubic Boron Nitride Tool”, *Wear*, v. 250, pp. 576-586;

RANGANATH, S., GUO, C., HEDGE, P., 2009, “A Finite Element Modeling Approach to Predicting White Layer Formation in Nickel Superalloys”, *CIRP Annals – Manufacturing Technology*, v. 58, pp. 77-80;

ROMI, Acesso em março/2013. Linha Multiplic – Tornos Universais Programáveis – Características Técnicas. Disponível em: <http://www.romi.com.br/fileadmin/Editores/MF/Imagens/MU_CT_Linha_Multiplic.pdf>

SANDVIK COROMANT, acesso em março 2013. Manual Técnico – Materiais. Disponível em: <<https://www.sandvik.coromant.com/en-gb/products/Pages/productdetails.aspx?c=SNGA120412S01030A%20%20%20701>>

SANTOS, S. C.; SALES, W. F., 2007, “Aspectos Tribológicos da Usinagem dos Materiais”, São Paulo: Artliber, 246 pgs;

SCHALLBROCH, H.; BETHMANN, H., 1950, “Kurzprüfverfahren der Zerspanbarkeit”. Leipzig: B.G.Teubner, 223 pgs;

SCHLESINGER, G., 1936, “Die Werkzeug Maschinen”, Berlin, Verlag von Julios Springer;

SCHWACH, D. W., GUO, Y. B., 2005, “Feasibility of Producing Optimal Surface Integrity by Process Design in Hard Turning”, *Materials Science and Engineering*, v. A 395, pp. 116-123;

SIMOES, L. T. C., LUIZ, J. M., 2012, “Fluidos de Corte na Usinagem de uma Empresa de Grande Porte”, Joinville, Santa Catarina, 21 pgs;

SHAW, M. C., PIGGOT, J. D., RICHARDSON, L. P., 1951, “The Effect of Cutting Fluid upon Chip-Toll Interface Temperature”, Trans of ASME, v. 73(1), pp. 45-56;

SOKOVIC, M., MIJANOVIC, K., 2001, “Ecological Aspects of Cutting Fluids and its Influence on Quantifiable Parameters of Cutting Process”, Journal of Materials Processing Technology, v. 109, pp.181-189;

STIER, H., abril de 1988, “The Rewards and Demands of Hard-Part Turning”, Modern Machine Shop, pp. 88-94;

STOETERAU, R. L, 2003, “Fabricação por Remoção de Material. Processo de Usinagem”, 180 pgs;

SUAREZ, M. P., 2008, “Fresamento de Canais da Liga de Alumínio Aeronáutico 7075-T7”, Dissertação Mestrado, Universidade Federal de Uberlândia – UFU, 111 pgs;

THIELE, J. D., MELKOTE, S. N., 1999, “Effect of Cutting Edge Geometry and Workpiece Hardness on Surface Generation in Finish Hard Turning of AISI 52100 Steel”, Journal of Materials Processing Technology, v. 94, pp. 216-226;

TLUSTY, J., SCHUELLER, J. K., NELSON, S., novembro de 1998, “Tool Wear in Milling Hardened Die Steel”, Journal of Manufacturing Science and Engineering, v. 120, pp. 669-673;

TRENT, E.M., 2000, “Metal Cutting”, 4rd Edition, Buttherworths, London, 446 pgs, ISBN – 0.408.10856-8;

VARADARAJAN, A. S., PHILIP, P. K., RAMAMOORTHY, B., 2002, “Investigations on Hard Turning with Minimal Cutting Fluid Application (HTMF) and its Comparison with Dry and Wet Turning”, International Journal of Machine Tools and Manufacture, v. 42, pp. 193-200;

VILLARES METALS, acesso em Outubro 2011; “Aços Ferramenta para Trabalhos a Frio”. Disponível em: <http://www.villaresmetals.com.br/portuguese/files/FT_13_VC131.pdf>;

WANG, J. Y., LIU, C. R., 1999, “The Effect of Tool Flank Wear on the Heat Transfer, Thermal Damage and Cutting Mechanics in Finish Hard Turning”, Annals of the CIRP, v. 48 (7), pp. 53-58;

YALLESE, M. A., CHAOUI, K., ZEGHIB, N., BOULANOUAR, L., RIGAL, J., 2009, “Hard Machining of Hardened Bearing Steel Using Cubic Boron Nitride Tool”, Journal of Material Processing Technology, v. 209, pp. 1092-1104;

YAN, H., HUA, J., SHIVPURI, R., 2005, “Numerical Simulation of Finish Hard Turning for AISI H13 Die Steel”, Science and Technology of Advanced Materials, v. 6, pp. 540-547;

ZHOU, J. M., ANDERSSON, M., STAHL, J. E., 2003, “The Monitoring of Flank Wear on the CBN Tool in the Hard Turning Process”, International Journal of Advanced Manufacturing Technology, v. 22, pp. 697-702;