



UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM
ENGENHARIA MECÂNICA

TORNEAMENTO DO FERRO FUNDIDO CINZENTO COM
FERRAMENTAS DE CORTE TEXTURIZADAS

CARLOS ARTUR ALEVATO LEAL

Belo Horizonte, dezembro de 2015

Carlos Artur Alevato Leal

TORNEAMENTO DO FERRO FUNDIDO CINZENTO COM FERRAMENTAS DE CORTE TEXTURIZADAS

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Minas Gerais, como requisito parcial à obtenção de título de Mestre em Engenharia Mecânica.

Área de concentração: Processos de Fabricação

Orientador: Prof. Alexandre Mendes Abrão

Universidade Federal de Minas Gerais

Belo Horizonte

Escola de Engenharia da UFMG

2015

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais, irmã, sobrinho e namorada pela compreensão e apoio incondicional.

Ao professor Alexandre Mendes Abrão, pela dedicação, orientação e ensinamentos, proporcionando minha entrada na área acadêmica.

Ao Instituto de Engenharia de Produção e de Máquinas Ferramentas (*Institut für Fertigungstechnik und Werkzeugmaschinen - IFW*) da Universidade de Hannover (*Leibniz Universität Hannover*), Alemanha, pela texturização a *laser* dos insertos de metal duro utilizados neste trabalho.

Ao professor Lincoln Cardoso Brandão, Departamento de Engenharia Mecânica da UFSJ, pela cessão do Laboratório de Usinagem para realização dos testes de força.

Ao professor Ronaldo Barbosa e ao técnico Esteveesson Ferreira Miqueletti, Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais, pelo tratamento térmico do ferro fundido cinzento.

Ao professor Paulo César de Matos Rodrigues, Departamento de Engenharia Mecânica da UFMG, pelo apoio e sugestões.

Ao professor Carlos Eiji Hirata Ventura, Departamento de Engenharia Mecânica UFSCar, pela preparação das arestas de corte.

À Empresa Unida Mansur e Filhos Ltda pelo apoio e incentivo à realização deste trabalho.

Ao senhor Fernando de Souza Mansur, por acreditar no meu potencial e nos meus objetivos profissionais.

Ao técnico Marco Aurélio Brugiolo, pelo apoio técnico e sugestões.

A todos que, de alguma forma, contribuíram para a realização deste trabalho.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS.....	5
LISTA DE TABELAS.....	10
RESUMO.....	11
1 INTRODUÇÃO.....	12
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	14
2.1 Texturização.....	14
2.1.1 Tipos de texturização.....	15
2.1.2 Aplicações da texturização a <i>laser</i>	22
2.2 Força de usinagem.....	26
2.2.1 Força de corte teórica.....	28
2.2.2 Métodos de medição da força de usinagem.....	30
2.2.3 Influência da texturização da ferramenta de corte sobre a força de usinagem.....	33
2.3 Desgaste e vida da ferramenta de corte.....	36
2.3.1 Influência da texturização na vida da ferramenta.....	39
2.4 Sistema de mínima quantidade de fluido de corte (MQF).....	43
2.4.1 Fluido de corte aplicado em ferramentas texturizadas.....	53
3 METODOLOGIA.....	59
3.1 Texturização dos insertos.....	59
3.1.1 Materiais.....	59
3.1.2 Equipamentos.....	59
3.1.3 Métodos.....	62
3.2 Medição das forças de usinagem.....	66
3.2.1 Materiais.....	66
3.2.2 Equipamentos.....	66
3.2.3 Métodos.....	66
3.3 Medição do desgaste das ferramentas.....	69
3.3.1 Materiais.....	69
3.3.2 Equipamentos.....	69
3.3.3 Métodos.....	69
4 RESULTADOS.....	72

4.1 Força de usinagem	72
4.1.1 Influência da velocidade de corte sobre a força de usinagem.....	73
4.1.2 Influência do avanço sobre a força de usinagem.....	76
4.1.3 Influência da profundidade de usinagem sobre a força de usinagem	78
4.1.4 Comparação entre o corte a seco e com MQF.....	81
4.2 Rugosidade da superfície torneada	83
4.3 Cavacos produzidos.....	88
4.4 Vida de ferramenta	91
5 ANÁLISE DE RESULTADOS.....	95
5.1 Força de usinagem	95
5.2 Rugosidade de superfície torneada.....	96
5.3 Cavacos produzidos.....	98
5.4 Vida da ferramenta	98
6 CONCLUSÕES.....	100
7 SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS.....	101
ABSTRACT.....	102
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	103

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 2.1 - Vista lateral de uma superfície microtexturizada de polipropileno com estruturas espaçadas entre si e entre fileiras de 100 μm	16
FIGURA 2.2 - (a) Rebolo de diamante D91 ($\phi = 2 \text{ mm}$), (b) fresa de topo esférico de metal duro revestido com TiAlN ($\phi = 2 \text{ mm}$) e (c) fresa de topo esférico de metal duro revestido com TiAlN ($\phi = 1,5 \text{ mm}$)	17
FIGURA 2.3 - Cavidade de interferometria do <i>laser</i>	18
FIGURA 2.4 - Princípio da cavidade óptica.....	19
FIGURA 2.5 - Interação do feixe <i>laser</i> com a peça: (a) absorção e aquecimento, (b) fusão e (c) evaporação	21
FIGURA 2.6 - Imagem obtida por MEV de uma superfície de aço inoxidável texturizada a <i>laser</i>	23
FIGURA 2.7 - Superfície de WC-Co com microestrutura feita a <i>laser</i>	23
FIGURA 2.8 - Quebra-cavaco integral fabricado por usinagem a <i>laser</i> em ferramenta de corte sinterizada padrão	24
FIGURA 2.9 - Microtextura desenvolvida na ferramenta de corte	25
FIGURA 2.10 - Quatro tipos de texturas produzidas na superfície de saída: (a) perpendicular, (b) paralelo, (c) furo e (d) ponto	26
FIGURA 2.11 - Componentes da força de usinagem no torneamento	27
FIGURA 2.12 - Variação da pressão específica de corte com o avanço e a profundidade de usinagem	29
FIGURA 2.13 - Esquema de construção de um dinamômetro piezoelétrico	32
FIGURA 2.14 – Imagens obtidas por Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) da fresa tradicional e das microestruturas produzidas	33

FIGURA 2.15 – Força de corte versus taxa de remoção de material (η) para ferramenta tradicional e ferramenta com micros canais.....	35
FIGURA 2.16 – Parâmetros utilizados para medir os desgastes das ferramentas de corte.....	37
FIGURA 2.17 – Comportamento do desgaste de uma ferramenta de corte com o tempo de corte.....	38
FIGURA 2.18 – Desgaste de flanco máximo ($VB_{BMÁx}$) em pastilhas de metal duro lapidadas e não lapidadas ao final de cada período	40
FIGURA 2.19 – Diferença entre a ferramenta sem textura e as texturizadas: (a) no desgaste de flanco médio e (b) na altura da APC	43
FIGURA 2.20 – Crescimento do VBB com a usinagem a seco, com jorro e com MQF	47
FIGURA 2.21 – Principais efeitos sobre as forças de corte	48
FIGURA 2.22 – Variação da temperatura de corte com a velocidade de corte e avanço para condições de corte a seco, com jorro e com MQF	50
FIGURA 2.23 – Concentração de átomos de alumínio na superfície de saída	54
FIGURA 2.24 – Texturização de microcanais na superfície de saída (MS-1).....	56
FIGURA 3.1 – Produção de chanfros por retificação	60
FIGURA 3.2 – Máquina para usinagem a <i>laser</i> (a) parte externa e (b) parte interna	61
FIGURA 3.3 – Suporte e montagem utilizados nas medições dos diâmetros das cavidades..	61
FIGURA 3.4 – Imagem do MEV do chanfro da ferramenta sem texturização	62
FIGURA 3.5 – Inseto texturizado com Passo 60: (a) imagem do MEV e (b) perfil das cavidades	63
FIGURA 3.6 – Inseto texturizado com Passo 100: (a) imagem do MEV e (b) perfil das cavidades	63

FIGURA 3.7 – Inseto texturizado com Passo 200: (a) imagem do MEV e (b) perfil das cavidades	63
FIGURA 3.8 – Dimensões medidas: (a) desenho esquemático das cavidades medidas e (b) ampliação	64
FIGURA 3.9 - Configuração montada para os testes de força	67
FIGURA 3.10 - Configuração montada para os testes de vida	70
FIGURA 3.11 - Procedimento para medição do desgaste de flanco máximo.....	71
FIGURA 4.1 – Curva característica de força (aquisição de 30 segundos e taxa de aquisição de 1000 Hz)	72
FIGURA 4.2 – Força de corte para os quatro tipos de ferramentas em função da velocidade de corte: (a) corte a seco e (b) MQF. ($f = 0,10$ mm/volta e $a_p = 1,5$ mm).....	74
FIGURA 4.3 – Força de avanço para os quatro tipos de ferramentas em função da velocidade de corte: (a) corte a seco e (b) MQF. ($f = 0,10$ mm/volta e $a_p = 1,5$ mm).....	75
FIGURA 4.4 – Força passiva para os quatro tipos de ferramentas em função da velocidade de corte: (a) corte a seco e (b) MQF. ($f = 0,10$ mm/volta e $a_p = 1,5$ mm).....	76
FIGURA 4.5 – Força de corte para os quatro tipos de ferramentas em função do avanço: (a) corte a seco e (b) MQF. ($v_c = 200$ m/min e $a_p = 1,5$ mm)	77
FIGURA 4.6 – Força de avanço para os quatro tipos de ferramentas em função do avanço: (a) corte a seco e (b) MQF. ($v_c = 200$ m/min e $a_p = 1,5$ mm)	77
FIGURA 4.7 – Força passiva para os quatro tipos de ferramentas em função do avanço: (a) corte a seco e (b) MQF. ($v_c = 200$ m/min e $a_p = 1,5$ mm)	78
FIGURA 4.8 – Força de corte para os quatro tipos de ferramentas em função da profundidade de usinagem: (a) corte a seco e (b) MQF. ($v_c = 200$ m/min e $f = 0,10$ mm/volta)	79

FIGURA 4.9 – Força de avanço para os quatro tipos de ferramentas em função da profundidade de usinagem: (a) corte a seco e (b) MQF. ($v_c = 200$ m/min e $f = 0,10$ mm/volta).....	80
FIGURA 4.10 – Força passiva para os quatro tipos de ferramentas em função da profundidade de usinagem: (a) corte a seco e (b) MQF. ($v_c = 200$ m/min e $f = 0,10$ mm/volta)	80
FIGURA 4.11 – Comparação entre a força de corte no sistema a seco e com MQF para velocidade de corte de 200 m/min, avanço de 0,10 mm/volta e profundidade de usinagem de 1,5mm.....	81
FIGURA 4.12 – Comparação entre a força de avanço no sistema a seco e com MQF para velocidade de corte de 200 m/min, avanço de 0,10 mm/volta e profundidade de usinagem de 1,5mm.....	82
FIGURA 4.13 – Comparação entre a força passiva no sistema a seco e com MQF para velocidade de corte de 200 m/min, avanço de 0,10 mm/volta e profundidade de usinagem de 1,5mm.....	82
FIGURA 4.14 – Desvio aritmético médio para os quatro tipos de textura em função da velocidade de corte: (a) corte a seco e (b) MQF. ($f = 0,10$ mm/volta e $a_p = 1,5$ mm).....	83
FIGURA 4.15 – Altura máxima do perfil para os quatro tipos de textura em função da velocidade de corte: (a) corte a seco e (b) MQF. ($f = 0,10$ mm/volta e $a_p = 1,5$ mm).....	84
FIGURA 4.16 – Desvio aritmético médio para os quatro tipos de textura em função do avanço: (a) corte a seco e (b) MQF. ($v_c = 200$ m/min e $a_p = 1,5$ mm).....	85
FIGURA 4.17 – Altura máxima do perfil para os quatro tipos de textura em função do avanço: (a) corte a seco e (b) MQF. ($v_c = 200$ m/min e $a_p = 1,5$ mm)	85
FIGURA 4.18 – Desvio aritmético médio para os quatro tipos de textura em função da profundidade de usinagem: (a) corte a seco e (b) MQF. ($v_c = 200$ m/min e $f = 0,10$ mm/volta).....	86

FIGURA 4.19 – Altura máxima do perfil para os quatro tipos de textura em função da profundidade de usinagem: (a) corte a seco e (b) MQF. ($v_c = 200$ m/min e $f = 0,10$ mm/volta).....	86
FIGURA 4.20 – Comparação entre R_a no sistema a seco e com MQF para: velocidade de corte de 200 m/min, avanço de 0,10 mm/volta e profundidade de usinagem de 1,5mm.....	87
FIGURA 4.21 – Comparação entre R_z no sistema a seco e com MQF para: velocidade de corte de 200 m/min, avanço de 0,10 mm/volta e profundidade de usinagem de 1,5mm.....	88
FIGURA 4.22 – Formas dos cavacos nos sistemas a seco e com MQF em função de velocidade de corte ($f = 0,10$ mm/volta e $a_p = 1,5$ mm)	89
FIGURA 4.23 – Formas dos cavacos nos sistemas a seco e com MQF em função do avanço ($v_c = 200$ m/min e $a_p = 1,5$ mm).....	90
FIGURA 4.24 – Formas dos cavacos nos sistemas a seco e com MQF em função da profundidade de usinagem ($v_c = 200$ m/min e $f = 0,10$ mm/volta).....	91
FIGURA 4.25 – Desgaste de flanco máximo em relação ao tempo de usinagem no corte a seco. ($v_c = 200$ m/min, $f = 0,10$ mm/volta e $a_p = 1,5$ mm).....	92
FIGURA 4.26 – Desgaste de flanco máximo em relação ao tempo de usinagem no corte com MQF. ($v_c = 200$ m/min, $f = 0,10$ mm/volta e $a_p = 1,5$ mm)	93
FIGURA 4.27 – Imagem do MEV com ampliação de 100x da aresta de corte desgasta da ferramenta com passo de 60 μ m após 10 minutos de usinagem com o uso de MQF.....	94

LISTA DE TABELAS

TABELA 2.1 - Principais princípios físicos utilizados na texturização superficial.....	15
TABELA 3.1 - Parâmetros usados na retificação dos chanfros	60
TABELA 3.2 - Parâmetros de corte utilizados na texturização a <i>laser</i>	61
TABELA 3.3 - Nomenclatura dos grupos de ferramentas produzidas.....	62
TABELA 3.4 - Resultado de medição das cavidades analisadas	65
TABELA 3.5 - Resultado de medição das distâncias entre cavidades e colunas.....	65
TABELA 3.6 - Parâmetros dos testes realizados para medição das forças de usinagem.....	68

RESUMO

Em todo o mundo é comum o uso da operação de torneamento na indústria manufatureira, por isso, diversos estudos são realizados para melhorias neste processo. Atualmente, existe um grande foco em ferramentas com superfícies texturizadas artificialmente para aumentar seu desempenho em diversos processos da usinagem. O presente trabalho investiga o processo de torneamento de um ferro fundido cinzento com pastilhas de metal duro que foram submetidas à texturização a *laser* (*Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation*) na aresta de corte chanfrada, sendo produzidas três variações de texturas (cavidades semiesféricas). Também foi utilizado um grupo de pastilhas chanfradas sem texturização para comparação com as pastilhas modificadas. Os experimentos foram divididos em dois grupos: torneamento a seco e torneamento com a utilização do sistema de mínima quantidade de fluido de corte (MQF). Este trabalho avaliou a variação da textura da ferramenta sobre: a força de usinagem, a rugosidade da peça torneada, o cavaco produzido e o desgaste de flanco dos insertos. Os resultados obtidos indicaram que no corte a seco o uso de texturas não é vantajoso para a redução da força de usinagem e da rugosidade. As texturas só são interessantes com o uso do sistema de MQF, mas apenas para alguns valores de velocidade de corte, avanço e profundidade de usinagem. Além disso, o uso da mínima quantidade de fluido de corte propicia um aumento considerável da vida de todas as ferramentas testadas, principalmente, para as de texturas com maior número de cavidades. Mas esta redução do desgaste não está vinculada a uma redução da força de usinagem ou da rugosidade da peça.

Palavras chaves: Texturização a *laser*; Torneamento; Mínima quantidade de fluido de corte; Força de usinagem; Rugosidade; Vida da ferramenta.

1 INTRODUÇÃO

A usinagem é um dos diversos ramos de processo de fabricação existentes, sendo reconhecida como o processo de fabricação mais popular no mundo. A usinagem é uma operação que confere forma e dimensão à peça com a produção de cavaco. Entende-se como cavaco a porção de material retirada da peça pela ferramenta e caracterizada por apresentar forma irregular. O processo de usinagem transforma em cavaco quase 10% de toda a produção de metais e emprega milhões de pessoas no mundo todo.

O torneamento é uma das principais operações de usinagem, na qual a peça gira e a ferramenta de corte avança em direção à mesma. Portanto, o estudo sobre esta operação é fundamental para redução de custos e melhoria da manufatura de diversos produtos. Um ponto importante para este estudo é análise da força de usinagem, pois uma redução nesta força induz temperaturas de corte menores que, por sua vez, possibilitam um aumento na vida útil da ferramenta de corte, proporcionando custos de produção menores. Outro fator importante decorrente da redução da força de usinagem é a diminuição na potência e na rigidez requerida da máquina-ferramenta, permitindo o uso de máquinas mais simples e de menor custo.

A modificação controlada em superfícies de ferramentas de corte por meio de usinagem a *laser* (*Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation*) pode melhorar o desempenho destas nas diversas operações de usinagem, sendo esta modificação uma área de pesquisa relativamente nova. A texturização controlada de superfícies ainda carece de muitos estudos, pois não existem muitas definições sobre a influência de texturas criadas em superfícies de ferramentas de corte para melhorar a usinabilidade de um material. A texturização de ferramentas possui um grande potencial para aumentar a eficiência nos processos de fabricação existentes. Por isso, a principal justificativa deste trabalho é a contribuição científica para a viabilização da tecnologia a *laser* na produção de ferramentas mais eficientes. Este estudo tem o intuito de produzir e testar texturas na aresta de corte para criar possíveis reservatórios de ar ou de fluido de corte, melhorando assim o desempenho no torneamento de um ferro fundido cinzento.

O objetivo geral deste trabalho é analisar o desempenho de ferramentas de corte texturizadas a *laser* durante a operação de torneamento a seco e com mínima quantidade de

fluido de corte do ferro fundido cinzento GG30, com ênfase nas forças de usinagem, rugosidade da superfície torneada, cavacos produzidos e vida das ferramentas de corte.

O estudo se justifica, pois ainda não existem estudos sobre a influência de texturas em ferramentas de corte para os processos de usinagem do ferro fundido cinzento. Por isso, os resultados obtidos neste trabalho poderão estimular maiores pesquisas na área e indicar possíveis vantagens e desvantagens da utilização de insertos com modificações na aresta de corte para o processo de torneamento do ferro fundido cinzento. Se as vantagens detectadas forem significativas será possível aplicar esta melhoria na indústria manufatureira.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Para uma melhor compreensão da metodologia empregada e da pesquisa realizada, nesta seção serão abordados conceitos referentes à texturização de ferramentas de corte, à força de usinagem, ao desgaste de ferramentas de corte e ao uso do sistema de mínima quantidade de fluido de corte (MQF).

2.1 Texturização

Toda superfície pode ser caracterizada por sua textura e estrutura. Neste caso, a palavra textura se refere aos picos e depressões geralmente desordenados presentes na superfície. O arranjo ordenado desses picos e depressões pode modificar a funcionalidade da superfície (VIANA, 2009). Superfícies onde o processo de fabricação é melhorado para alterar a sua geometria ou suas propriedades, com o intuito de se obter uma função específica, são chamadas de superfícies de engenharia (EVANS; BRYAN, 1999). Estas superfícies podem ser aprimoradas por meio de um processo de texturização que pode alterar consideravelmente, e de forma controlada, sua morfologia.

O processo de texturização superficial tem como objetivo controlar a textura em um local determinado de uma superfície, criando um relevo uniforme, em escala micro ou nanométrica, com depressões e picos regularmente distribuídos. Este processo é amplamente utilizado em várias áreas da engenharia para melhorar o desempenho de componentes mecânicos em vários aspectos. Na produção de ferramentas de corte, este processo pode ser aplicado para melhorar a aderência dos revestimentos depositados sobre a ferramenta (VIANA, 2009). Na usinagem convencional, pode-se modificar a superfície de saída da ferramenta de corte e reduzir o contato cavaco/ferramenta, reduzindo assim a força de usinagem, a temperatura de corte e o desgaste da ferramenta. Na usinagem não convencional, Han, Min e Lee (2011) mostram que é possível gerar microtexturas na superfície de uma ferramenta cilíndrica utilizada como eletrodo de corte no processo de usinagem de descarga por eletroerosão a fio, obtendo melhor acabamento e precisão no corte de vidros com espessura de 0,4mm. Um exemplo para outros processos de fabricação é a aplicação de texturas próprias e adequadas em ferramentas para estampagem (FRANZEN et al., 2010).

2.1.1 Tipos de texturização

Alguns estudos mostram técnicas variadas na produção controlada de texturas em superfícies, chamadas de superfícies de engenharia, com escala micro ou nanométrica. Bruzzone et al. (2008) afirmam que as técnicas de texturização devem superar os desafios do volume de produção, mas sendo flexíveis e baratas. Eles também descrevem os quatro principais princípios físicos utilizados na produção de texturas, como mostrado na TAB. 2.1.

TABELA 2.1

Principais princípios físicos utilizados na texturização superficial.

Princípio físico	Descrição
Adição de material	Textura criada pela adição de material na superfície desejada, criando pequenas áreas com relevos.
Remoção de material	Textura criada através da remoção de material, criando pequenas depressões.
Movimentação de material	A mudança na superfície é atribuída à deformação plástica e à redistribuição do material deformado em outras áreas da mesma.
Autoformação	Regiões resistentes ao desgaste são colocadas sobre uma superfície de modo que uma textura é desenvolvida através do desgaste desta superfície, pois as regiões resistentes ficam acima das regiões circundantes desgastadas.

Um exemplo de microtextura produzida com adição de material é mostrado por Vepsäläinen et al. (2012). A estrutura mostrada na FIG. 2.1 foi produzida através da injeção de polipropileno com uso de micromoldes de alumínio fabricados por robôs próprios para microescala. Este processo permite criar microtexturas em superfícies de diversos polímeros, possibilitando várias aplicações, uma vez que permite a criação de uma grande variedade de aspectos (cores, *design*, etc).

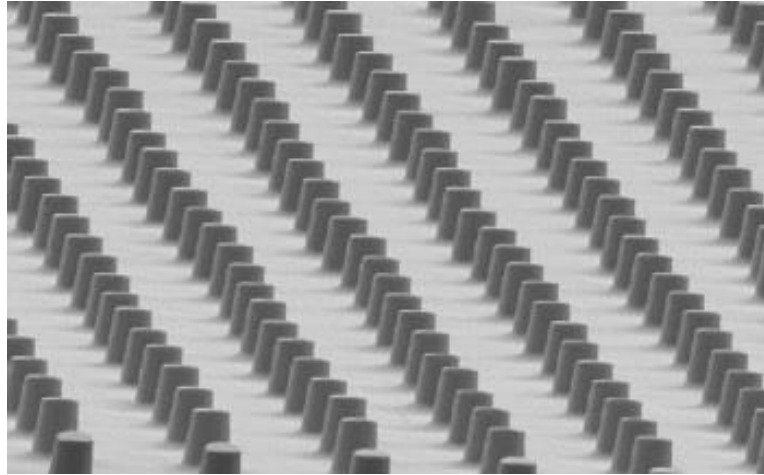


FIGURA 2.1 – Vista lateral de uma superfície microtexturizada de polipropileno com estruturas espaçadas entre si e entre fileiras de 100 μm .

FONTE – VEPSÄLÄINEN et al., 2012, p. 526

As ferramentas de corte texturizadas a *laser* utilizam o princípio físico de remoção de material. Outros métodos que utilizam a remoção de material são citados por Bruzzone et al. (2008): usinagem por descarga elétrica (*Electrical Discharge Machining* - EDM), texturização por feixe de íons (*Ion Beam Texturing* – IBT), usinagem ultrassônica, retificação, usinagem com abrasivos livres, microusinagem, etc. Chang et al. (2011) utilizam o processo de feixe de íons concentrados (*Focused Ion Beam* – FIB) para criar microestruturas, com orientações diferentes, na superfície de saída de ferramentas para o processo de fresamento de topo.

Um exemplo de microusinagem é mostrado por Brinksmeier, Riemer e Twardy (2010), que utilizaram o microfresamento e a microretificação para produzir microtexturas. A superfície texturizada é de aço para trabalho a frio e foi analisada quanto ao comportamento tribológico. As texturas produzidas formam linhas que tiveram o espaçamento variado entre 3 a 200 μm para avaliar os efeitos tribológicos. Os resultados mostraram que a escolha certa do espaçamento entre as linhas reduziu o coeficiente de atrito na superfície texturizada independente da tecnologia de usinagem utilizada. A FIG. 2.2 mostra as três ferramentas utilizadas no processo de micro usinagem.

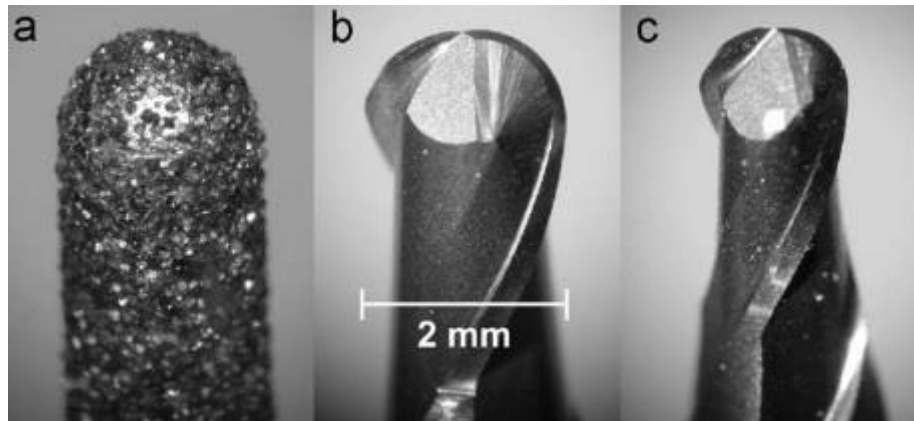


FIGURA 2.2 – (a) Rebolo de diamante D91 ($\phi = 2$ mm), (b) fresa de topo esférico de metal duro revestido com TiAlN ($\phi = 2$ mm) e (c) fresa de topo esférico de metal duro revestido com TiAlN ($\phi = 1,5$ mm).

FONTE – BRINKSMEIER; RIEMER; TWARDY, 2010, p. 427

Um exemplo do uso da usinagem ultrassônica na texturização de superfícies planas é apresentado por Xu et al. (2014), que propõem uma nova técnica de texturização ultrassônica rotatória (TUR) para produzir micro canais lineares e micro/nano canais senoidais em superfícies planas galvanizadas de níquel e fósforo (Ni-P). Os resultados indicaram que a técnica pode ser utilizada para fabricar texturas periódicas em micro e nanoescalas. Além disso, os diferentes tipos de texturas podem ser produzidos pelo controle dos parâmetros de corte: vibração, rotação e avanço.

A maioria dos trabalhos publicados, analisados neste capítulo, utiliza a técnica de texturização por *laser* (princípio de remoção de material). A vantagem da utilização do *laser* na texturização de superfícies é a sua aplicação localizada, atingindo exatamente o local desejado do elemento a ser alterado, com uma distribuição uniforme da textura (VIANA, 2009).

O uso do *laser* (Amplificação da Luz por Emissão Estimulada de Radiação) é considerado um processo de usinagem não convencional. A usinagem a *laser* ocorre quando há interação entre um feixe intenso e coerente de luz monocromática e a peça, provocando a retirada de material por vaporização. Em situações normais, um átomo tende a permanecer no nível de energia mais baixo possível, mas, quando exposto à radiação, ele provavelmente absorverá um fóton e será excitado para um nível de energia maior. Após alguns nanossegundos da excitação, ele emitirá um fóton e retornará ao nível mais baixo, mas, na prática, este processo exige três ou mais níveis de energia. O processo de emissão de um fóton pode acontecer de forma espontânea (átomos emitem fótons de forma aleatória) ou

estimulada, sendo que equipamento a *laser* utiliza a segunda forma citada. Na emissão estimulada, o fóton produzido possui a mesma energia do fóton estimulador, produzindo ondas luminosas associadas de mesma frequência. Além disso, as ondas associadas aos dois fótons possuem mesma fase e mesmo estado de polarização. Por isso, em um átomo estimulado a emitir energia luminosa, a onda que representa o fóton estimulado é somada à onda incidente em um processo construtivo, aumentando a amplitude e produzindo, ao contrário da emissão espontânea, um feixe coerente (ondas que formam o feixe estão em fase) (MCGEOUGH, 1988).

O funcionamento do equipamento a *laser* é baseado em dois espelhos paralelos, como mostrado na FIG. 2.3, entre os quais o feixe de luz sofre reflexões múltiplas, mantendo a mesma fase. O espaço entre os dois espelhos possui um meio amplificador (gasoso, líquido ou sólido) que garante o crescimento (aumento do comprimento de onda λ) da onda luminosa. Quando o feixe de luz atinge o comprimento adequado, o espelho M_2 , que é parcialmente transmissor, possibilita a sua propagação (MCGEOUGH, 1988).

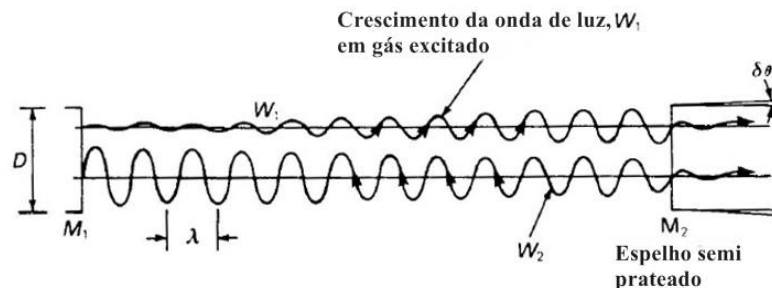


FIGURA 2.3 – Cavidade de interferometria do *laser*.

FONTE – MCGEOUGH, 1988, p. 90

Um dispositivo *laser* é constituído basicamente por três partes: meio ativo, fonte de energia e cavidade óptica, como mostrado na FIG. 2.4 (ARROYO, 2009): O meio ativo contém os átomos, dos quais seus elétrons através de saltos de níveis de energia emitem luz (fótons) constituindo o feixe *laser*. Este meio pode ser gasoso (mistura de gases como hélio e neônio), sólido (diodos *laser*) ou líquido. A fonte de energia é responsável pela excitação dos átomos com seus elétrons, garantindo que nos decaimentos de energia haja produção de luz (emissão de fótons). O termo “inversão de população” é utilizado quando a maioria dos átomos de um meio ativo apresenta elétrons excitados. As fontes de energia mais utilizados nos *lasers* industriais são: elétrica, óptica e química. Por fim, tem-se a cavidade óptica, que é o local que possui um mecanismo para promover amplificação do *laser* e permitir que uma

quantidade específica de energia (feixe *laser*) deixe o meio ativo para ser aplicado como ilustrado na FIG. 2.4.

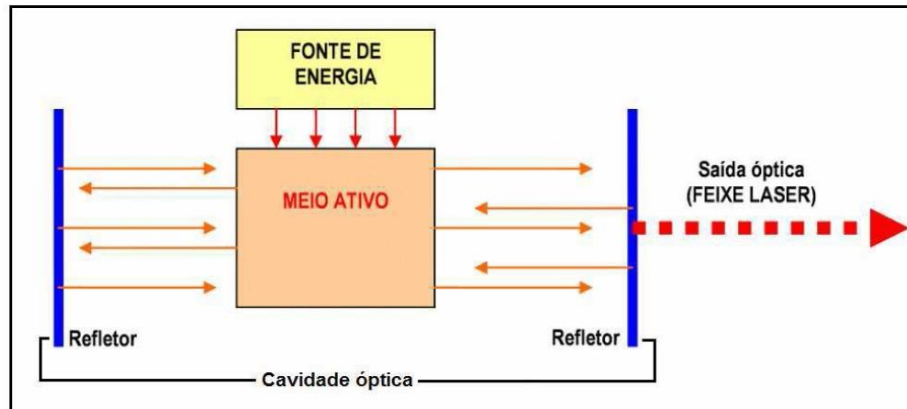


FIGURA 2.4 – Princípio da cavidade óptica.

FONTE – ARROYO, 2009, p. 9

Além de coerente, o feixe *laser* deve ser monocromático e altamente colimado (divergência menor do que 0,002 radianos). Por isso, o mecanismo óptico pode utilizar lentes simples, pois o feixe monocromático ocupa uma faixa muito estreita do espectro de luz. A escolha da lente depende da espessura e do tipo de material a ser usinado (MCGEOUGH, 1988).

Uma das principais vantagens do *laser* é permitir a transmissão de uma elevada quantidade de energia para uma pequena área focalizada sobre o material fabricado, provocando um rápido aquecimento do local submetido à radiação *laser*. Esta radiação é em parte absorvida e em parte refletida pela superfície. A qualidade do processamento a *laser* de uma superfície depende da combinação entre os parâmetros do feixe de *laser* e das propriedades do material usinado.

Para o *laser* pulsado (usado na fabricação de ferramentas deste trabalho) as propriedades importantes são (VIANA, 2009):

- Potência média do *laser*: é baixa quando comparada com outras fontes de energia e geralmente possui valor abaixo de 100 W, mas pode ser de alta potência chegando a mais de 1kW;
- Energia do pulso (E): é a razão entre potência média do *laser* em watts e a frequência de pulsação do *laser* em hertz, podendo variar desde 10^{-9} J até mais de 1J;
- Tempo do pulso (τ): é a duração do pulso que pode variar entre 10^{-12} e mais de 1s;

- Diâmetro do feixe de *laser* (d): pode variar desde 1 μm até mais de 10 mm;
- Intensidade, densidade de energia, irradiação do *laser* ou potência: é calculada por $E/(\tau \cdot \pi \cdot r^2)$, sendo fornecida em W/cm^2 .

Para usinagem (furação e corte) de um material, é necessário que o feixe possua intensidade suficiente para a sublimação do material da peça. A densidade de energia do *laser* sobre a peça pode ser variada por meio das configurações ópticas da máquina citadas anteriormente, como por exemplo, filtros, expansores de feixe e ajuste de foco (DUMITRU et al., 2005).

As principais propriedades do material usinado que influenciam a eficiência do processo a *laser* são (VIANA, 2009):

- Capacidade de absorção de energia do material: esta característica é ligada à condutividade térmica, calor específico, densidade e difusividade térmica do material;
- Refletividade da superfície: representa a parcela de energia perdida pelo material. Esta característica está ligada à composição, acabamento (rugosidade) e estado de oxidação da superfície.
- Propriedades termodinâmicas do material: a absorção de energia do *laser* pode alterar o estado físico do material com aumento de temperatura, provocando mudanças de fase (fusão e vaporização). Por isso, propriedades, como calor latente de fusão e calor latente de vaporização, devem ser consideradas.

Quanto menor a parcela refletida pela superfície maior será a energia absorvida durante a usinagem com *laser*. Esta energia é absorvida em uma fina camada de superfície, geralmente com espessura de 0,1 μm . É importante salientar que o comprimento de onda e o ângulo de incidência do feixe *laser* também influenciam na parcela de energia refletida pela superfície. Em geral, a refletividade dos metais aumenta com o aumento do comprimento de onda do feixe. Grande parte dos metais refletem cerca de 90% da radiação incidente para comprimentos acima de 5 μm (MCGEOUGH, 1988).

As etapas de remoção de material na usinagem com feixe de *laser* são ilustradas na FIG. 2.5. Primeiramente, a energia é absorvida pela superfície e é conduzida para o seu interior. Com o aumento da temperatura, ocorre a fusão do material e posteriormente sua vaporização, ocasionando a remoção do material. As zonas termicamente afetadas (ZTA) são inevitáveis, podendo atingir 200 μm de profundidade. O aumento da velocidade de avanço do feixe ou a redução da duração do pulso pode minimizar a ZTA durante a usinagem (HUBER; MARX, apud MCGEOUGH, 1988).

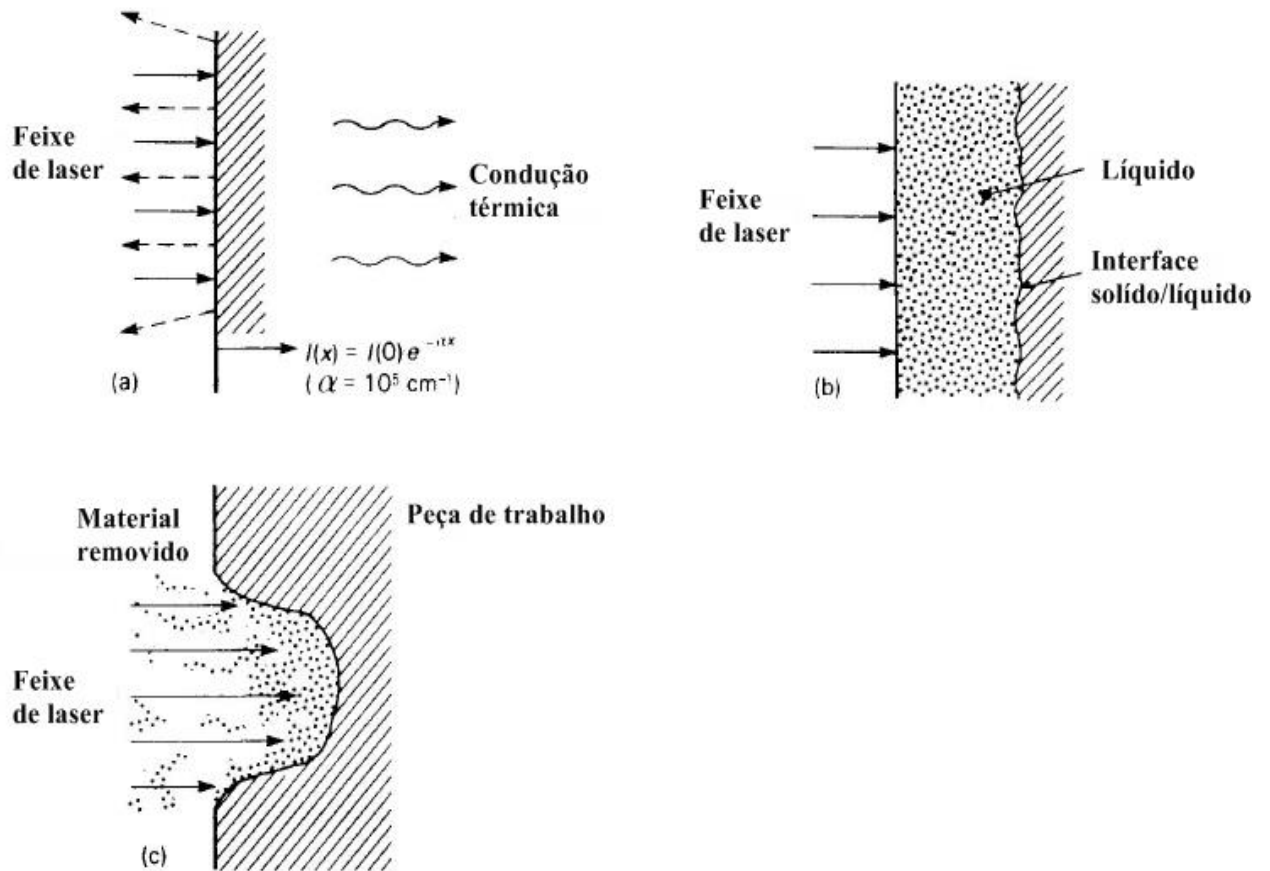


FIGURA 2.5 – Interação do feixe *laser* com a peça: (a) absorção e aquecimento, (b) fusão e (c) evaporação.
 FONTE - MCGEOUGH, 1988, p. 106

Quanto maior a intensidade do feixe, maior será a temperatura gerada na superfície, podendo ser suficiente para provocar mudanças de fase no material usinado. As mudanças na morfologia do material usinado por *laser* são induzidas, na maioria dos casos, por processo de difusão do calor. O controle da intensidade do *laser* pode permitir desde mudanças superficiais na peça (endurecimento superficial, revenimento), remoção precisa de material (micro usinagem, gravação) até a remoção substancial de material (corte, furação) (DUMITRU et al., 2005).

O feixe *laser* pode operar em dois modos: contínuo ou pulsado. O primeiro permite o uso de velocidades de avanço maiores devido à potência média mais elevada; contudo, o segundo tipo diminui consideravelmente os danos térmicos. Equipamentos com duração de pulso entre picossegundos (10^{-12} s) e femtossegundos (10^{-15} s) não produzem zonas danificadas pelo calor (LIMA apud ABRÃO, 2011).

2.1.2 Aplicações da texturização a laser

A texturização controlada ou artificial de uma superfície pode ser aplicada em diversas áreas. Bruzzone et al. (2008) afirmam que a superfície representa uma interface através da qual ocorre um grande número de fenômenos e comenta sobre as áreas que utilizam esse recurso: eletrônica, tecnologia da informação, energia, óptica, tribologia, biologia e biomimética . As aplicações possuem objetivos diversos, tais como: aumentar a área de contato, melhorar a adesão, aumentar ou reduzir o atrito, melhorar a lubrificação de componentes mecânicos, reduzir o desgaste, controlar a molhabilidade da superfície, aumentar a transferência de calor e proporcionar efeitos estéticos.

A energia de superfície é um aspecto importante, pois controla muitas propriedades interessantes que desempenham um importante papel na aplicação de superfícies de engenharia. Considerando-se um sistema com três fases (sólido, líquido e gasoso), a molhabilidade é a característica mais importante governada pela energia de superfície. A molhabilidade representa o contato entre uma superfície sólida e uma líquida, dependendo das interações intermoleculares. O fenômeno é controlado pela minimização das energias nas interfaces (tensão superficial). O grau de molhabilidade é dado em função do ângulo de contato θ , ou seja, o ângulo entre a interface líquido/vapor e interface sólido/líquido. A superfície não molhável tem um θ maior ou igual a 90° e, portanto, uma superfície molhável apresenta ângulo de contato inferior a 90° . Em canais com diâmetros de 100 nm a várias centenas de micrometros prevalecerão forças de superfície em relação às forças de massa, sendo que fatores como a tensão superficial, a dissipação de energia e a resistência do fluido governam o sistema. Por isso, o fluxo de fluido em micro escala age de forma diferente do que em escala macroscópica (BRUZZONE et al., 2008).

Um exemplo de aplicação é mostrado por Römer et al. (2009), que apresentam uma texturização a *laser* feita na superfície de um aço inoxidável (FIG. 2.6). A textura é formada por uma nanoestrutura ondulada e organizada sobreposta a uma microestrutura também ondulada e organizada. Este tipo de estrutura fornece características hidrofóbicas importantes à superfície, pois o controle do tamanho da nanoestrutura e da microestrutura possibilita alterar o ângulo de contato θ do líquido com a superfície.

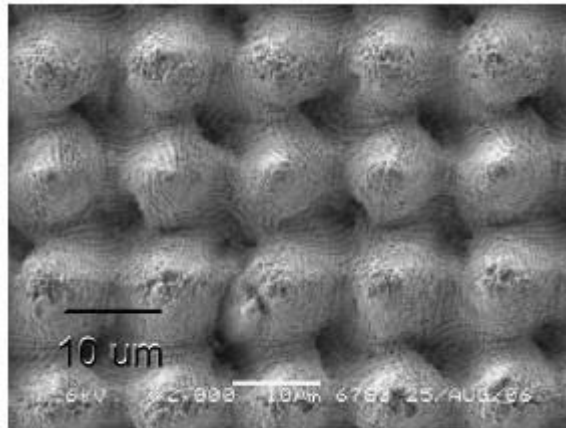


FIGURA 2.6 – Imagem obtida por MEV de uma superfície de aço inoxidável texturizada a *laser*.

FONTE - RÖMER et al., 2009, p. 204

Dumitru et al. (2005) testaram uma superfície de WC-Co texturizada à *laser* (FIG. 2.7) com uma distribuição uniforme de poros para servirem de reservatórios de lubrificantes nos pontos críticos desta superfície. Após os testes tribológicos, realizados com uma esfera de metal duro oscilando sobre as superfícies de testes com lubrificação, foi constatada uma redução considerável no coeficiente de atrito quando comparado com uma superfície sem a microestrutura dos poros. Além disso, imagens obtidas com análise de energia dispersiva de raio-X (EDX) mostraram que a microestrutura fabricada resistiu ao teste, tendo apenas alguns poros preenchidos com detritos da esfera (DUMITRU et al., 2005).

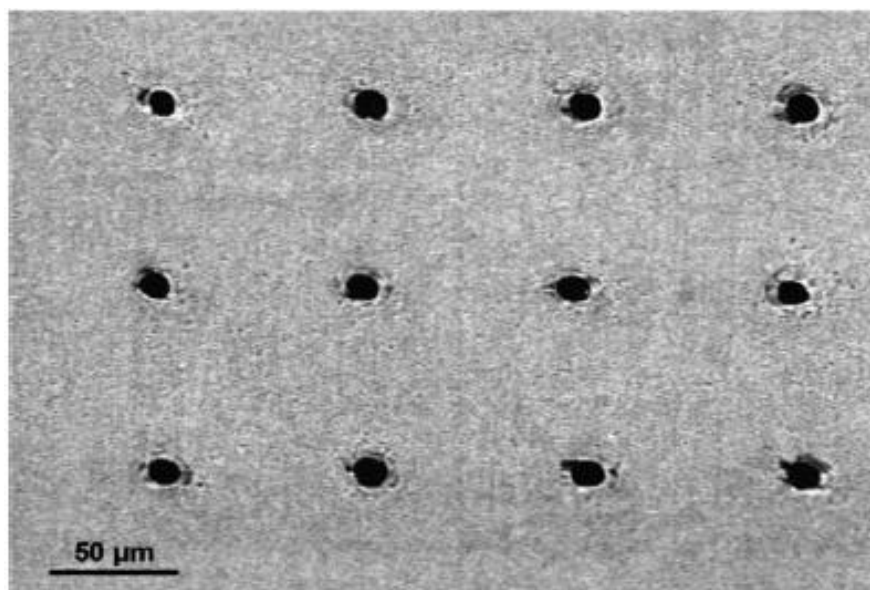


FIGURA 2.7 – Superfície de WC-Co com microestrutura feita a *laser*.

FONTE – DUMITRU et al., 2005, p. 284

Na área industrial, o feixe *laser* pode ser usado para: soldagem, tratamento superficial, fratura controlada de componentes eletrônicos, gravação e fratura de materiais frágeis (cerâmicas), ajustagem de componentes eletrônicos, balanceamento e deposição de materiais resistentes ao desgaste ou oxidação.

Em usinagem, o feixe *laser* é usado para furação e corte de diversos materiais (metais, cerâmicos e plásticos). Além disso, seu uso permite criar texturas padronizadas com o objetivo de melhorar o desempenho de ferramentas de corte. Dumitru et al. (2005) mostram a versatilidade da técnica para fabricar quebra-cavacos integrais, com dimensões entre 0.1 e 1 mm em ferramentas de corte sinterizadas (FIG. 2.8).

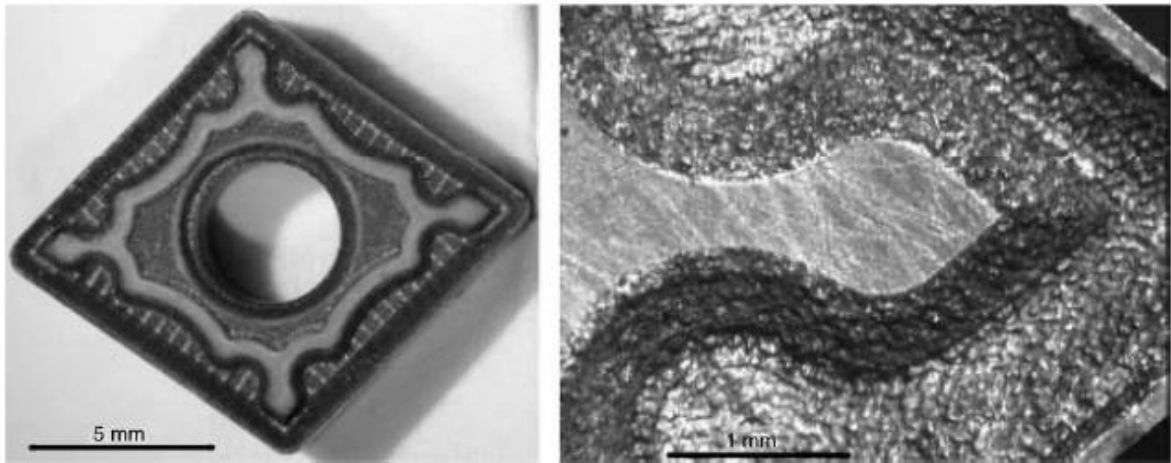


FIGURA 2.8 – Quebra-cavaco integral fabricado por usinagem a *laser* em ferramenta de corte sinterizada padrão.

FONTE - DUMITRU et al., 2005, p. 285

A texturização a *laser* no tratamento do substrato de ferramentas de metal duro, antes do processo de deposição do revestimento por deposição física de vapor (PVD), resultou em melhor desempenho quando comparado ao processo convencional por jateamento, sendo uma alternativa no processo de fabricação de ferramentas de metal duro revestidas, com a melhora da adesão dos revestimentos de cromo alumínio (AlCr), nitreto de cromo alumínio (AlCrN) e nitreto de titânio alumínio (TiAlN) (VIANA, 2009).

Neves (2010) também avaliou a eficácia da texturização a *laser* como alternativa ao jateamento para preparação da superfície do substrato de ferramentas de metal duro antes da aplicação de revestimento. Após testes de usinagem comparativos entre os revestimentos depositados por deposição química de vapor (CVD) sobre substratos texturizados comercialmente e aplicados sobre substratos texturizados a *laser*, conclui-se que as

ferramentas texturizadas a *laser* não apresentaram vida mais longa em nenhuma das condições testadas, pois a modificação a *laser* não eliminou os defeitos produzidos pelo processo CVD, mas os tornou mais graves. Já os ensaios de usinagem comparativos com os revestimentos depositados por PVD mostraram que as ferramentas texturizadas a *laser* apresentaram vida mais longa em todas as condições testadas, pois a ancoragem gerada pela maior rugosidade da superfície texturizada aumentou a adesão do revestimento no substrato.

Enomoto e Sugihara (2010) geraram uma texturização em formato de malha (FIG. 2.9) na superfície de saída de insertos de metal duro usados no processo de fresamento de uma liga de alumínio. Inicialmente as ferramentas receberam um revestimento de DLC (*Diamond like carbon*), uniformemente aplicado na superfície de saída, por meio do processo de deposição química de vapor (CVD). Em seguida, uma malha de fios de tungstênio foi colocada acima da superfície de saída para servir como máscara para criação de uma grade. Após isto, uma segunda camada de DLC foi aplicada novamente por CVD, resultando num filme com segmentos no tamanho de $150\ \mu\text{m} \times 150\ \mu\text{m}$ e sulcos com profundidade de $0,8\ \mu\text{m}$ e espaçamento de $80\ \mu\text{m}$. Entretanto, a tentativa não teve sucesso, pois o cavaco entrou facilmente nos sulcos produzidos, devido ao grande tamanho deles, e provocou o seu entupimento e o aumento da aderência de material sobre a superfície.

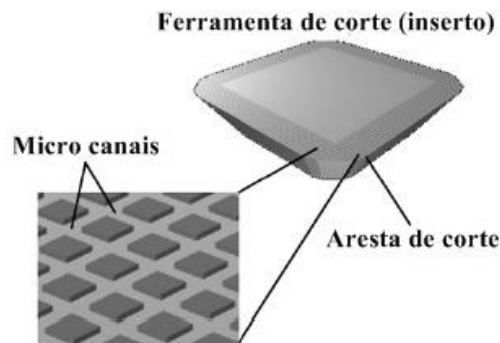


FIGURA 2.9 – Microtextura desenvolvida na ferramenta de corte.

FONTE – ENOMOTO; SUGIHARA, 2010, p.598

Obikawa et al. (2011) produziram por deposição de material quatro texturas com geometrias diferentes nas superfícies de saída de ferramentas revestidas com DLC ou nitreto de titânio (TiN) para o corte ortogonal de uma liga de alumínio (A6061-T6). As geometrias são mostradas esquematicamente na FIG. 2.10: (a) canais perpendiculares à aresta principal de corte, (b) canais unidirecionais paralelos à aresta principal de corte, (c) matriz com furos quadrados, chamada de “furo” e (d) matriz com pontos quadrados, chamada de “ponto”. Os

resultados mostraram que a geometria paralela à aresta de corte e a geometria de pontos apresentaram redução mais efetiva, quando comparadas com os outros tipos de texturas e a ferramenta sem texturização, na força de atrito e no coeficiente de atrito na superfície de saída da ferramenta de corte. Também foi constatado que a microestrutura pode ser mais efetiva com a redução no tamanho das texturas ou com o aumento na profundidade das texturas.

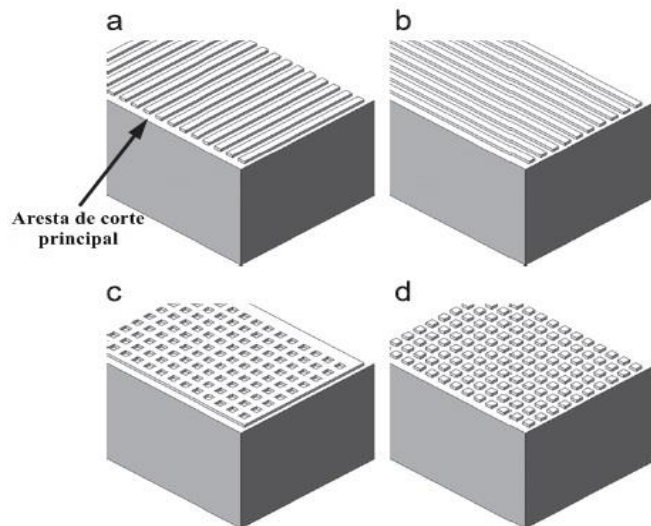


FIGURA 2.10 – Quatro tipos de texturas produzidas na superfície de saída: (a) perpendicular, (b) paralelo, (c) furo e (d) ponto.

FONTE – OBIKAWA et al., (2011), p.967

2.2 Força de usinagem

O estudo sobre a força de usinagem e seus componentes em qualquer processo de usinagem é fundamental, pois possibilita estimar a potência necessária ao corte e os esforços sobre os elementos da máquina operatriz. Além disso, a força de usinagem possui relação direta com o desgaste das ferramentas de corte, influenciando a viabilidade econômica do processo.

Na maioria das operações de usinagem, o cavaco é formado tridimensionalmente, por isso a força de usinagem (F_u) possui três componentes básicos que agem diretamente na cunha cortante, ou seja, a força de usinagem é considerada como uma ação da peça sobre a ferramenta. A FIG. 2.11 mostra a força de usinagem tridimensional e seus componentes para a operação de torneamento.

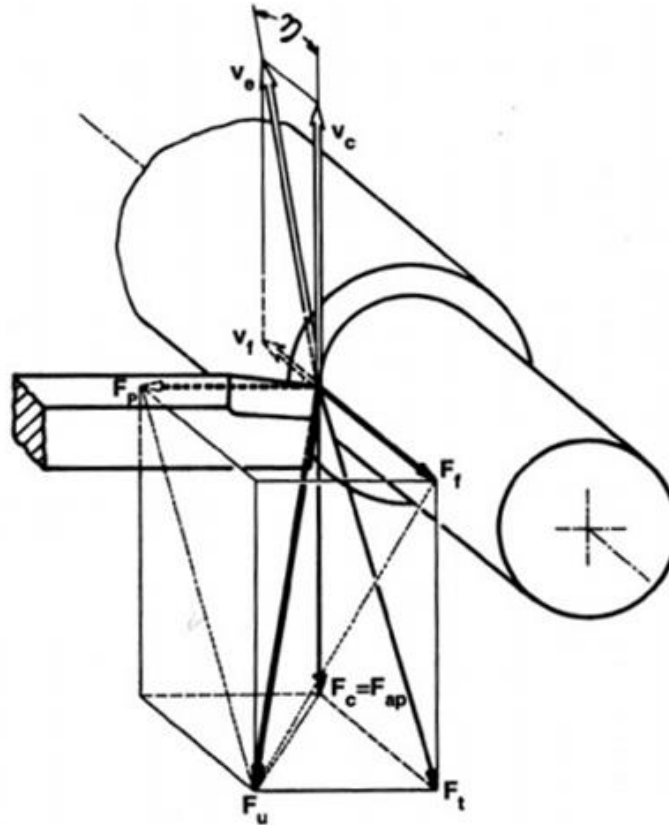


FIGURA 2.11 – Componentes da força de usinagem no torneamento.

FONTE – Adaptado de FERRARESI, 1970, p. 156

Os três componentes básicos da F_u e suas definições são dadas a seguir (FERRARESI, 1970):

- Força de corte ou força principal de corte (F_c): é a projeção da força de usinagem sobre o plano de trabalho (plano que contém as direções de avanço e corte), na direção de corte, dada pela velocidade de corte (V_c).
- Força de avanço (F_f): é a projeção da força de usinagem sobre o plano de trabalho, na direção de avanço da ferramenta, dada pela velocidade de avanço (V_f).
- Força passiva ou força de profundidade (F_p): é a componente da força de usinagem perpendicular ao plano de trabalho.

Por meio das definições anteriores, pode-se calcular a força de usinagem resultante para operação de torneamento através das suas três principais componentes, como mostrado na EQ. 2.1:

$$F_u = \sqrt{F_c^2 + F_f^2 + F_p^2} \text{ [N]} \quad (2.1)$$

2.2.1 Força de corte teórica

A principal componente da força de usinagem para dimensionamento do motor principal da máquina ferramenta é a força de corte. Por isso, analisar e compreender todos os fatores que influenciam esta força é fundamental para melhoria de qualquer processo convencional de usinagem.

Diversos experimentos mostraram que os componentes da força de usinagem variam, quase linearmente, com a seção do cavaco, em especial a força de corte. Devido à relação linear entre a força de corte e a área da seção de corte, pode-se propor a primeira equação para determinação teórica da força de corte (MACHADO et al., 2011):

$$F_c = k_s \cdot A \quad [\text{N}] \quad (2.2)$$

Sendo:

k_s – pressão específica de corte [N/mm^2]

A – área da seção de corte [mm^2]

Considerando que a ferramenta não possua raio de ponta, a pressão específica de corte é a força necessária para remoção de 1 mm^2 da seção de corte. Pensava-se que a pressão específica dependia apenas do material da peça, mas testes mostraram que ela varia em função de diversos fatores discutidos a seguir (MACHADO et al., 2011).

Geralmente, quando a dureza da peça aumenta, a pressão específica de corte também aumenta. Mas essa afirmação não é uma regra geral, porque materiais com durezas próximas podem ter valores de k_s muito diferentes devido a vários fatores, como por exemplo, a presença de elementos de liga, que podem formar carbonetos com dureza semelhante à da ferramenta ou formar pontos de baixa resistência mecânica ou até mesmo agirem como lubrificantes na interface cavaco/ferramenta. A tensão de ruptura ao cisalhamento do material é a propriedade que mais pode ser relacionada com a pressão específica, pois a formação do cavaco ocorre, basicamente, por ruptura ao cisalhamento. Entretanto, esta relação deve ser analisada com cautela, uma vez que a tensão de ruptura é obtida em ensaios estáticos e a formação de cavaco ocorre em velocidades de ruptura da ordem de 10^5 s^{-1} .

A variação do material da ferramenta ou do acabamento da superfície de saída (coberturas, etc.) provoca mudanças no coeficiente de atrito entre ferramenta/cavaco e estas mudanças podem alterar os valores de k_s . Ferramentas revestidas com TiN tendem a diminuir

o coeficiente de atrito nas interfaces ferramenta/cavaco e ferramenta/peça, propiciando valores de k_s menores. Quanto à geometria da ferramenta, os ângulos de saída (γ_0), principalmente, e de inclinação (λ_s) promovem uma diminuição da pressão específica com o aumento dos seus valores, porque este aumento diminui a deformação do cavaco. Por outro lado, na usinagem de materiais frágeis, como ferro fundido, que se deforma pouco antes da ruptura, a influência desses ângulos sobre k_s pode ser desprezada. A diminuição do ângulo de folga (α_0) aumenta o atrito entre a peça e a ferramenta, gerando aumento no valor de k_s . Essa situação é válida quando α_0 é menor que 5° , pois valores muito acima de 5° praticamente não influenciam o valor da pressão específica e diminuem a resistência mecânica da ferramenta. O ângulo de posição da ferramenta (χ_r) possui pouca influência sobre os valores de k_s para usinagem com uma única aresta e valores entre 45° e 90° . Em geral, no torneamento, a pressão específica diminui quando χ_r aumenta de 45° para 90° .

A pressão específica diminui com o aumento da área da seção de corte (EQ. 2.2).

A FIG. 2.12 mostra que a diminuição de k_s é devida principalmente ao aumento do avanço (f).

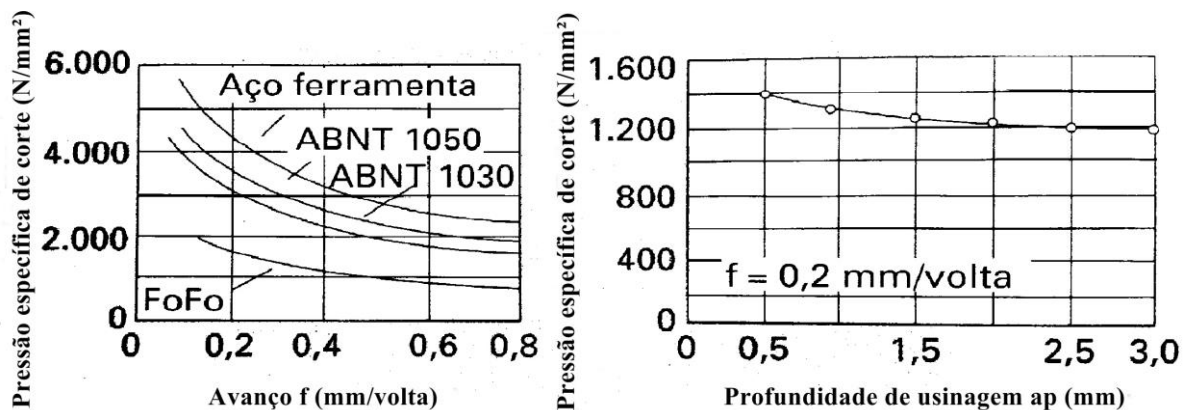


FIGURA 2.12 – Variação da pressão específica de corte com o avanço e a profundidade de usinagem.

FONTE – Adaptado de FERRARESI, 1970, p. 166

Para velocidades de corte usualmente utilizadas para evitar o surgimento de arestas postiças de corte (APC), a pressão específica de corte tende a diminuir levemente com o aumento da velocidade de corte, porque o aumento dessa velocidade de corte proporciona diminuição da deformação e da dureza do cavaco, diminuição dos coeficientes de atrito e aumento da temperatura de corte. Ou seja, o aumento da velocidade de corte dentro de uma faixa específica tende a diminuir a força de corte.

Em relação à lubrificação e à refrigeração, quanto mais eficiente for a penetração do fluido de corte e quanto maior for seu efeito lubrificante, maior será a diminuição da

pressão de corte, pois esta condição afeta diretamente as condições de atrito entre cavaco e ferramenta. Mas deve-se lembrar de que, para altas velocidades de corte, o efeito lubrificante na formação de cavacos é reduzido.

O aumento do desgaste na superfície de folga, denominado desgaste de flanco (representado por VB), aumenta a pressão específica de corte devido ao crescimento da área de contato entre ferramenta e peça. Já para o aumento do desgaste na superfície de saída da ferramenta, denominado desgaste de cratera, o aumento de k_s não é tão marcante.

Por fim, diversos modelos analíticos foram propostos para estabelecer a relação entre a pressão específica de corte e algumas propriedades conhecidas ou mensuráveis para diversos materiais utilizados em usinagem, mas elas não resultaram em valores teóricos próximos aos medidos experimentalmente; por isso, a pressão específica de corte passou a ser determinada em laboratório para cada par ferramenta/peça em função dos parâmetros de corte (MACHADO et al., 2011).

Thamizhmanii e Hasan (2006) mediram a força de corte durante o torneamento a seco de um ferro fundido cinzento variando quatro valores de velocidade de corte (35, 45, 100 e 135 m/min) e quatro valores de avanço (0,08, 0,10, 0,125 e 0,16 mm/volta), sendo a profundidade de usinagem foi fixada em 0,5 mm. Para os avanços de 0,10 e 0,16 a força apresentou o mesmo comportamento com o aumento da velocidade de corte, representando um aumento da força entre as velocidades de corte de 35 a 100 m/min e uma estabilização na força entre as velocidades de corte de 100 a 135 m/min. Já para os avanços de 0,08 e 0,125 mm/volta a força de corte apresentou oscilação com o aumento da velocidade de corte, tendo os menores valores na velocidade de corte de 100 m/min.

2.2.2 Métodos de medição da força de usinagem

A medição da força de usinagem é de extrema importância, tanto nos processos industriais, quanto em pesquisa científica, pois os dados obtidos permitem o cálculo da estrutura e dos mecanismos de acionamento das máquinas operatrizes e permitem o cálculo da potência de usinagem para determinar o rendimento da máquina operatriz com diferentes cargas e velocidades de trabalho. Para estas aplicações, a medição de caráter estático e a determinação de valores médios das forças normalmente são suficientes. Contudo, para o estudo detalhado de formação de cavacos ou de estabilidade dinâmica da máquina-ferramenta é necessária a medição das componentes dinâmicas da força de usinagem. Estas componentes

são medidas por meios de dinamômetros, que devem satisfazer a certos requisitos (FERRARESI, 1970):

- **Sensibilidade:** é a relação entre a variação da grandeza indicada pelo dinamômetro e a variação da grandeza que está sendo medida. É recomendado que a sensibilidade seja constante em toda escala do aparelho indicador, pois a linearidade da curva característica do dinamômetro (leitura/força) facilita a interpretação dos resultados, principalmente na medições dinâmicas da força de usinagem. Além disso, o aumento de sensibilidade não pode ser confundido com o aumento de precisão de um aparelho.

- **Precisão:** a precisão de um dinamômetro está relacionada à sua capacidade de fornecer um resultado de medição o mais coincidente possível do valor real da grandeza a se medir, excluindo os erros sistemáticos e aleatórios. Alguns exemplos desses erros são: erro de leitura, erro de fidelidade, erro de histerese e erro sobre zero.

- **Rigidez:** um instrumento de medição não deve influenciar a grandeza a se medir, portanto um dinamômetro não pode deformar excessivamente durante a medição de força, pois isso pode alterar os parâmetros de usinagem do processo medido e influenciar diretamente no valor da força. Além disso, a rigidez também é relacionada à frequência natural de vibração do equipamento de medição, sendo este parâmetro muito importante para as medições dinâmicas.

- **Exatidão:** nas medições dinâmicas de força o dinamômetro deve apresentar valores sem grandes variações (distorções) para a mesma condição de teste, ou seja, para medições no tempo, não devem ocorrer atrasos em relação ao fenômeno que está sendo medido e nem mudanças por conta da variação da frequência.

- **Insensibilidade em relação à temperatura e à umidade:** o aumento de temperatura da ferramenta e a umidade ambiente durante um processo de usinagem são grandezas que não podem ser evitadas, mas um dinamômetro deve ser construído para ser o mais insensível possível à variação dessas grandezas. Para minimizar o efeito da umidade, os dinamômetros utilizam uma vedação especial.

- **Mínimo efeito cruzado:** o estímulo de força em um eixo do dinamômetro não deve interferir nos demais, pois pode ocasionar valores distorcidos dos reais.

Em geral, a força de usinagem é medida através de seus três componentes em direções ortogonais ou através de quatro componentes para incluir o torque em processos com ferramentas rotativas, como por exemplo, o fresamento. Em geral, os dinamômetros utilizados nas medições de força de usinagem são baseados no princípio dos extensômetros ou cristais

piezoelétricos. Nesta revisão, será dada atenção apenas aos cristais piezoelétricos, porque o dinamômetro utilizado neste trabalho baseia-se neste princípio de funcionamento.

Geralmente, os dinamômetros piezoelétricos são mais compactos e mais rígidos mecanicamente do que os feitos com extensômetros. Por isso, a medição da força se torna menos intrusiva e possibilita medições de fenômenos com alta frequência (até 200 kHz). A piezoelectricidade é a propriedade que alguns cristais apresentam de se polarizar eletricamente quando submetidos a deformações elásticas. O inverso também é verdadeiro, ou seja, quando submetidos a uma polarização elétrica, produzem deformações. Diversos materiais naturais e artificiais apresentam esse comportamento: quartzo, turmalina, açúcar de cana, sal de Rochele, tartarato de potássio e titanato de bário. Para a medição de componentes da força de usinagem, os cristais são colocados entre partes metálicas do dinamômetro com o intuito de medir a tensão elétrica produzida durante o esforço mecânico. Além disso, para medição das forças é necessário o uso de amplificadores de carga, pois as cargas e, conseqüentemente, as tensões elétricas geradas pelos esforços mecânicos nos cristais são muito baixas (MACHADO et al., 2011). A FIG. 2.13 mostra um invólucro de um dinamômetro contendo quatro cristais piezoelétricos para medir quatro componentes distintos (M_z , F_x , F_y e F_z). A direção de aplicação da carga sobre este invólucro irá determinar quais cristais apresentarão diferença de potencial, registrando assim a força ou torque naquela direção.

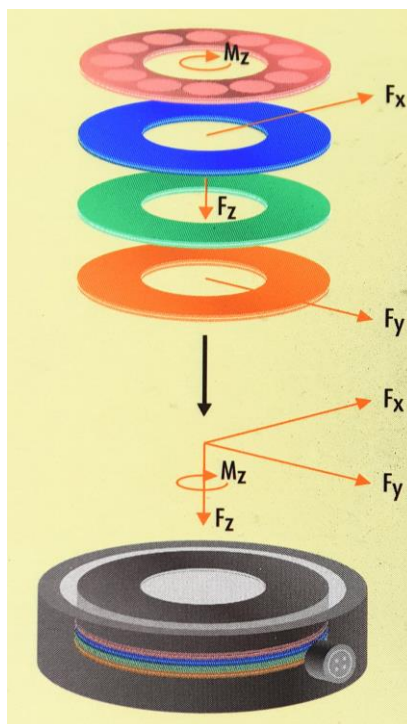


FIGURA 2.13 – Esquema de construção de um dinamômetro piezoelétrico.

FONTE – Adaptado de KISTLER, [s.d.]

2.2.3 Influência da texturização da ferramenta de corte sobre a força de usinagem

Certas pesquisas visam o estudo do efeito de superfícies de engenharia no comportamento da força de usinagem. Os resultados são diversos e alguns serão expostos nesta subseção.

Chang et al. (2011) produziram três tipos de microestruturas (ranhuras), com 4,5 μm (largura), 300 μm (comprimento) e 7,5 μm (profundidade) na superfície de saída de fresas de metal duro com 1 mm de diâmetro. Os três tipos se diferenciam pela orientação das ranhuras em relação à aresta de corte principal: paralela (0°), perpendicular (90°) e a 45° . A FIG. 2.14 mostra esses três tipos de microestruturas. A força de corte foi medida, utilizando um dinamômetro piezoelétrico, no fresamento de topo de um bloco de aço NAK80 (3,2% Ni, 1,8% Mn, 1% Cu e Al, 0,35% Si, 0,2% Mo e 0,12% C). Os parâmetros utilizados foram: velocidade de corte de 31 m/min, velocidade de avanço de 40 mm/min e profundidade de usinagem de 0,15 mm. Os testes foram realizados com fluido de corte (emulsão a 3% em água) e a seco. As forças no corte a seco foram levemente maiores quando comparadas com o uso do fluido de corte. As microestruturas com orientação perpendicular e horizontal à aresta de corte apresentaram forças de corte menores tanto para o corte a seco, quanto para o uso de fluido de corte, quando comparadas com a textura a 45° e a ferramenta sem textura, sendo que a textura perpendicular à aresta de corte obteve os menores valores de força de corte e a textura de 45° os maiores valores.

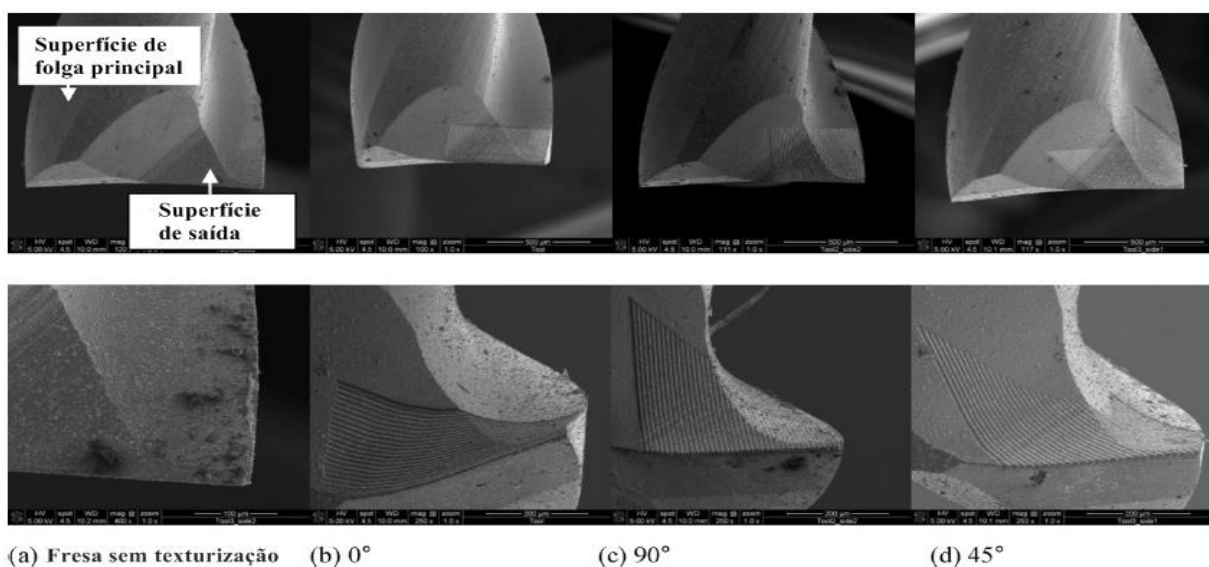


FIGURA 2.14 – Imagens obtidas por Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) da fresa tradicional e das microestruturas produzidas.

FONTE – CHANG et al., 2011, p. 2434

Suarez et al. (2011) estudaram o comportamento da força de corte durante o torneamento do aço ABNT 1050. Foram usadas ferramentas de metal duro (classe P25/K20) com revestimento de três camadas (TiCN-Al₂O₃-TiN) e que foram texturizadas a *laser* sobre o revestimento na superfície de saída em uma área de 12x12 mm². O *laser* para texturização foi do tipo NdYAG, com energia de pulso de 10⁸ W/cm², comprimento do pulso entre 20 e 40 ns, frequência de 13 KHz e diâmetro focal de 50 µm, produzindo seis tipos de texturas formadas por uma rede de microcrateras ou nanocrateras pré-definidas. Para aquisição da força de corte foi utilizado um dinamômetro piezoelétrico. Nos testes experimentais, a velocidade de corte variou de 10 a 400 m/min, o avanço foi fixado em 0,2 mm/volta e a profundidade de usinagem em 2 mm. O corte foi feito a seco e com MQF. O fluido de corte usado no MQF foi um fluido sintético de base vegetal com vazão de 50 ml/h aplicado com pressão de 6 bar na região entre o cavaco e a superfície de saída de ferramenta. Os valores de força média obtidos no corte a seco mostram que a ferramenta sem texturização apresentou menores valores quando comparada às ferramentas texturizadas. Já para o corte com MQF, a texturização com menor tamanho (tipo 4) apresentou uma tendência de forças de corte menores quando comparada com as outras ferramentas, incluindo a sem texturização. Estes resultados indicam que a presença de micro crateras ajuda a armazenar fluido de corte, mas sem perder as qualidades do revestimento, pois a modificação na superfície de saída dessa ferramenta foi realizada com menor potência e passe do feixe de *laser*. Além disso, foi observado que texturas muito profundas (feixe de *laser* com potência acima de 5 W e com vários passes) não foram benéficas para a ferramenta, porque retiraram o revestimento, deixando exposto o substrato da ferramenta de corte.

Xie et al. (2013) utilizaram insertos de metal duro não revestidos texturizados por microretificação. Foi utilizado um disco de diamante tipo V para geração de canais na superfície de saída das ferramentas para torneamento e, conseqüentemente, os canais produzidos na textura possuíam formato praticamente triangular. Os microcanais foram orientados a 45° da aresta de corte principal, pois este é um ângulo próximo à direção de saída do cavaco durante o corte. A profundidade dos canais (h) foi variada entre 7 a 149 µm com relação de aspecto (razão da profundidade sobre a largura do canal) variando entre 0,14 e 0,50. Os testes de força de corte foram realizados durante o torneamento a seco de uma liga de titânio (Ti-6Al-4V), utilizando ferramentas sem textura e texturizadas com profundidade de 25 e 123 µm e relação de aspecto de 0,25 e 0,41, respectivamente. Também foi comparado o comportamento das três ferramentas sob baixa e alta taxa de remoção de material (η). A baixa taxa de remoção foi de 360 mm³/min ($v_c = 36$ m/min, $a_p = 0,1$ mm e $f = 0,1$ mm/revolução) e a

alta de $11700 \text{ mm}^3/\text{min}$ ($v_c = 39 \text{ m/min}$, $a_p = 1,0 \text{ mm}$ e $f = 0,3 \text{ mm/revolução}$). A FIG. 2.15 mostra que, para baixa taxa de remoção, a textura com profundidade de $123 \mu\text{m}$ aumentou a força de corte e a textura com profundidade de $25 \mu\text{m}$ reduziu a força de corte em $32,7 \%$ quando comparadas com a ferramenta sem textura. Entretanto, para alta taxa de remoção, a textura de $123 \mu\text{m}$ reduziu a força em $3,3 \%$ e a textura de $25 \mu\text{m}$ reduziu a força em $56,1 \%$ quando comparadas com a ferramenta tradicional. Esta diferença no comportamento das texturas se deve ao fato de que, no corte com baixa remoção ($a_p = 100 \mu\text{m}$), a largura do cavaco é maior do que a largura da textura de $25 \mu\text{m}$ de profundidade (largura de $100 \mu\text{m}$), mas é menor que a largura da textura de $123 \mu\text{m}$ de profundidade (largura de $300 \mu\text{m}$). Ou seja, na menor profundidade o cavaco não entra na textura, enquanto, na maior profundidade, o cavaco entra totalmente na textura, aumentando a área de contato e o atrito entre cavaco/ferramenta, conseqüentemente, elevando a força de corte em comparação com a ferramenta sem textura. Para a alta remoção ($a_p = 1000 \mu\text{m}$), o cavaco possui largura maior que a largura das duas texturas, portanto ocorre redução da força de corte para as duas modificações, pois é reduzido o contato cavaco/ferramenta e é criado espaço com ar no fundo das texturas, que contribui para a redução da temperatura e da força de corte.

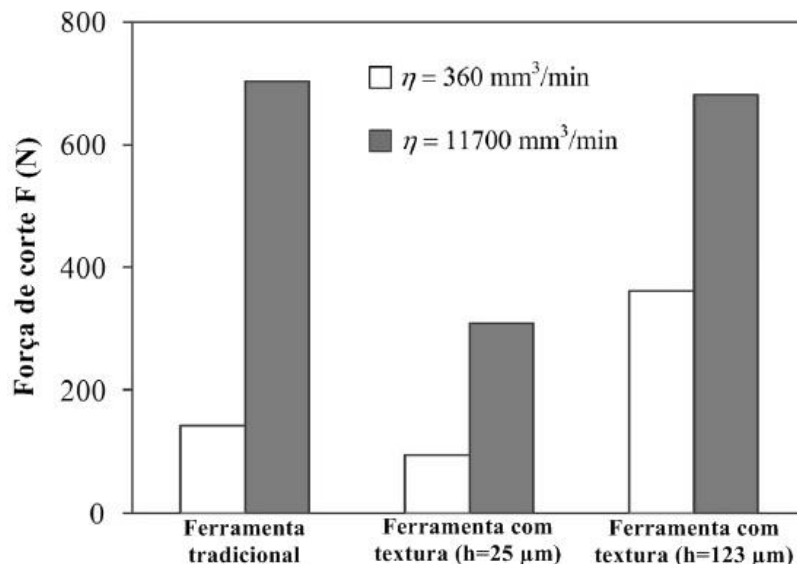


FIGURA 2.15 – Força de corte versus taxa de remoção de material (η) para ferramenta tradicional e ferramenta com micros canais.

FONTE - XIE et al., 2013, p. 33

Por meio dos trabalhos citados anteriormente, é possível afirmar que o comportamento da força de usinagem sofre influência significativa das texturas nas superfícies das ferramentas de corte, mas esta influência pode ser negativa ou positiva,

dependendo de vários fatores, como: formato, orientação e profundidade das texturas e dos parâmetros de corte (velocidade de corte, profundidade de usinagem e avanço). Boa parte das pesquisas está concentrada nas ligas de alumínio e titânio, devido à grande aplicação na indústria aeroespacial e à dificuldade em se usinar estes materiais.

2.3 Desgaste e vida da ferramenta de corte

Em todos os processos de usinagem ocorre algum tipo de desgaste na ferramenta de corte, exigindo a sua substituição em algum momento do processo. Portanto, o estudo sobre o processo de desgaste de uma ferramenta é fundamental, porque permite a adoção de ações que reduzam seu desgaste e, conseqüentemente, o tempo de parada das máquinas ferramentas para substituição de arestas de corte, melhorando a produtividade do processo.

Uma ferramenta de corte pode perder sua eficiência na usinagem devido a três fenômenos: avaria, desgaste e deformação plástica. Estes fenômenos causam mudanças na geometria de aresta de corte, sendo que os dois primeiros, geralmente, promovem a retirada de material da ferramenta e o último promove somente o deslocamento de material da ferramenta. A ocorrência de uma avaria (trinca, lascamento ou quebra) é rara em operações de corte contínuo, como torneamento, pois nesse tipo de processo a ocorrência de choques mecânicos e térmicos é baixa (MACHADO et al., 2011).

A Norma ISO 3685 (1993) define o desgaste em ferramentas de corte como a mudança de sua forma original durante o corte, resultante da perda gradual de material. No processo de desgaste, ao contrário da avaria, a perda de material da ferramenta acontece de forma contínua e progressiva e em pequenas proporções, tanto na superfície de folga, quanto na superfície de saída de ferramenta. Antes que o desgaste alcance grandes proporções e comprometa o processo de usinagem, a ferramenta de corte deverá ser reafiada, quando possível, ou substituída (MACHADO et al., 2011).

Em geral, utiliza-se a Norma ISO 3685 (1993) para quantificar os desgastes presentes nas ferramentas de corte. A FIG. 2.16 mostra os parâmetros utilizados nesta norma, sendo que os principais indicadores são:

- Profundidade da cratera (KT): utilizado para quantificar o desgaste de cratera que ocorre na superfície de saída da ferramenta de corte.
- Desgaste de flanco médio (VB_B): utilizado para quantificar o desgaste de flanco médio presente em toda a superfície de folga principal da ferramenta de corte.

- Desgaste de flanco máximo ($VB_{Bm\acute{a}x}$): quantifica o maior valor de desgaste de flanco presente na superfície de folga principal da ferramenta de corte.
- Desgaste de entalhe (VB_N): quantifica o desgaste dos entalhes que podem estar presentes tanto na aresta de corte principal como na aresta secundária de corte da ferramenta.

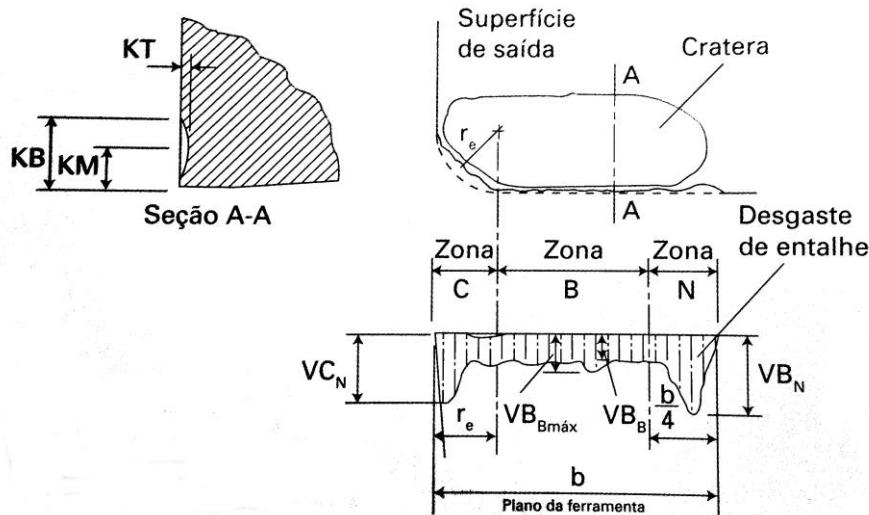


FIGURA 2.16 – Parâmetros utilizados para medir os desgastes das ferramentas de corte.

FONTE - MACHADO et al., 2011, p. 268

A vida da ferramenta de corte (T) é o tempo, geralmente em minutos, que uma aresta de corte trabalha efetivamente antes de ser reafiada ou substituída. Para manter o processo produtivo dentro de condições econômicas viáveis, deve-se adotar um critério para determinar o fim de vida da ferramenta. Em usinagem, geralmente as arestas de corte se desgastam seguindo a curva padrão mostrada na FIG. 2.17. No eixo da ordenada é representado qualquer um dos fatores relacionados às formas de desgaste: flanco (VB_B e $VB_{Bm\acute{a}x}$), cratera (KT) ou entalhe (VB_N). Além disso, esta curva representa a evolução do desgaste da ferramenta de corte e pode ser distinguida em três estágios (MACHADO et al., 2011):

- Estágio I: representa os primeiros instantes de corte e a tangente à curva apresenta ângulos de inclinação decrescentes. Inicialmente a ferramenta sofre um desgaste acelerado, natural de adequação ao sistema tribológico envolvido e, posteriormente, apresenta uma taxa de desgaste cada vez menor, gerando uma inflexão na curva padrão no final deste estágio.
- Estágio II: este período possui taxa de desgaste constante ao longo do tempo, ou seja, a tangente à curva possui ângulo de inclinação constante, indicando que a ferramenta

de corte está totalmente adequada ao processo de usinagem. Este estágio também termina com um ponto de inflexão na curva padrão.

- Estágio III: começa com a aceleração do desgaste da ferramenta, indicado pelo aumento crescente da inclinação da tangente à curva padrão. Caso o corte continue dentro deste estágio, ocorrerá, em curto espaço de tempo, a fratura da ferramenta, pois o desgaste atingirá níveis tão altos que aumentarão a temperatura e as tensões sobre a ferramenta de corte, ocasionando, eventualmente, o seu colapso.

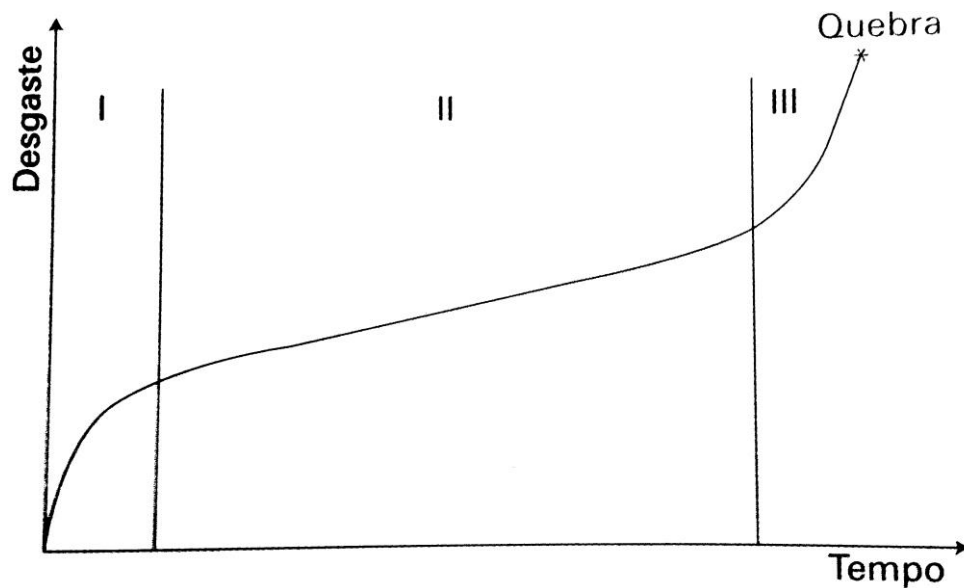


FIGURA 2.17 – Comportamento do desgaste de uma ferramenta de corte com o tempo de corte.

FONTE - MACHADO et al., 2011, p. 268

A quebra de uma ferramenta em serviço pode ter um custo muito elevado, pois pode danificar a máquina ferramenta, elevar o tempo improdutivo, danificar o suporte da ferramenta e gerar o refugo da peça produzida. Por isso, deve-se acompanhar atentamente a evolução da curva padrão de desgaste e evitar que a ferramenta atinja o estágio III, pois neste estágio o tempo para ocorrer quebra da ferramenta é muito curto. O recomendado é adotar um sistema de monitoramento para determinar com segurança o momento de troca da aresta de corte. Este controle pode ser feito através de componentes de força de usinagem, potência do motor de acionamento do eixo-árvore, temperatura de corte, emissão acústica ou vibração do sistema, dentre outros. Por serem menos intrusivas e mais práticas, a vibração e a potência do motor são mais utilizadas em muitos casos de monitoramento (MACHADO et al., 2011). Para os casos em que não é possível fazer o monitoramento instantâneo de algum destes parâmetros, a norma ISO 3685 (1993) recomenda utilizar parâmetros relacionados à

rugosidade para operações de acabamento. Já para operações de desbaste, considerando ferramentas de aço rápido, cerâmica e metal duro, a norma recomenda os seguintes critérios de fim de vida: $VB_B = 0,3$ mm, $VB_{Bmáx} = 0,6$ mm, $KT = 0,06 + 0,3f_c$ onde f_c é o avanço de corte em mm/volta e $VB_N = 1,0$ mm. Ferraresi (1970) afirma que para ferramentas de metal duro o desgaste de flanco máximo pode atingir 0,8 mm ou mais em operações de desbaste, mas em operações de acabamento não deve superar os valores de 0,1 mm a 0,2 mm. Segundo Machado et al. (2011), uma maneira prática muito utilizada na indústria para determinar a troca da aresta de corte é usar a aresta até que as peças produzidas ultrapassem a faixa de tolerância e/ou acabamento pré-estabelecidas, mas que ainda estejam dentro das especificações de projeto.

Prasanna, Kiran e Deelepkumar (2014) avaliaram a influência do raio de ponta sobre a vida da ferramenta e a rugosidade final da peça durante o torneamento de um ferro fundido cinzento (3,0 – 3,5% C, 1,9 – 2,2% Si, 0,45 – 0,65% Mn, 0,3 – 0,5% Cr, 0,1% Ph, 0,05% Su e 0,3 – 0,6 Cu). Os insertos de metal duro utilizados nos testes foram revestidos por deposição química de vapor (CVD) com nitreto de titânio (TiN), carbonitreto de titânio (TiCN) e óxido de alumínio (Al_2O_3). Foram testados raios de ponta com valores de 0,8 e 1,2 mm. Três velocidades de corte (100, 125 e 150 m/min) e três avanços (0,20, 0,23 e 0,27 mm/volta) foram utilizados, sendo a profundidade de usinagem mantida constante em 2,5 mm. Os resultados mostraram que a vida da ferramenta diminuiu com o aumento do avanço e da velocidade de corte. Além disso, o raio de ponta de 1,2 mm apresentou maior vida da ferramenta quando comparado ao raio de ponta de 0,8 mm, pois o raio de ponta maior aumentou a resistência ao impacto da aresta de corte durante o torneamento de um material frágil como o ferro fundido cinzento. Por fim, o aumento da velocidade de corte, a diminuição no avanço e o aumento do raio de ponta produzem valores menores de rugosidade.

2.3.1 Influência da texturização na vida da ferramenta

Cada vez mais, alterações nas superfícies das ferramentas de corte são propostas com o intuito de retardar o processo de desgaste, ou seja, aumentar a vida útil das arestas de corte nas operações de usinagem.

De acordo com Bruzzone et al. (2008), três efeitos principais parecem ajudar na redução do desgaste das superfícies texturizadas. O primeiro é o aprisionamento de resíduos de desgaste no interior das cavidades que formam a textura, evitando o desgaste abrasivo entre duas superfícies. O segundo é que a presença de cavidades pode reter fluido, sendo útil

como uma fonte secundária de lubrificante, especialmente em condições que envolvem elevada deformação plástica. A terceira é a melhoria da pressão hidrodinâmica entre as superfícies, formando uma película de fluido mais efetiva.

Sanchez, Losnak e Perez (2001) testaram pastilhas de metal duro sem revestimento no torneamento a seco de ferro fundido cinzento. Estas pastilhas tiveram a superfície de saída e de folga submetidas ao processo de lapidação, utilizando um disco de ferro fundido nodular, carga de $1,7 \text{ N/cm}^2$ e abrasivo de carboneto de silício (SiC) com duas granulometrias diferentes (*600 mesh* e *1000 mesh*). Este processo de modificação das superfícies foi usado para remover as marcas de retificação deixadas durante a produção original das pastilhas, promovendo uma redução na rugosidade R_a das ferramentas de $0,25 \mu\text{m}$ para $0,11 \mu\text{m}$. Os parâmetros de corte utilizados foram: velocidade de corte (V_c) de 98 m/min , profundidade de usinagem (a_p) de $0,5 \text{ mm}$ e avanço (f) de $0,15 \text{ mm/volta}$. Foram comparados três indicadores para uma vida de 30 minutos entre as pastilhas originais e lapidadas: desgaste de flanco máximo ($VB_{Bmáx}$), fator de extensão do desgaste (F_{ED} – relação entre o desgaste ao longo da aresta e o desgaste de flanco máximo) e rugosidade do corpo de prova. A FIG. 2.18 mostra a média dos valores de desgaste de flanco máximo após a realização de três ensaios para cada ferramenta testada. Os outros indicadores também mostraram que as pastilhas lapidadas apresentaram maior resistência ao desgaste e, conseqüentemente, produziram menores rugosidades no corpo de prova. Os resultados encontrados se devem, provavelmente, ao fato de a lapidação remover a camada de material com defeitos introduzidos anteriormente e também pelas menores tensões residuais deixadas pela lapidação.

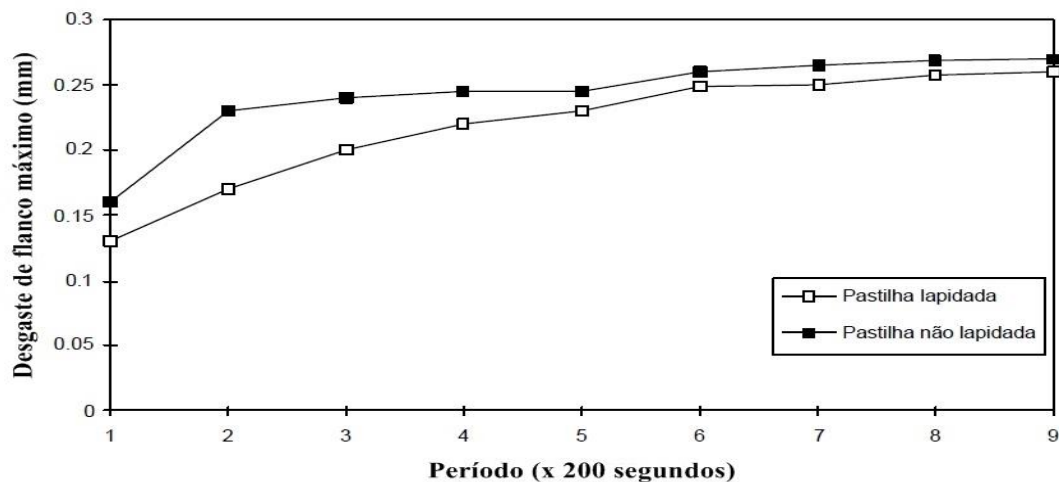


FIGURA 2.18 – Desgaste de flanco máximo ($VB_{Bmáx}$) em pastilhas de metal duro lapidadas e não lapidadas ao final de cada período.

FONTE – SANCHEZ, LOSNAK e PEREZ, 2001, p. 5

Chang et al. (2011) mediram o desgaste de flanco e do raio de ponta das fresas de topo utilizadas nos testes de força de corte a seco citados na subseção 2.2.3 e concluíram que as microtexturas presentes na superfície de saída com orientação perpendicular em relação à aresta de corte promoveram menor desgaste, considerando os dois parâmetros analisados. Portanto, a orientação perpendicular apresentou um aumento da vida da ferramenta de corte quando comparada com a ferramenta sem texturização e com as ferramentas com textura orientadas a 0° e a 45° de aresta de corte principal.

Enomoto et al. (2012) testaram o efeito de micro e nanocanais gerados na superfície de saída de ferramentas de metal duro usadas no fresamento frontal de um aço carbono S53C utilizando fluido de corte por jorro de uma emulsão de corte com vazão de 12,6 l/min. Os parâmetros de corte foram: velocidade de corte de 200 m/min, profundidade de usinagem de 2 mm e avanço de 0,2 mm/volta. Para produzir a textura nos insertos previamente polidos, foi utilizado o processo de texturização a *laser*, que gerou uma estrutura em formato de ondas senoidais com profundidade entre 100 e 150 nm e com espaçamento entre os vales de 700 nm. Esta textura foi produzida na direção ortogonal à saída do cavaco, ou seja, paralela à aresta de corte do inserto. Após o fresamento de 300 m, tanto a ferramenta polida, quanto a ferramenta texturizada apresentaram alto desgaste na superfície de saída, com presença de crateras de 8 µm de profundidade e 200 µm de largura. Por isso, foi desenvolvida outra textura, com canais retangulares periódicos, também produzidos por feixe *laser*. Ao todo, foram testados canais com duas profundidades diferentes (1 µm e 5 µm) e duas orientações diferentes (paralelo e perpendicular em relação à aresta de corte). A largura e o espaçamento dos canais são de 50 µm para todas as ferramentas. Após o fresamento de 300 m, as ferramentas com 1 µm de profundidade se desgastaram de forma semelhante às ferramentas polidas sem texturização, independentemente da orientação, indicando que os canais formados foram muito rasos para reter o fluido de corte e os resíduos do desgaste. Para ferramentas com profundidade de 5 µm, só a textura com orientação paralela à aresta de corte apresentou uma redução no desgaste de cratera (KT) de 8 µm para 5 µm. Além disso, ao diminuir a largura e espaçamento dos canais para 20 µm, o desgaste de cratera foi o mesmo quando comparado ao de 50 µm, mas o diâmetro de curvatura do cavaco diminuiu, indicando que o fornecimento de fluido de corte retido foi mais eficiente em canais com espaçamento e larguras menores. Por fim, para melhorar a resistência ao desgaste, esta última ferramenta foi revestida com uma camada de TiAlN, com espessura de 2,4 µm, pelo processo de PVD. O revestimento combinado com a texturização apresentou menor desgaste e menor adesão do cavaco na superfície de saída quando comparado com a ferramenta polida, revestida e sem

texturização para percursos de corte de 300 m e 600 m. Isto indica que a combinação da textura com dimensões adequadas e com revestimento adequado possibilita obter ótimas condições de lubrificação e refrigeração.

O aparecimento de aresta postiça de corte (APC) pode proteger a ferramenta de corte quanto ao desgaste, mas, geralmente, provoca instabilidade no processo de usinagem e deteriora a superfície da peça produzida. Com a intenção de analisar a influência de texturas no surgimento de APC, Kümmel et al. (2015) avaliaram o desgaste de ferramentas de metal duro (classe K10) não revestidas e texturizadas a *laser* (potência de 17,6 a 19,5 W e frequência de 20 kHz) no torneamento a seco do aço carbono SAE 1045 normalizado. Os parâmetros de corte foram selecionados para propiciar a formação de APC durante o corte: velocidade de corte de 100 m/min, avanço de 0,05 mm/volta e profundidade de usinagem de 1,0 mm. Três tipos de texturas foram gerados na superfície de saída da ferramenta: malha com furos (cavidades), canais perpendiculares e canais paralelos à aresta de corte. Após a texturização, a superfície foi retificada e polida para retirar os detritos presentes na superfície devido à ação térmica do processo a *laser*. Foram medidos o desgaste de flanco médio e o desgaste do raio de ponta da ferramenta e também a altura da APC. A FIG. 2.19 compara o desgaste de flanco médio e a altura da APC das ferramentas produzidas, utilizando os valores da ferramenta sem textura como referência. As ferramentas com canais paralelos e perpendiculares aumentaram consideravelmente o desgaste de flanco quando comparado à ferramenta sem textura, mas a textura com cavidades diminuiu levemente o desgaste de flanco em 19 μm após o corte de 4030 m. Para a altura da APC, é possível notar que a textura com cavidades gerou uma aresta postiça maior e mais estável do que as outras texturas, pois apresentou uma oscilação menor nos valores ao longo do torneamento. Quanto ao desgaste do raio de ponta, foi observado um comportamento semelhante ao desgaste de flanco, ou seja, apenas a textura com cavidades diminuiu consideravelmente o desgaste do raio de ponta.

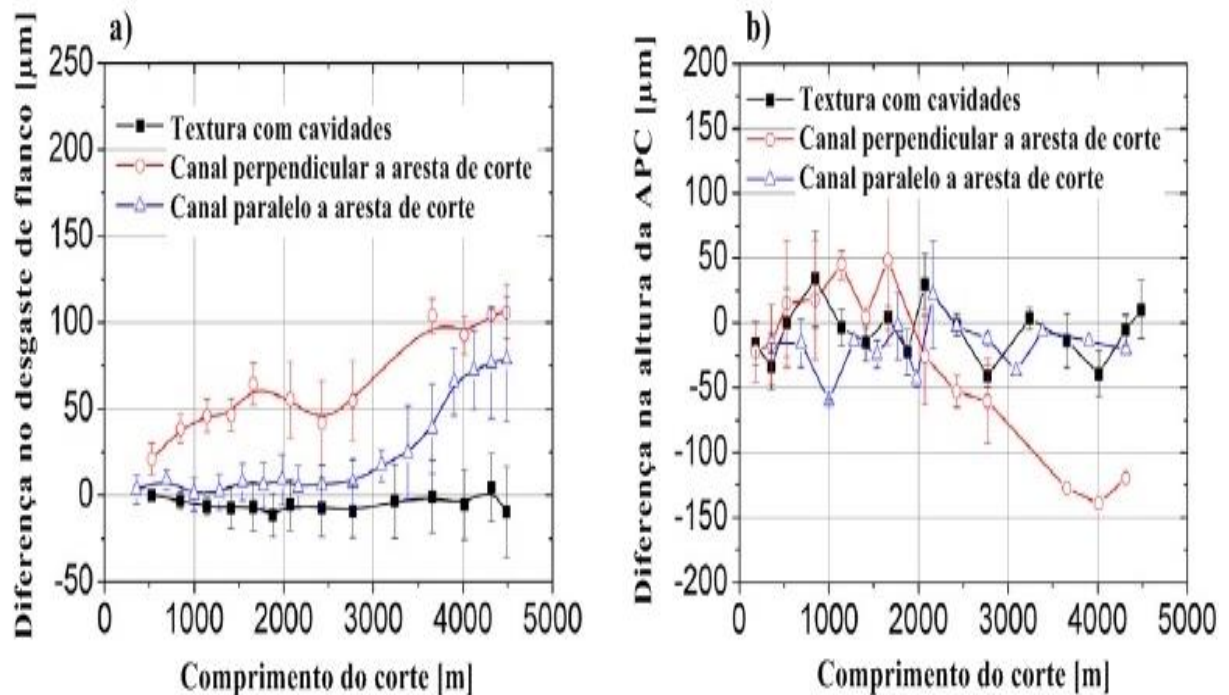


FIGURA 2.19 – Diferença entre a ferramenta sem textura e as texturizadas: (a) no desgaste de flanco médio e (b) na altura da APC.

FONTE – KÜMMEL et al., 2015, p. 65

2.4 Sistema de mínima quantidade de fluido de corte (MQF)

Na indústria, muitas operações de corte são realizadas a seco, contudo, em muitos outros casos, é necessário o uso de um fluido de corte direcionado sobre a ferramenta de corte para realizar arrefecimento e/ou lubrificação do processo. Este fluido de corte é usado com os seguintes objetivos (TRENT; WRIGHT, 2000):

- Evitar superaquecimento e distorções da ferramenta, da peça e da máquina;
- Aumentar a vida da ferramenta de corte;
- Melhorar o acabamento final da superfície;
- Ajudar a remover o cavaco da área de corte.

É importante ressaltar que a lubrificação é utilizada para reduzir o atrito e o contato entre ferramenta/peça e ferramenta/cavaco, reduzindo assim a força de usinagem. Já a refrigeração (arrefecimento) é usada para redução de temperatura na região de contato (região de corte) ferramenta/peça/cavaco.

Ao usar um fluido de corte, busca-se a redução do custo total do processo de fabricação ou o aumento da taxa de produção, como por exemplo, pelo aumento da

velocidade de corte. Weinert et al. (2004) ressaltam que, dependendo da peça produzida, da estrutura de produção e do local de produção, os custos com o uso de fluidos de corte convencionais em uma indústria podem atingir 17% do custo total de produção da peça. Eles afirmam que este componente do custo pode ser reduzido de forma significativa com o uso de tecnologias da usinagem a seco ou com mínima quantidade de fluido de corte.

Basicamente, existem três métodos de aplicação do fluido de corte: jorro a baixa pressão, sistema a alta pressão (até 163 bar) e atomização (de 1 a 5 bar). Devido à simplicidade, o primeiro tipo ainda é o mais utilizado nas indústrias, mas nos últimos tempos vem sendo observado um esforço para redução do consumo de fluidos de corte pela aplicação da atomização. A atomização do fluido de corte é chamada de névoa ou mínima quantidade de fluido de corte (MQF), sendo o fluido de corte aplicado em vazões de 10 ml/h a 200 ml/h (MACHADO et al., 2011).

A principal vantagem do sistema MQF é a grande economia do fluido de corte, que em muitos casos é prejudicial à saúde do operador e ao meio ambiente quando comparado com sistemas convencionais (jorro e alta pressão) de aplicação de fluido de corte na usinagem. Além disso, o MQF é um mecanismo simples e barato. A principal desvantagem do sistema MQF é a atomização de fluido de corte no ar, dificultando sua coleta e descarte após sua utilização (em geral não se consegue reaproveitar o fluido de corte como nos processos convencionais).

O princípio básico de funcionamento do MQF consiste no arrastamento de uma pequena quantidade de fluido de corte por uma corrente de ar comprimido, provocando a atomização do fluido de corte, que é direcionado sobre a zona de corte com uma distribuição uniforme (CORREIA; DAVIM, 2006). Dependendo do tipo e da principal função do fluido de corte, o MQF pode ser distinto entre mínima quantidade de lubrificante (MQL) e mínima quantidade de refrigerante (MQR) (WEINERT et al., 2004).

Ao revisar e analisar pesquisas sobre o MQF na década de 2000, Boubekri, Shaikh e Foster (2010) afirmam que o sistema de mínima quantidade de fluido de corte tem funcionado bem para ensaios curtos em uma variedade de operações de usinagem, mas que ainda são necessárias experiências com produção em larga escala. Além disso, as aplicações do MQF até o momento indicam uma redução nos custos de produção devido à diminuição no consumo de fluido de corte, mas que essa economia seria mais relevante à medida em que o sistema MQF fosse aplicado na produção em massa.

Outro fator importante é o tipo de fluido de corte que deve ser empregado no sistema MQF para uma boa usinabilidade. Tai, Dasch e Shih (2011) compararam nove fluidos

de corte comerciais diferentes aplicados por meio do sistema MQF nas operações de furação e fresamento. As propriedades comparadas foram: condutividade térmica, molhabilidade, lubrificação e extrema pressão, características da névoa e usinabilidade. Os fluidos de corte para o sistema de jorro geralmente têm como base a água, possuindo como característica principal o arrefecimento. No entanto, os fluidos de corte para MQF usualmente são à base de óleo, com uma baixa capacidade de remoção de calor da área de corte, mas com melhor molhabilidade e lubrificação quando comparado com o sistema de jorro. Os testes realizados mostraram que uma boa usinabilidade está ligada às seguintes características do fluido de corte do MQF: baixa viscosidade, alta concentração de névoa (mg/m^3), grande diâmetro das gotículas que formam a névoa e alta molhabilidade. A propriedade de extrema pressão não apresentou correlação nos testes feitos, mas isso se deve, provavelmente, às condições leves de usinagem utilizadas.

Correia e Davim (2006) compararam o sistema de aplicação por jorro com o sistema de mínima quantidade de fluido de corte no fresamento convencional e no fresamento de alta rotação (40.000 rpm) da liga de alumínio AA7050. Ao analisar a rugosidade (R_a) das peças produzidas, foi constatado que os valores obtidos foram semelhantes para os dois sistemas de aplicação, tanto para o fresamento tangencial quanto o de alta rotação. Isto indicou que o sistema MQF pode ser usado sem prejuízo da qualidade das superfícies usinadas, mas com economia no consumo do fluido de corte.

Itoigawa et al. (2006) investigaram a influência do MQF usando dois fluidos de corte diferentes no torneamento interrompido de uma liga de silício e alumínio (AlSi5). Um fluido de corte foi composto apenas por óleo e outro formado por óleo e água, chamado OoW (*oil film on water droplet*). Óleo Colza (vegetal) e éster sintético foram utilizados como lubrificantes e foram fornecidos à vazão de 30 ml/h, enquanto a água foi fornecida a 3000 ml/h para refrigeração no fluido OoW. Para comparação, também foi utilizado o corte a seco e com jorro (emulsão). Duas ferramentas foram utilizadas nos testes: uma ferramenta de diamante policristalino (PCD), com ângulo de saída igual a 0° , e outra de metal duro (classe K10), com ângulo de saída igual a 5° . Foram utilizados parâmetros de corte diferentes para reproduzir um torneamento pesado (velocidade de corte de 800 m/min e avanço de 0,2 mm/volta) e outro leve (velocidade de corte de 200 m/min e avanço de 0,05 mm/volta). Para a ferramenta de PCD no torneamento leve, o sistema MQF com OoW apresentou atrito baixo e estável. No jorro, esta ferramenta apresentou atrito mais alto, mas também estável. No MQF com apenas óleo, ocorreu o aumento da força de atrito e o corte a seco apresentou atrito instável. Estes resultados reforçam a importância da refrigeração no processo de corte leve.

Para o corte pesado com PCD, foram encontradas pequenas diferenças entre as condições, indicando que a produção de calor é tão alta que supera a diferença de refrigeração entre os sistemas de aplicação de fluido de corte. Em contraste às ferramentas de PCD, as ferramentas de metal duro não apresentaram diferenças significativas entre as condições de aplicação do fluido de corte, tanto para o corte leve, quanto para o corte pesado, mas a largura da área de contato na superfície de saída da ferramenta foi menor para o sistema de jorro e o sistema MQF com OoW.

Dhar, Kamruzzaman e Ahmed (2006) avaliaram o efeito do MQF sobre o desgaste da ferramenta e rugosidade R_a da peça durante o torneamento do aço AISI 4340, comparando-o com o corte a seco e aplicação por jorro. A ferramenta de corte utilizada foi de metal duro (classe ISO P30), não revestida. O sistema MQF foi regulado para uma vazão de 60 ml/h e 7 bar de pressão com o bico injetor direcionado ao longo da aresta de corte principal para atingir as superfícies de folga e de saída. Os parâmetros de corte foram: velocidade de corte de 110 m/min, avanço de 0,16 mm/volta e profundidade de usinagem de 1,5 mm. Foi medido o desgaste de flanco médio (VB_B) e como critério de fim de vida foi adotado o valor de 300 μm . A FIG. 2.20 mostra que o sistema de MQF foi o mais eficiente na redução da taxa de desgaste de flanco, pois diminuiu a temperatura na superfície de folga principal. A figura também indica que houve um aumento da vida da ferramenta de 30 minutos para aproximadamente 38 minutos com o uso do MQF, quando comparado com corte a seco e com jorro. A rugosidade da peça apresentou um comportamento semelhante ao desgaste de flanco da ferramenta, reforçando a eficiência da mínima quantidade de fluido de corte.

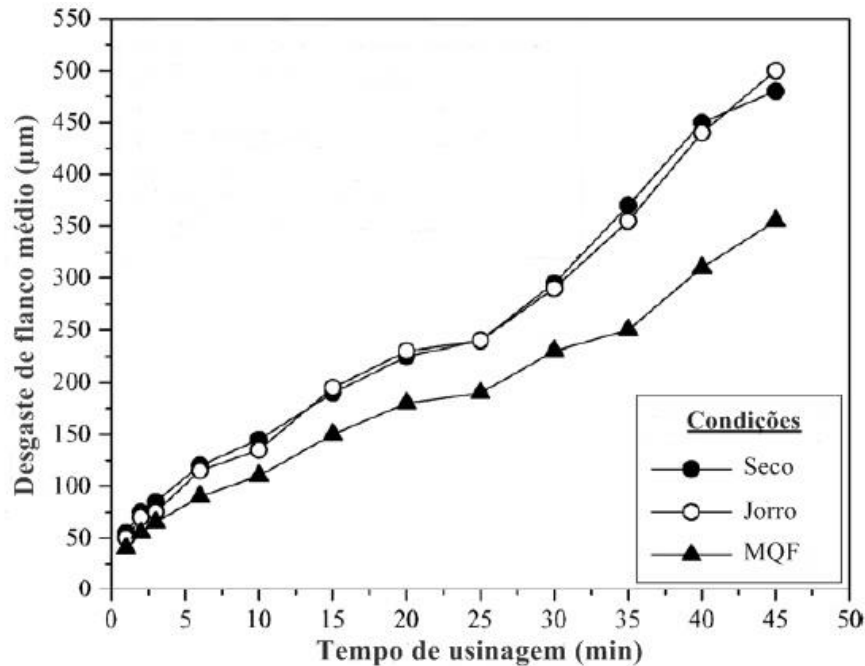


FIGURA 2.20 – Crescimento do VB_B com a usinagem a seco, com jorro e com MQF.

FONTE – DHAR; KAMRUZZAMAN; AHMED, 2006, p. 302

No torneamento pesado do aço AISI 4340 endurecido com inserto de PCBN (nitreto cúbico de boro policristalino), Lohar e Nanavaty (2013) avaliaram a eficiência do corte para condição a seco, com jorro e com MQF. O sistema MQF foi ajustado para uma pressão de 6 bar e vazão entre 10 a 20 ml/min. O avanço foi variado em 0,05, 0,075 e 0,10 mm/volta, a velocidade de corte em 40, 80 e 120 m/min e a profundidade de usinagem em 0,5 e 1,0 mm. Os seguintes parâmetros foram medidos: a força de usinagem em três eixos, a temperatura de corte e a rugosidade. O método Taguchi foi utilizado para reduzir os números de experimentos necessários para 18 testes, sendo que cada teste foi repetido três vezes de forma aleatória. A FIG. 2.21 mostra como os parâmetros de entrada afetavam as forças de usinagem, indicando que a condição de lubrificação é o principal fator, variando as forças de 390 a 250 N, e que o sistema de MQF produz menores forças. A análise de variância foi realizada para confirmar que a condição de lubrificação é o parâmetro mais significativo sobre as forças de usinagem. Por fim, foram encontrados resultados semelhantes quando avaliada a influência sobre a temperatura de corte e a rugosidade.

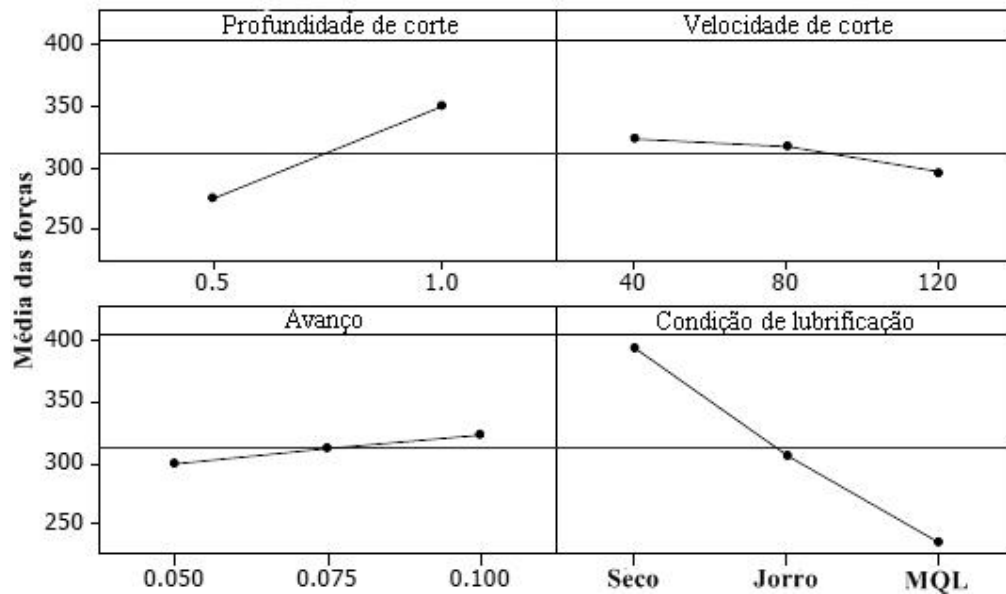


FIGURA 2.21 – Principais efeitos sobre as forças de corte.

FONTE – LOHAR; NANAVATY, 2013, p. 105

Também utilizando o método Taguchi e a análise de variância, Deepakkumar e Sadaiah (2011) compararam os métodos a seco, de jorro e MQF no torneamento de acabamento do aço AISI 4340 utilizando insertos de PCBN. Os parâmetros de entrada foram: três velocidades de corte (180, 200 e 220 m/min), três avanços (0,04, 0,05 e 0,06 mm/volta) e três condições de aplicação do fluido de corte (seco, jorro e MQF com vazão de 5 ml/min e pressão constante de 6 bar). Novamente, foi determinado que a condição de aplicação do fluido de corte é o fator mais significativo estatisticamente sobre a força de corte, sendo obtidos menores valores com a aplicação do MQF. Para a força de avanço e a força passiva, tanto a condição de aplicação, quanto a variação na velocidade de corte foram fatores estatisticamente significativos, sendo que o aumento da velocidade de corte provocou aumento das forças e o uso de MQF produziu as menores forças de avanço e passiva. Portanto, o sistema MQF é uma alternativa viável ao processo com jorro, pois apresenta forças menores quando comparado ao corte a seco e com jorro e consome quantidades menores de fluido de corte do que o sistema por jorro.

Khan e Dhar (2006) compararam no torneamento a influência da mínima quantidade de fluido de corte utilizando um óleo vegetal com o corte a seco do aço AISI 1060, usando insertos de metal duro não revestidos. Os parâmetros de corte utilizados foram: velocidade de corte de 72, 94, 139 e 164 m/min, avanço de 0,10, 0,13, 0,16 e 0,20 mm/volta, profundidade de usinagem de 1,5 mm e MQF com vazão de 60 ml/h e pressão de 7 bar direcionado sobre a zona de corte para atingir o mais próximo possível as interfaces

cavaco/ferramenta e ferramenta/peça. Foram medidos os desgastes de flanco principal e secundário e a rugosidade da peça produzida. Os resultados mostraram que o uso do MQF diminuiu a taxa de desgaste de flanco médio (VB_B) e do desgaste de flanco médio secundário (VS), que é o principal fator sobre o acabamento e a qualidade dimensional da peça. No corte a seco, além do desgaste de flanco, foram encontrados desgaste em formato de sulcos, deformação plástica e desgaste de entalhe severo na superfície de folga principal e secundária. Conseqüentemente, o comportamento da rugosidade R_a e do desvio dimensional foram semelhantes ao encontrado para os desgastes de flanco. Portanto, o uso de óleo vegetal, aplicado em quantidade mínima, mostrou-se muito mais benéfico à vida da ferramenta e melhorou a qualidade da peça produzida quando comparado ao corte a seco.

Mello et al. (2002) analisaram a influência da composição e propriedades de aços sobre a eficiência do sistema MQF. Dois aços diferentes foram testados: aço ABNT 1045 (condutividade térmica de 51,9 W/m.K e dureza de 179 HB) e aço inox martensítico AISI 420 (condutividade térmica de 24,9 W/m.K e dureza de 197 HB). O fluido de corte aplicado como MQF é uma emulsão de óleo semissintético com vazão de 90 ml/h e pressão de 3 bar direcionado sobre a superfície de saída de ferramenta. A ferramenta de corte utilizada é de metal duro (classe ISO P15). Os parâmetros de corte foram: comprimento de corte de 250 mm, velocidade de corte de 245 m/min, avanço de 0,433 mm/volta e profundidade de usinagem de 1,0 mm. Para comparação, também foi utilizado o sistema de jorro com vazão de 3,84 l/min direcionado também sobre a superfície de saída. Após quatro passes de cada ferramenta foram medidos o desgaste de flanco médio (VB_B) e a rugosidade R_a em três pontos distintos da peça. O desgaste foi mais rápido no aço inoxidável, pois este possui dureza maior, exigindo maior esforço de corte devido à presença do carboneto de cromo, e condutividade térmica menor, ocasionando uma menor dissipação de calor e aumentando a temperatura na interface cavaco/ferramenta (potencializando o desgaste abrasivo). O MQF obteve um desempenho inferior em relação ao jorro para ambos os materiais, mas para o aço inoxidável esta ineficiência foi mais destacada, pois ocorreu falha catastrófica prematura da ferramenta devido ao surgimento do desgaste de entalhe severo. Quanto à rugosidade da peça, ela não sofreu influência quanto ao tipo de aplicação de fluido de corte no torneamento do aço ABNT 1045, mas obteve melhora no corte do aço AISI 420 para o MQF e o jorro.

Dhar et al. (2006) investigaram a temperatura de corte no torneamento do aço AISI 1040 com insertos de metal duro (classe ISO P30) não revestidos e com quebra cavaco integral no corte a seco, com MQF (com vazão de 60 ml/h e pressão de 7 bar) e com jorro. Os parâmetros de corte foram: velocidade de corte de 64, 80, 110 e 130 m/min, avanço de 0,10,

0,13, 0,16 e 0,20 mm/volta e profundidade de usinagem fixa de 1,0 mm. Para a medição de temperatura de corte, foi utilizado um termopar do tipo K na ferramenta. A FIG. 2.22 mostra os valores de temperatura obtidos para todas as velocidades de corte, avanços e condições de aplicação de fluido de corte. É possível observar que o sistema de mínima quantidade de fluido de corte produziu temperaturas mais baixas na interface ferramenta/peça para todas as combinações possíveis de velocidade de corte e avanço testados, sendo um método mais efetivo que o sistema de jorro e o sistema a seco.

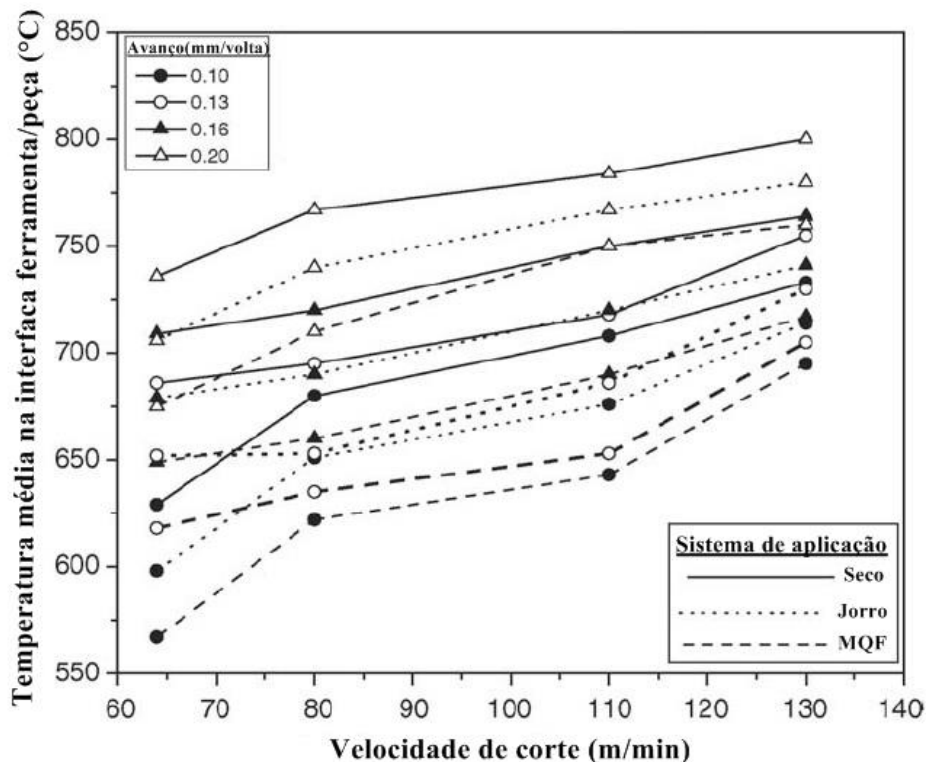


FIGURA 2.22 - Variação da temperatura de corte com a velocidade de corte e avanço para condições de corte a seco, com jorro e com MQF.

FONTE – DHAR et al., 2006, p.96

Um modelo analítico elaborado para calcular a temperatura da ferramenta de corte e a distribuição de calor sobre a ferramenta no torneamento do aço AISI 4140 utilizando o corte a seco, com jorro (emulsão com 10 % de concentração e vazão de 5 l/min) e com sistema MQF (óleo de éster) foi proposto por Hadad e Sadeghi (2013). O modelo foi testado com o uso de dois bicos injetores (diâmetros de 3 mm) com pressão de 3 bar e vazão de 30 ml/h para cada um, sendo um direcionado para a superfície de saída e outro para a superfície de folga principal. Nos testes experimentais para validar o modelo foram utilizadas ferramentas de aço rápido e a medição da temperatura de corte média foi feita por meio de um

termopar do tipo K com diâmetro de 0,5 mm. Os parâmetros de corte foram: velocidade de corte de 50,2, 100,4 e 141,4 m/min, avanço de 0,09 e 0,22 mm/volta e profundidade de usinagem de 0,5, 1,0 e 1,5 mm. Também foram medidas as forças de usinagem com um dinamômetro piezoelétrico. Quanto ao modelo analítico proposto, os valores de temperatura estimados nas ferramentas de corte novas e afiadas foram próximos aos valores reais, indicando que o modelo é capaz de estimar a participação de energia e as temperaturas no processo de torneamento. O sistema MQF com dois injetores produziu temperaturas 350 °C mais baixas que o corte a seco e 50 °C mais baixas que o corte com jorro, mas em condições de corte severas, a diferença de temperatura entre os sistemas diminuiu, pois a redução de temperatura na interface cavaco/ferramenta foi limitada pelo baixo coeficiente de transferência de calor. Isto indica que o MQF desempenhou um bom papel para lubrificação, mas não foi tão eficiente para refrigeração. Para a rugosidade da peça, a injeção na superfície de folga é mais efetiva, indicando que esta injeção mantém o efeito de lubrificação para melhorar o acabamento final da peça. O MQF é mais eficiente para valores menores de velocidades de corte e avanço, pois a névoa de óleo nestas condições penetra mais facilmente na área de corte. Portanto, com o aumento da velocidade de corte, a diferença da força de usinagem entre o sistema MQF e o corte a seco ou com jorro diminuiu. O aumento da profundidade de usinagem também diminuiu a influência da refrigeração e lubrificação do sistema MQF. Por fim, os componentes da força foram menores para o sistema MQF com dois injetores quando comparado com o corte a seco e com jorro. Além disso, a injeção apenas na superfície de saída produziu forças menores quando comparada com a injeção apenas na superfície de folga, indicando que a injeção na superfície de saída previne a aderência do cavaco na saída de ferramenta.

Outro modelo analítico foi proposto Li e Liang (2007) para estimar parâmetros de desempenho (temperatura de corte, força de usinagem e taxa de desgaste) no torneamento do aço AISI 1045 com MQF com vazão de 12,5 ml/h (pressão de 2,75 bar), jorro com vazão de 15 l/min e corte a seco. Nos testes experimentais para validar o modelo, foram utilizados insertos de metal duro. O teste de força mostrou que o corte com jorro produz forças mais baixas, seguido pelo sistema MQF. O aumento de velocidade de corte diminuiu tanto as componentes da força de usinagem para todas as condições de aplicação de fluido de corte, quanto o efeito lubrificante, pois a diferença entre as condições de aplicação diminuiu. Além disso, a temperatura na superfície de saída da ferramenta também foi menor para o sistema de jorro, seguido pelo MQF. Para o desgaste de flanco, o sistema MQF e o sistema por jorro tiveram quase os mesmos valores, sendo muito superiores ao corte a seco. Porém, para

velocidades de corte acima de 228,75 m/min, o sistema MQF aumenta consideravelmente a taxa de desgaste em comparação com o sistema por jorro. Portanto, o MQF teve desempenho superior ao corte a seco, mas inferior ao sistema por jorro. Por fim, os dados experimentais validaram os modelos preditivos desenvolvidos.

Uma análise experimental do efeito do MQF sobre o comprimento de contato entre cavaco/ferramenta foi realizado por Tasdelen, Thordenberg e Olofsson (2008) para o corte ortogonal interrompido do aço rolamento 100Cr6. Dois tipos de insertos foram usados: um sem revestimento e outro com revestimento de TiN. O sistema MQF (óleo com vazão de 24 ml/h e ar com vazão de 125 l/min) foi comparado com o corte a seco e com o corte com ar comprimido (vazão de 125 l/min). Os parâmetros de corte foram: velocidade de corte de 200 m/min, avanço de 0,1 mm/volta e largura de corte de 2,5 mm. Para a ferramenta sem revestimento, o MQF reduziu o comprimento de contato cavaco/ferramenta quando comparado ao corte a seco, mas quando comparado ao ar comprimido foi obtido o mesmo comprimento de contato, pois o MQF e o ar comprimido apresentam o mesmo efeito refrigerante. O uso de emulsão no MQF reduziu ainda mais o comprimento de contato quando comparado com o MQF com óleo e o ar comprimido. Para a ferramenta revestida, foi observado o mesmo comportamento de contato da ferramenta não revestida, indicando que não existe influência do revestimento. Portanto, o uso de emulsão no MQF mostrou-se benéfico, mas ainda é necessária a análise de outros parâmetros, como vida da ferramenta, forças e acabamento.

Uma análise do uso ou não de MQF também pode ser feita em relação aos aspectos econômicos de um processo. Soares (2009) realizou uma análise econômica do torneamento do aço rolamento ABNT 52100 sob quatro velocidades de corte (275, 325, 375 e 425 m/min) e com três condições de lubrificação/refrigeração diferentes: jorro de fluido de corte abundante (emulsão semissintética com vazão de 0,3 l/min), MQF (fluido vegetal com vazão de 92,1 ml/h) e a seco. O avanço utilizado foi de 0,25 mm/volta e a profundidade de usinagem de 1,5 mm. A avaliação das condições econômicas foi feita através da formulação matemática proposta por Taylor e o critério de fim de vida das ferramentas foi o desgaste de flanco médio (VB_B). Após as análises, concluiu-se que, para velocidades de corte entre os intervalos de máxima eficiência (IME), o custo total de usinagem (C_p) é quantitativamente igual para os três sistemas de lubrificação/refrigeração. Porém, considerando-se a velocidade de máxima produtividade (v_{mp}), verificou-se que, para o mesmo custo, o sistema de jorro é 3% mais rápido do que o corte a seco para produção de 4000 peças e 37% mais rápido que o sistema de MQF para o mesmo lote de peças. Portanto, o sistema de jorro agrega ao processo

maior produtividade, sendo o sistema economicamente mais interessante para este tipo de usinagem.

Analisando os trabalhos anteriores, é possível perceber que o sistema de aplicação de fluido de corte por mínima quantidade pode, ou não, ser superior ao sistema convencional por jorro ou ao corte a seco, pois o desempenho do MQF depende de vários fatores como: direção de aplicação do fluido de corte, tipo de fluido de corte utilizado e parâmetros de corte usados, principalmente a velocidade de corte.

2.4.1 Fluido de corte aplicado em ferramentas texturizadas

A presença de uma textura padronizada e uniforme (microrelevo) em uma superfície pode alterar consideravelmente a distribuição de pressão, a ação hidrodinâmica do fluido e a deformação das superfícies, levando a mudanças nas condições de lubrificação das superfícies. Estas mudanças podem ser positivas ou negativas em termos de desempenho tribológico, dependendo da característica da topografia presente na superfície. Superfícies texturizadas, compostas de uma pluralidade de cavidades distribuídas uniformemente, podem ser consideradas como um conjunto de microrolamentos (BRUZZONE et al., 2008).

Um exemplo do uso combinado de superfícies de engenharia com fluido de corte é apresentado por Sugihara e Enomoto (2009), que testaram insertos de metal duro (classe ISO K10) revestidos com DLC e texturizados a *laser* na superfície de saída no fresamento frontal de uma liga de alumínio (AA5052) a seco e com fluido de corte (emulsão por jorro com vazão de 12,6 l/min). A textura produzida possui nano e microcanais regulares com 100 a 150 nm de profundidade e espaçamento de 700 nm, tendo um formato de ondas senoidais. Duas ferramentas texturizadas com orientações diferentes (uma paralela e outra perpendicular à aresta principal de corte) e um ferramenta sem texturização e polida foram usadas nos testes. Todas as ferramentas foram revestidas após a texturização e o polimento com uma camada de DLC depositada pelo processo de CVD. Esta camada diminuiu a profundidade dos canais em 10-20 nm. Após um corte de 1800 m para cada ferramenta, foi medida a concentração de alumínio na superfície de saída para avaliar quantitativamente a adesão do alumínio na ferramenta. A FIG. 2.23 mostra os valores encontrados, indicando que no corte a seco as ferramentas texturizadas apresentaram maior adesão quando comparadas à ferramenta tradicional, mas no corte com fluido de corte o comportamento foi o inverso. Isto indica que as texturas apresentaram uma boa retenção do fluido de corte, reduzindo a adesão do alumínio na superfície de saída da ferramenta. Além disso, a orientação paralela à aresta de corte

principal apresentou metade dos valores de concentração encontrados na orientação perpendicular, indicando que esta orientação é mais eficiente na redução da adesão.

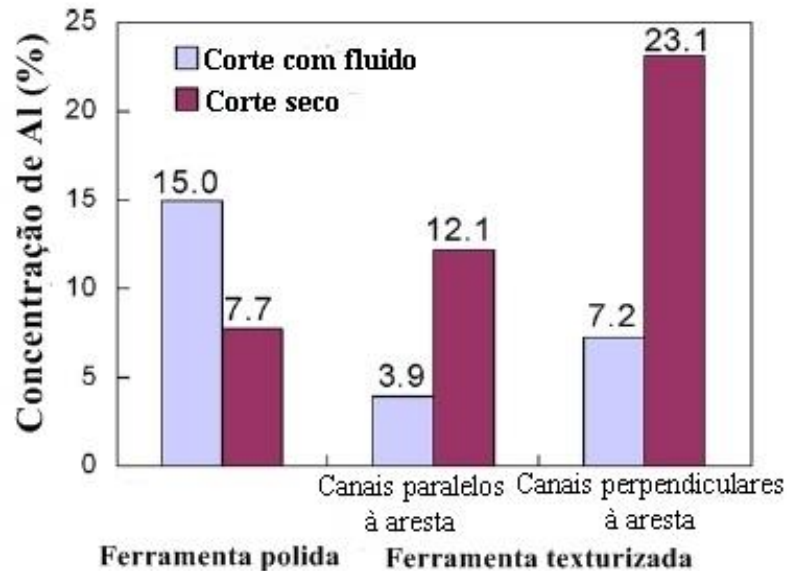


FIGURA 2.23 – Concentração de átomos de alumínio na superfície de saída.

FONTE – SUGIHARA; ENOMOTO, 2009, p. 428

Posteriormente, na tentativa de aplicar texturas eficientes no corte a seco e com fluido de corte, Sugihara e Enomoto (2012) realizaram novamente o fresamento frontal de uma liga de alumínio (AA5052) com ferramentas de metal duro sem revestimento, mas com texturas de tamanhos diferentes. Foram produzidas seis texturas, uma com orientação perpendicular e cinco com orientação paralela à aresta de corte, todas no formato de sulcos com microcanais com 5 µm de profundidade. A largura (área côncava) dos microcanais variou entre 20 e 100 µm, sendo a maioria de 20 µm. Por fim, também foi variado o espaçamento (área convexa) entre os canais de 20 a 100 µm. Novamente, após usinar 1800 m usando fluido de corte, a textura com orientação paralela à aresta de corte principal apresentou menor adesão de alumínio sobre a superfície de saída da ferramenta quando comparada à textura perpendicular e à ferramenta tradicional. Também ficou evidenciado que a adesão do alumínio tem relação direta com o espaçamento entre os canais, aumentando seu comprimento de adesão com o aumento do espaçamento dos canais. Por outro lado, a variação de largura dentro da faixa testada tem efeito insignificante sobre a variação do comprimento de adesão do alumínio na superfície de saída. No corte a seco, após 1800 m de corte, também foi constatado que a orientação paralela à aresta de corte apresenta menor aderência quando comparada com a orientação perpendicular e a ferramenta tradicional. O efeito do

espaçamento entre canais foi o mesmo que no corte com fluido de corte, mas a variação na largura dos canais testados provocou mudanças na adesão, sendo a largura de 50 μm a que apresentou menor adesão quando comparada às larguras de 20 e 100 μm . Isto indica que no corte a seco a ausência de fluido de corte entre cavaco e ferramenta exige que a largura tenha um tamanho adequado para os canais não serem entupidos facilmente pelo alumínio. Por outro lado, o espaçamento não pode ser tão grande a ponto de permitir adesão do alumínio dentro das ranhuras. Portanto, o uso de texturas paralelas à aresta de corte principal com larguras e espaçamentos adequados reduz a adesão do alumínio na superfície de saída de ferramenta tanto para o corte a seco quanto para o corte com fluido de corte.

Estendendo o estudo sobre texturas, Sugihara e Enomoto (2013) testaram ferramentas texturizadas e chanfradas de metal duro no fresamento frontal de um aço médio carbono (0,51 – 0,55%) utilizando o corte a seco e com jorro. Primeiramente, os insertos tiveram a superfície de saída polida e a texturização a *laser* foi realizada na superfície de saída para obter microssulcos com profundidade de 5 μm , largura de 20 μm e espaçamento entre os canais de 20 μm . Após a texturização, os insertos foram chanfrados a 100 μm da aresta de corte principal, como ilustrado na FIG. 2.24. Quanto à orientação das texturas, foram utilizados dois tipos: paralela (chamada MS-1) e perpendicular (chamada MS-2) à aresta de corte principal. O fluido de corte utilizado foi uma emulsão com vazão de 12,6 l/min. Os parâmetros de corte foram: velocidade de corte de 200 m/min, profundidade de usinagem de 2 mm, avanço de 0,20 mm/dente e comprimento de corte de 300 m. Após o fresamento com fluido de corte, foi medido o desgaste de cratera nas ferramentas modificadas e na tradicional polida e chanfrada. A ferramenta MS-1 obteve menor desgaste de cratera (KT) com valor de 3 μm , sendo que a ferramenta tradicional apresentou um KT de 9 μm . A ferramenta MS-2 teve um desgaste levemente menor que a ferramenta tradicional, pois na direção perpendicular parte de cavaco entrou no interior do canal e aumentou o desgaste quando comparado com a direção paralela. No corte a seco, comparando a ferramenta MS-1 com a tradicional foi observada uma leve redução do desgaste cratera, pois as texturas foram parcialmente cobertas pela aderência do cavaco. Calculando o coeficiente de atrito, foi percebido que, tanto no corte a seco, quanto no corte com jorro, a ferramenta tradicional apresenta valores próximos, mas na ferramenta MS-1 o uso de fluido de corte reduz consideravelmente o coeficiente de atrito em relação ao corte a seco, indicando a eficiência da textura com o uso de fluido de corte.

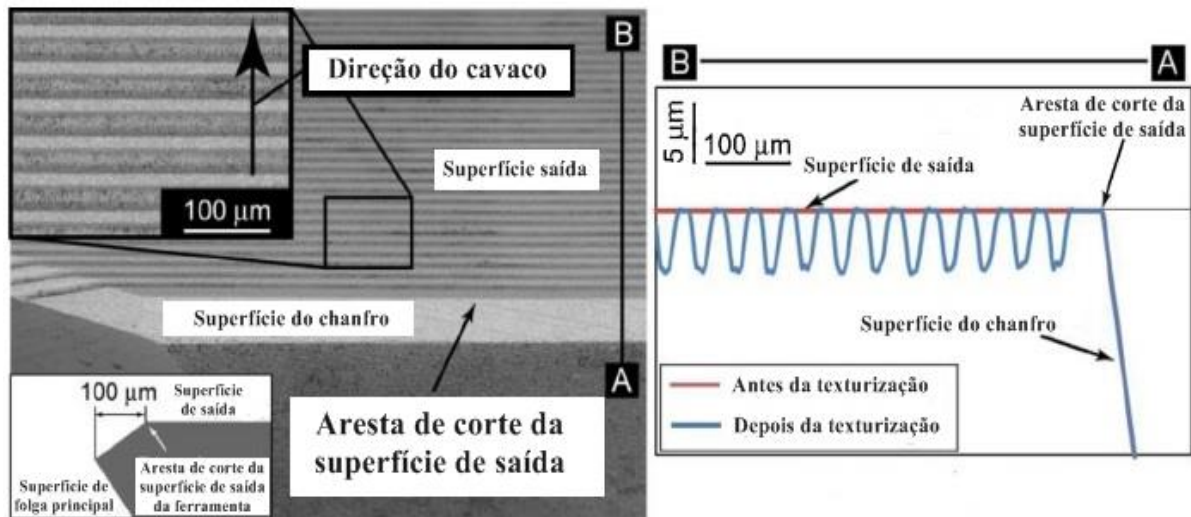


FIGURA 2.24 – Texturização de microcanais na superfície de saída (MS-1).

FONTE - SUGIHARA; ENOMOTO, 2013, p. 889

Zhang et al. (2015) investigaram o efeito do uso do fluido de corte sobre o desempenho de ferramentas de metal duro texturizadas a *laser* e revestidas com filme de TiAlN (espessura de 2 µm) na usinagem do aço AISI 1045 endurecido. Antes da texturização as ferramentas foram retificadas e polidas nas superfícies de saída e de folga principal para se obter uma rugosidade R_a menor que 0,02 µm. Posteriormente as ferramentas foram limpas com banho ultrassônico em álcool e acetona por 30 minutos. As texturas produzidas foram formadas por microcanais paralelos à aresta de corte principal com largura aproximada de 50 µm, profundidade aproximada de 50 µm e espaçamento de aproximadamente 200 µm. Antes da deposição do revestimento por PVD, foi retirado o material refundido depositado pelo processo a *laser* em volta dos canais e novamente aplicado um banho ultrassônico por 5 minutos, sendo cada ferramenta seca por 20 minutos em um secador com pré-vácuo. Os parâmetros de corte utilizados foram: velocidade de corte de 40 a 200 m/min, profundidade de usinagem de 0,3 mm e avanço de 0,1 mm/volta. Duas condições para o fluido de corte foram utilizadas: a primeira com jorro a 10,3 l/min sobre a superfície de saída da ferramenta e a segunda com jorro somente nos primeiros 30 segundos para avaliar a capacidade das texturas manterem o óleo dentro da área de contato. Todos os testes foram realizados durante 3 minutos e com três repetições cada, sendo a média desses três valores utilizada no estudo. Os resultados indicaram que sob a condição de jorro a ferramenta texturizada reduziu as componentes da força de usinagem em relação à ferramenta tradicional resvestida, sendo que a redução foi mais significativa para velocidades de corte mais altas. Em relação ao jorro interrompido, a ferramenta texturizada não foi tão eficiente em reduzir as componentes da

força de usinagem, indicando que o fluido de corte contínuo é fundamental para a eficiência das texturas nas condições de corte utilizadas. Além disso, foi possível perceber que as três componentes possuem comportamento similar entre si.

Suarez et al. (2010) investigaram a influência da texturização a *laser* em ferramentas de metal duro (classe ISO P25/K20) revestidas com TiCN-Al₂O₃-TiN no torneamento do aço ABNT 1050. A texturização foi feita sobre o revestimento na superfície de saída (área de 12x12 mm²) com intensidade de 10⁸ W/cm², pulso entre 30 e 40 ns, frequência de 13 kHz e diâmetro focal de 50 µm. As texturas produzidas formaram uma rede de micro ou nanocrateras e os testes foram realizados com o corte a seco e com jorro (fluido de base vegetal, concentração de 10% e vazão de 360 l/h). O principal objetivo foi medir a força de corte através de um dinamômetro piezoelétrico. Os parâmetros de corte foram: velocidade de corte variável de 10 a 400 m/min, avanço de 0,2 mm/volta e profundidade de usinagem de 2 mm, totalizando 60 testes. As forças de corte obtidas para a ferramenta texturizada foram ligeiramente menores quando comparadas com as forças geradas pela ferramenta sem textura para uma mesma condição de corte (seco ou jorro), inclusive na região de aparecimento de aresta postiça de corte (APC), mas a redução na força de corte ficou mais evidente para velocidades de corte mais altas. Como esperado, para velocidades de corte acima de 100 m/min, a força de corte diminuiu. A presença de fluido de corte produziu forças menores do que no corte a seco para todas as velocidades de corte testadas, indicando que o efeito lubrificante do fluido de corte é importante na redução das forças. Além disso, o desgaste na superfície de saída foi maior no corte a seco do que o corte com jorro para os dois tipos de ferramenta. No corte com jorro, a ferramenta com textura contribuiu mais do que a ferramenta sem textura para reduzir o desgaste na superfície de saída, pois a textura modificou a tribologia da interface cavaco/ferramenta reduzindo o atrito.

O sistema MQF também pode ser combinado com a texturização em uma ferramenta de corte para avaliar os seus efeitos na usinagem. Kawasegi et al. (2009) testaram texturas com profundidades (micro e nanoescalas), orientações (malha cruzada, perpendicular e paralelo à saída do cavaco) e ondulações diferentes (paralelas e perpendiculares à saída do cavaco) no torneamento com MQF (vazão de 40 ml/h) de uma liga de alumínio (AA5052). A texturização a *laser* foi realizada na superfície de saída de ferramentas de metal duro não revestido, mas antes do processo cada inserto foi polido para atingir uma rugosidade R_z de 0,1 µm. Os parâmetros de corte utilizados foram: velocidade de corte de 600 m/min, profundidade de usinagem de 0,2 mm e avanço de 0,1 mm/volta. As texturas reduziram as três componentes da força de usinagem, sendo as reduções mais significativas para as forças de avanço e

passiva, porém a maior redução foi obtida com o uso das nanotexturas. A orientação da nanotextura apresentou pouca influência, mas sua ondulação foi um fator importante na redução das forças, sendo a ondulação perpendicular à saída do cavaco a que efetivamente reduziu as três componentes da força de usinagem. Estes comportamentos também foram observados no corte a seco e as forças medidas foram semelhantes às registradas com o sistema MQF, indicando que a redução das forças se deve à redução do comprimento de contato ferramenta/peça e não devido ao efeito lubrificante do fluido de corte. Além disso, foi variada a velocidade de corte e constatado que as texturas apresentaram o comportamento relatado acima a partir de velocidades de corte superiores a 420 m/min, sendo que sob velocidades de corte abaixo deste valor, a ferramenta sem texturização apresentou força menor, pois a aderência de material foi menor na superfície de saída. Por fim, foi constatado que a profundidade das ondulações deve ser de 2,9 μm e o espaçamento entre elas não deve ser menor que 15 μm para se obter menores forças.

A quantidade de estudos analisados mostra que ainda são escassos os dados sobre o uso de fluido de corte por jorro ou MQF em superfícies texturizadas, porém eles apontam que a aplicação do fluido de corte pode gerar redução nas componentes da força de usinagem e no desgaste das ferramentas. A existência destes benefícios depende diretamente da velocidade de corte usada e da profundidade, largura e orientações das texturas produzidas. Além disso, todos os estudos apresentados utilizaram somente aço ou alumínio como corpo de prova para avaliar efeito da ferramenta texturizada, limitando a análise para outros materiais. Por fim, todas as texturas propostas nas pesquisas discutidas nesta revisão estavam localizadas apenas na superfície de saída das ferramentas de corte.

3 METODOLOGIA

Neste capítulo serão apresentados todos os procedimentos necessários para fabricação das ferramentas texturizadas a *laser* e para os ensaios experimentais de medição de forças de usinagem e da vida de ferramentas.

3.1 Texturização dos insertos

A preparação dos insertos foi realizada no Instituto de Engenharia de Produção e de Máquinas Ferramentas (IFW) da Universidade de Hannover, Alemanha.

3.1.1 Materiais

Nos testes deste trabalho foram utilizados vinte insertos de metal duro (classe ISO K15) sem revestimento, com geometria SNMA 120408 sem quebra-cavacos. Cada inserto foi retificado para produção de um chanfro com um ângulo de 20° a partir de 100 µm da aresta de corte principal, criando uma superfície para a texturização a *laser* com uma largura teórica de 106,4 µm. Apenas as arestas superiores de cada inserto foram chanfradas.

3.1.2 Equipamentos

Para a produção dos chanfros foi utilizado o processo de retificação em uma máquina CNC Wendt WAC715 (FIG. 3.1), com potência de 3 kW e rotação máxima de 1625 rpm.

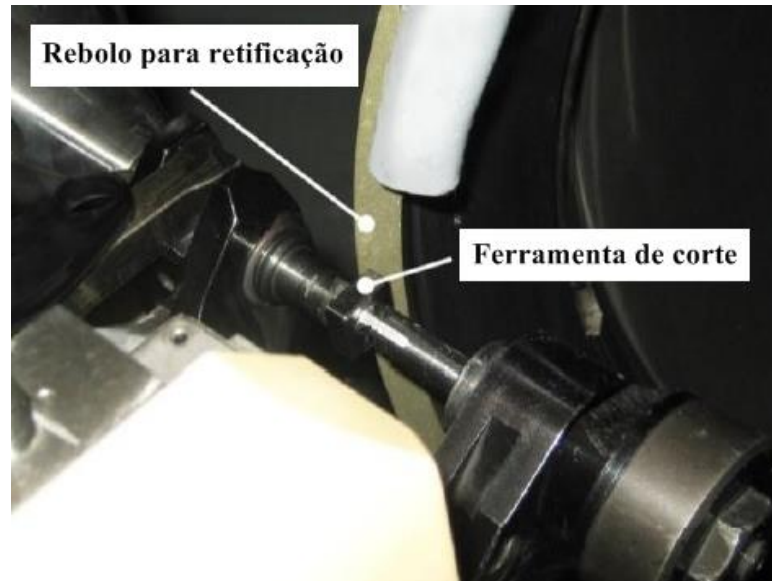


FIGURA 3.1 - Produção de chanfros por retificação.

Um rebolo de diamante vitrificado Winter D15 C120 foi usado na operação e condicionado por um rolo dressador de óxido de alumínio (320#). Os parâmetros usados na retificação são apresentados na TAB. 3.1. Após a retificação, os inserts foram examinados em um perfilômetro Mahr para verificar a qualidade dos chanfros.

TABELA 3.1

Parâmetros usados na retificação dos chanfros.

Velocidade do rebolo (V_s)	20 m/s
Velocidade de avanço axial (V_a)	6 mm/min
Velocidade de avanço do dressador (V_d)	3 μ m/s
Fluido de corte para retificação	Óleo mineral Rhenus HM7

A texturização das superfícies dos chanfros foi realizada em uma máquina de usinagem a *laser* Sauer Lasertec 40 (FIG 3.2), com potência máxima de 100 W. A TAB. 3.2 mostra os parâmetros de corte utilizados na texturização.

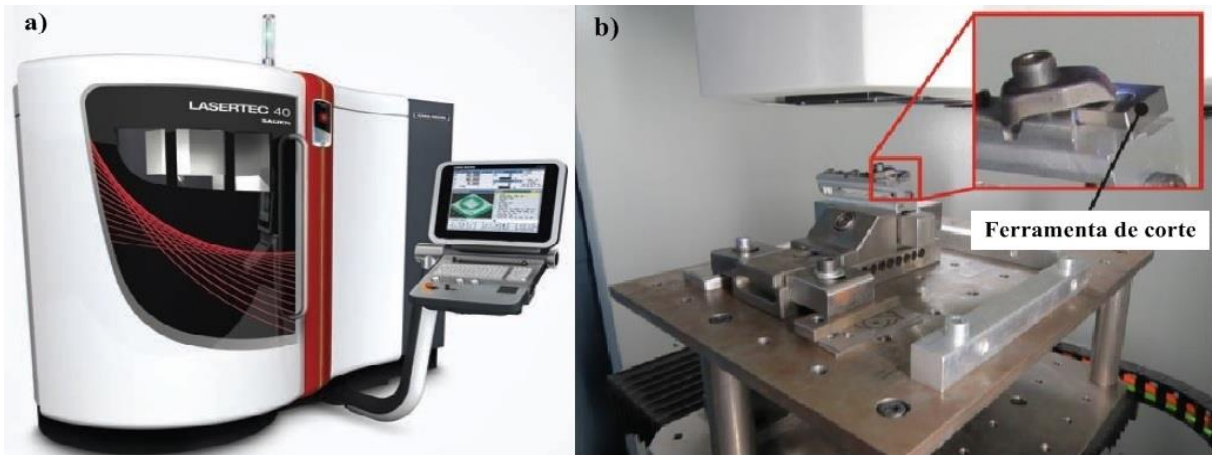


FIGURA 3.2 – Máquina para usinagem a *laser* (a) parte externa e (b) parte interna.

TABELA 3.2

Parâmetros de corte utilizados na texturização a *laser*.

Potência do pulso (P)	13 W
Frequência do pulso (F)	80 kHz
Velocidade de avanço (V_a)	250 mm/s

Após a texturização, foram realizadas imagens com microscópio eletrônico de varredura (MEV) Zeiss modelo EVO60 e a perfilometria óptica com o perfilômetro de contato Mahr.

Com o intuito de verificar a qualidade das texturas em cada aresta e de medir o diâmetro das cavidades produzidas, foi utilizado um microscópio óptico (durômetro Mitutoyo modelo MVK-H1). Um suporte para os insertos com um ângulo de 20° foi confeccionado para realizar as medições a 90° da superfície chanfrada. Este suporte e a montagem são mostrados na FIG. 3.3.

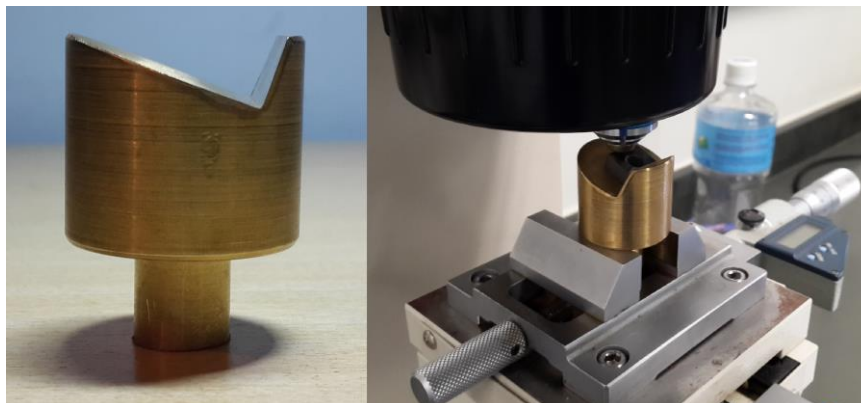


FIGURA 3.3 – Suporte e montagem utilizados nas medições dos diâmetros das cavidades.

3.1.3 Métodos

A máquina a *laser* foi programada para produzir duas colunas de cavidades semiesféricas paralelas ao longo da superfície chanfrada, ou seja, as colunas são paralelas à aresta de corte. Os insertos foram inclinados em 20° no interior da máquina para a superfície chanfrada ficar perpendicular ao feixe *laser*. As colunas foram espaçadas $50\ \mu\text{m}$ umas das outras (centro a centro da cavidade) e as cavidades foram produzidas com $40\ \mu\text{m}$ de diâmetro e $20\ \mu\text{m}$ de profundidade. O espaçamento (centro a centro) entre cavidades da mesma coluna foi variado em passos de 0 a $200\ \mu\text{m}$, produzindo texturas diferentes (TAB. 3.3).

TABELA 3.3

Nomenclatura dos grupos de ferramentas produzidas.

Grupo	Espaçamento entre cavidades
Passo 0	Sem texturização
Passo 60	$60\ \mu\text{m}$
Passo 100	$100\ \mu\text{m}$
Passo 200	$200\ \mu\text{m}$

As FIG. 3.4 a 3.7 mostram as imagens do MEV e os perfis obtidos para cada ferramenta produzida. É possível notar que todas as ferramentas texturizadas apresentaram inevitavelmente material refundido em torno das cavidades, sendo o inserto com Passo 60 o de maior densidade de material refundido. Este material refundido é característico do processo de usinagem a *laser* (citado na subseção 2.1.1 deste trabalho).

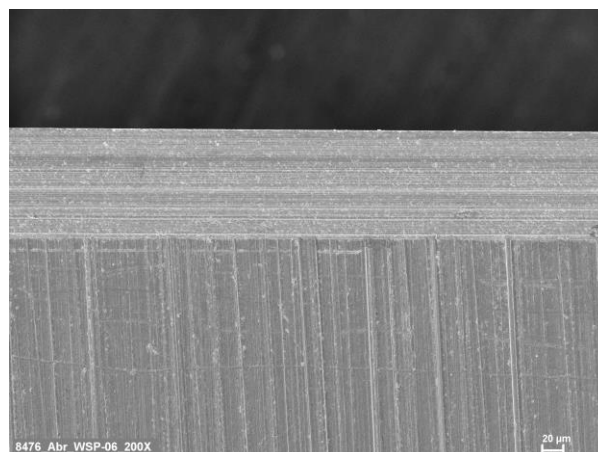


FIGURA 3.4 - Imagem do MEV do chanfro da ferramenta sem texturização.

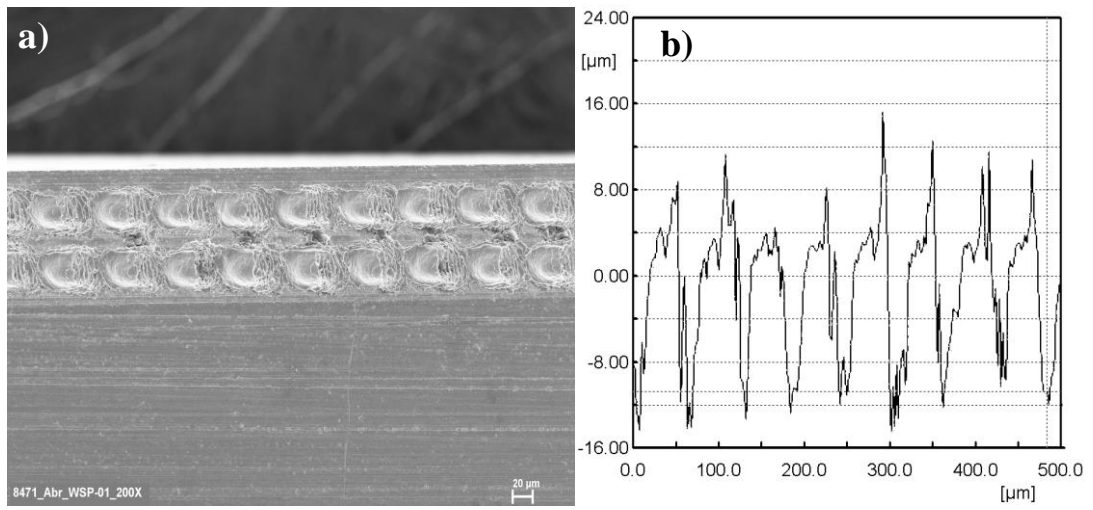


FIGURA 3.5 – Inseto texturizado com Passo 60: (a) imagem do MEV e (b) perfil das cavidades.

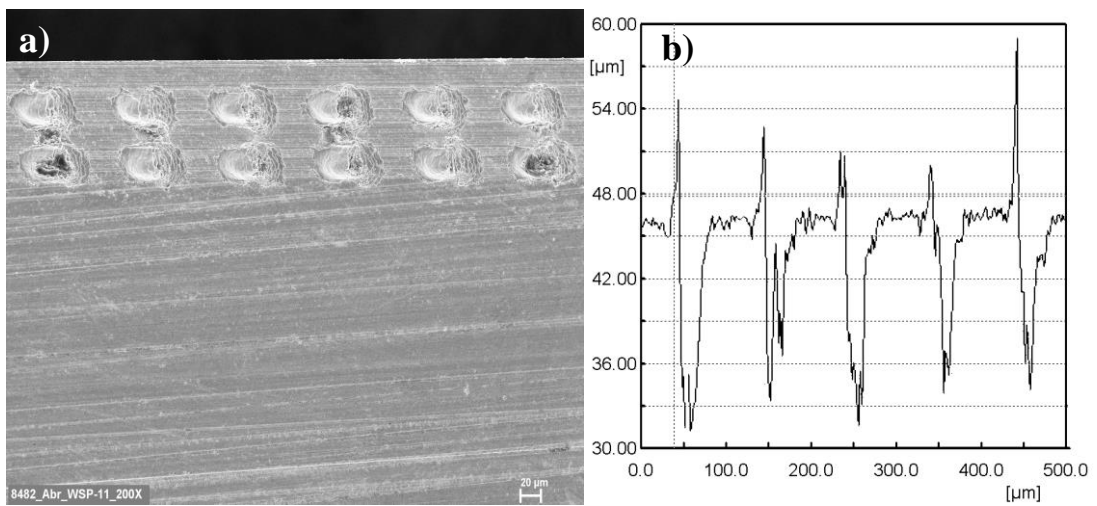


FIGURA 3.6 - Inseto texturizado com Passo 100: (a) imagem do MEV e (b) perfil das cavidades.

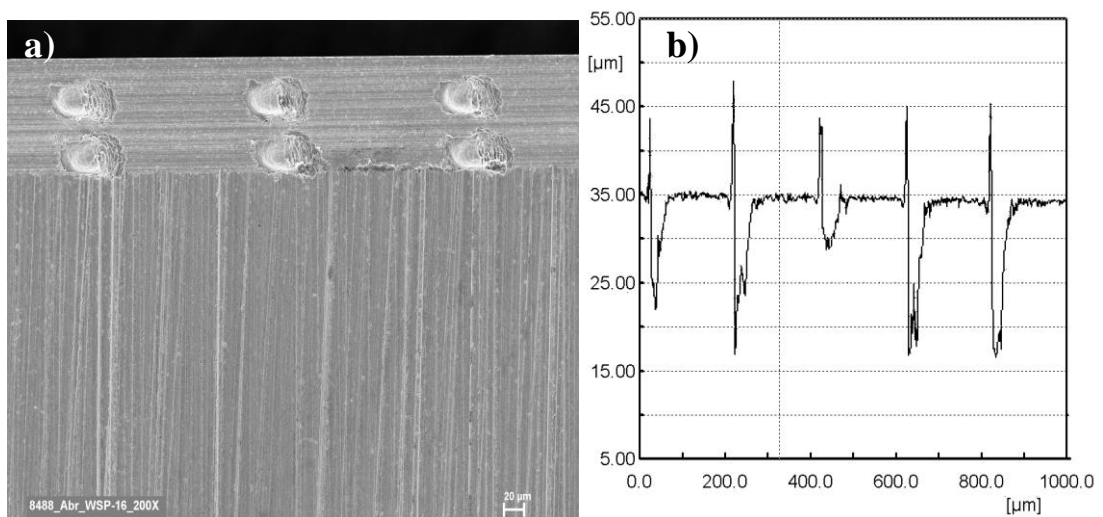
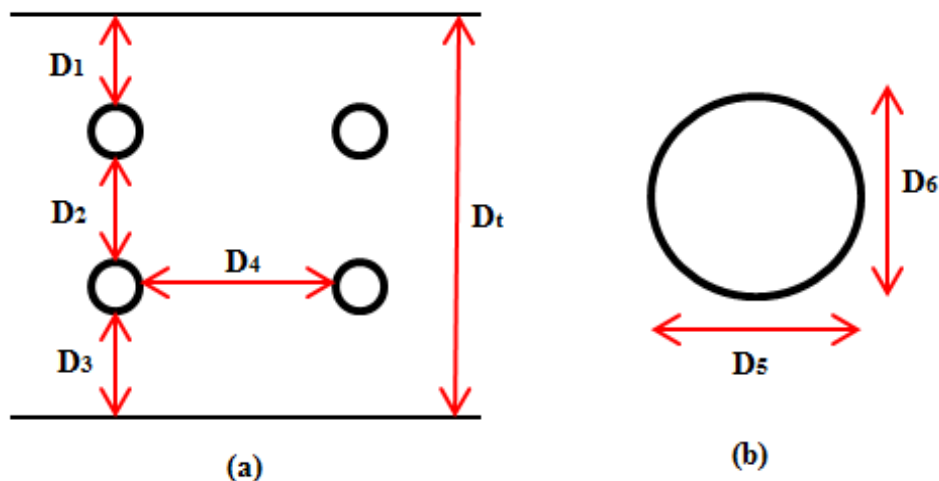


FIGURA 3.7 - Inseto texturizado com Passo 200: (a) imagem do MEV e (b) perfil das cavidades.

Para a verificação das texturas, foram selecionadas aleatoriamente duas pastilhas de cada condição indicada na TAB. 3.3 (exceto a ferramenta sem texturização), totalizando seis pastilhas. As medições realizadas no plano do chanfro foram feitas em todas as quatro arestas modificadas, totalizando 24 arestas de corte. Em cada aresta foi selecionada aleatoriamente uma região com quatro cavidades, sendo duas cavidades em cada coluna. Foram obtidas sete dimensões como ilustrado na FIG. 3.8.



- D_1 – distância da borda da cavidade da primeira coluna até a aresta de corte.
 D_2 – distância entre as bordas de duas cavidades adjacentes pertencentes a colunas diferentes.
 D_3 – distância da borda da cavidade da segunda coluna até o final do chanfro.
 D_4 – distância entre as bordas de duas cavidades adjacentes pertencentes à mesma coluna.
 D_5 – diâmetro da cavidade na direção paralela à aresta de corte.
 D_6 – diâmetro da cavidade na direção perpendicular à aresta de corte.
 D_t – distância entre aresta de corte e o final do chanfro.

FIGURA 3.8 - Dimensões medidas: (a) desenho esquemático das cavidades medidas e (b) ampliação.

Portanto, em cada aresta foram obtidos um valor de D_t , dois valores de D_1 , D_2 , D_3 e D_4 e quatro valores de D_5 e D_6 . As bordas das cavidades foram usadas como referência, pois a localização exata do centro de cada cavidade não foi possível. Todas as medições foram feitas pelo mesmo operador e o sistema de medição foi ajustado apenas duas vezes (dois dias de medição) com o intuito de minimizar as incertezas dos resultados obtidos. A TAB. 3.4 mostra os valores médios com o respectivo desvio-padrão, somado ao erro máximo ($E_{m\acute{a}x}$), para os três passos analisados.

TABELA 3.4
Resultado de medição das cavidades analisadas.

Grupos	D₁ (μm)	D₂ (μm)	D₃ (μm)	D₄ (μm)	D₅ (μm)	D₆ (μm)	D_t (μm)
Passo 60	(26,0±6,6)	(19,2±4,9)	(13,9±8,4)	(13,0±4,4)	(48,7±4,7)	(29,5±5,2)	(115±15)
Passo 100	(28±21)	(18,9±6,5)	(14±16)	(48,8±6,4)	(50,9±3,7)	(30,2±6,7)	(120±41)
Passo 200	(20,9±8,4)	(19,5±5,5)	(14±13)	(150,0±3,1)	(50,6±3,3)	(29,4±3,5)	(112±14)

Os valores de D₅ e D₆, para todos os grupos, mostram que as cavidades não são semiesferas com 40 μm de diâmetro como programado, mas possuem forma elíptica alongada na direção paralela à aresta de corte. Isto ocorre devido ao processo de fabricação, uma vez que o feixe *laser* varre a superfície chanfrada no sentido paralelo à aresta de corte.

Com os dados da TAB. 3.4, é possível calcular a distância entre cavidades (D_{cavidades}) como a soma de D₅ e D₄, e calcular a distância entre colunas (D_{colunas}) como a soma de D₆ e D₂. Estas duas distâncias são mostradas na TAB. 3.5.

TABELA 3.5
Resultado de medição das distâncias entre cavidades e colunas.

Grupos	D_{cavidades} (μm)	D_{coluna} (μm)
Passo 60	(61,7±9,1)	(48±10)
Passo 100	(99±10)	(49±13)
Passo 200	(200,6±6,4)	(48,9±9,0)

Todos os três passos apresentaram valores médios entre as cavidades bem próximos aos programados na texturização, indicando que a fabricação foi adequada para o único parâmetro alterado entre os grupos (distância entre cavidades). A distância entre colunas possui uma média próxima entre os três passos, mostrando também uma padronização deste parâmetro na fabricação. Além disso, fica evidente que o espaçamento entre furos de 200 μm apresenta menor variação devido à diminuição de material ressolidificado em uma mesma área quando comparado com as outras duas texturas.

3.2 Medição das forças de usinagem

Os testes de força foram realizados no Laboratório de Usinagem do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade Federal de São João Del Rei (UFSJ).

3.2.1 Materiais

A medição da força de usinagem foi realizada durante o torneamento de barras de ferro fundido cinzento GG30 (Fabricação TUPY S.A., Joinville, SC) com diâmetro de 82,6 mm e comprimento de 70 mm. Antes da usinagem, os corpos de prova sofreram tratamento térmico de recozimento para uniformizar as características do material. Este tratamento foi realizado a 930° C com patamar de 5 horas seguido de resfriamento ao forno. O fluido de corte utilizado no sistema MQF foi o óleo integral de base vegetal Vascomill MMS.

3.2.2 Equipamentos

Nos testes foi utilizado um centro de torneamento Romi GL 240M (potência máxima do eixo árvore de 22,5 kW e rotação máxima de 6.000 rpm) equipado com comando numérico Fanuc Oi TD. A medição das forças foi realizada com um dinamômetro piezelétrico Kistler modelo 9272 conectado a um amplificador e a uma placa de aquisição de dados do mesmo fabricante. A frequência de aquisição foi de 1.000 Hz e o tempo de aquisição mínimo de 5 segundos, gerando pelo menos cinco mil pontos de medição. Um suporte porta-ferramenta Sandvik Coromant código PSBNR 2020K12 foi utilizado nos testes, possuindo as seguintes características: ângulo de saída (γ_0) de -6°, ângulo de inclinação (λ_s) de -6°, ângulo de folga principal (α_0) de 6°, ângulo de posição principal (χ_r) de 75° e ângulo de posição secundário (χ_r') de 15°. Um rugosímetro portátil Mitutoyo SJ-400, com comprimentos de amostragem (I_r) de 0,8 mm e de avaliação (I_n) de 4 mm foi utilizado na medição de rugosidade. O equipamento para aplicação de MQF foi um ACCU-LUBE (*Precision-Applicator*).

3.2.3 Métodos

Três corpos de prova selecionados aleatoriamente tiveram a dureza superficial medida antes dos testes, obtendo-se um valor médio de 72 HRB. Ao longo dos testes a dureza

foi monitorada e seu valor se manteve constante até 9 mm de profundidade, momento em que os corpos de prova foram trocados. Cada aresta de corte foi utilizada apenas em dois passes, sendo cada passe de 45 mm de comprimento, para evitar a influência de desgaste da ferramenta sobre as forças de usinagem. O suporte da ferramenta foi montado no dinamômetro com balanço de 65 mm e o dinamômetro foi montado para que os eixos x, y e z do equipamento representassem as forças passiva, de corte e de avanço, respectivamente.

Os parâmetros de corte foram definidos com base no catálogo do fabricante dos insertos: velocidades de corte de 100, 200 e 300 m/min, avanços de 0,05, 0,10 e 0,15 mm/volta e profundidades de usinagem de 1,0, 1,5 e 2,0 mm. O valor do avanço foi limitado em 0,15 mm/volta (abaixo do recomendado no catálogo) para que boa parte do cavaco fosse formada sobre a área texturizada (largura teórica da superfície chanfro de 106,4 μm), permitindo avaliar melhor a influência da textura sobre o comportamento das forças de usinagem. Estes parâmetros foram combinados em 9 testes diferentes, possibilitando avaliar a influência de cada um dos três parâmetros de corte citados. Os testes também foram realizados para o corte a seco e o corte com MQF (vazão de 65 ml/h e pressão do ar de 6 bar), totalizando 18 testes diferentes para cada grupo de ferramenta, como mostrado na TAB. 3.6. O fluido de corte foi aplicado lateralmente às superfícies de saída e de folga (FIG. 3.9). Os testes foram realizados uma única vez devido ao número limitado de arestas de corte, mas para cada grupo de ferramenta foi repetido aleatoriamente um teste a seco e um teste com MQF, possibilitando verificar a dispersão dos valores obtidos.

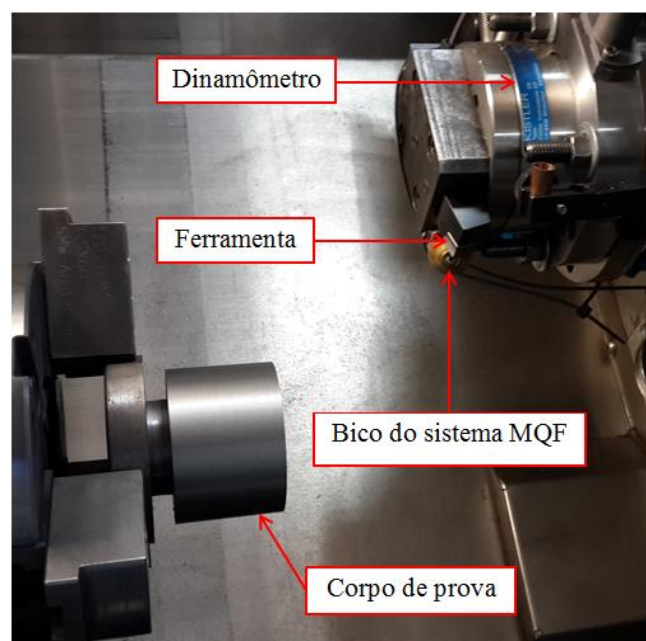


FIGURA 3.9 – Configuração montada para os testes de força.

A rugosidade da superfície torneada foi medida após cada teste de força da TAB.

3.6. Foram calculados os valores médios (três medidas equidistantes) do desvio médio aritmético (R_a) e da altura máxima do perfil (R_z). Também foram coletados os cavacos no final de todos os testes realizados.

TABELA 3.6

Parâmetros dos testes realizados para medição das forças de usinagem.

Teste	V_c (m/min)	f (mm/volta)	a_p (mm)	Condição
1	100	0,10	1,5	Seco
2	200	0,10	1,5	Seco
3	300	0,10	1,5	Seco
4	200	0,05	1,5	Seco
5	200	0,10	1,5	Seco
6	200	0,15	1,5	Seco
7	200	0,10	1,0	Seco
8	200	0,10	1,5	Seco
9	200	0,10	2,0	Seco
10	Repetição aleatória de um teste de 1 a 9			Seco
11	100	0,10	1,5	MQF
12	200	0,10	1,5	MQF
13	300	0,10	1,5	MQF
14	200	0,05	1,5	MQF
15	200	0,10	1,5	MQF
16	200	0,15	1,5	MQF
17	200	0,10	1,0	MQF
18	200	0,10	1,5	MQF
19	200	0,10	2,0	MQF
20	Repetição aleatória de um teste de 11 a 19			MQF

3.3 Medição do desgaste das ferramentas

Os testes de vida foram realizados no Laboratório de Usinagem e Automação do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG).

3.3.1 Materiais

Os mesmos materiais (insertos, ferro fundido GG30 e fluido de corte Vascomill MMS) usados nos testes de força de usinagem foram empregados nos testes de vida de ferramenta. Porém, os corpos de prova usados nos testes de vida possuíam diâmetro de 88 mm e comprimento de 310 mm. Devido ao tamanho do corpo de prova, foi necessário utilizar uma contra ponta com balanço de 105 mm. Antes da usinagem, os corpos de prova sofreram tratamento térmico de recozimento para uniformizar as características do material. Este tratamento foi realizado a 920° C com patamar de 12 horas seguido de resfriamento ao forno.

3.3.2 Equipamentos

O suporte porta-ferramenta também foi o mesmo utilizado no teste de força. Foi usado um centro de usinagem Romi Centur 30S com comando numérico MACH 9 (potência máxima de 5,5 kW e rotação máxima de 3.500 rpm). As imagens utilizadas na medição do desgaste de flanco foram geradas por uma câmera digital Olympus modelo SZ61. Após o torneamento, foram realizadas imagens de todas as arestas de corte desgastadas com o microscópio eletrônico de varredura (MEV) Hitachi modelo TM300 (Tabletop Microscope) da Universidade Federal de São João Del Rei (UFSJ).

3.3.3 Métodos

Após cada passe, foram medidos cinco valores de dureza superficial ao longo da superfície, cuja média foi de 80 HRB. Com isso, quando o valor médio de dureza se aproximava de 78 HRB, a peça era trocada por uma nova.

Os testes também foram executados para a condição a seco e com MQF, sendo nesse caso aplicada a mesma vazão (65 ml/h) e pressão do sistema de ar comprimido (6 bar). O fluido de corte também foi aplicado lateralmente às superfícies de saída e de folga (FIG. 3.10). O teste a seco foi realizado uma única vez (uma aresta de corte) para cada grupo de

ferramentas e o teste com MQF foi realizado duas vezes (duas arestas de corte) para cada grupo de insertos, pois os resultados obtidos com a mínima quantidade de fluido de corte apresentaram alterações consideráveis em função do tipo de ferramenta, o que não foi percebido no corte a seco. A FIG. 3.10 mostra a montagem feita para os testes de desgaste.

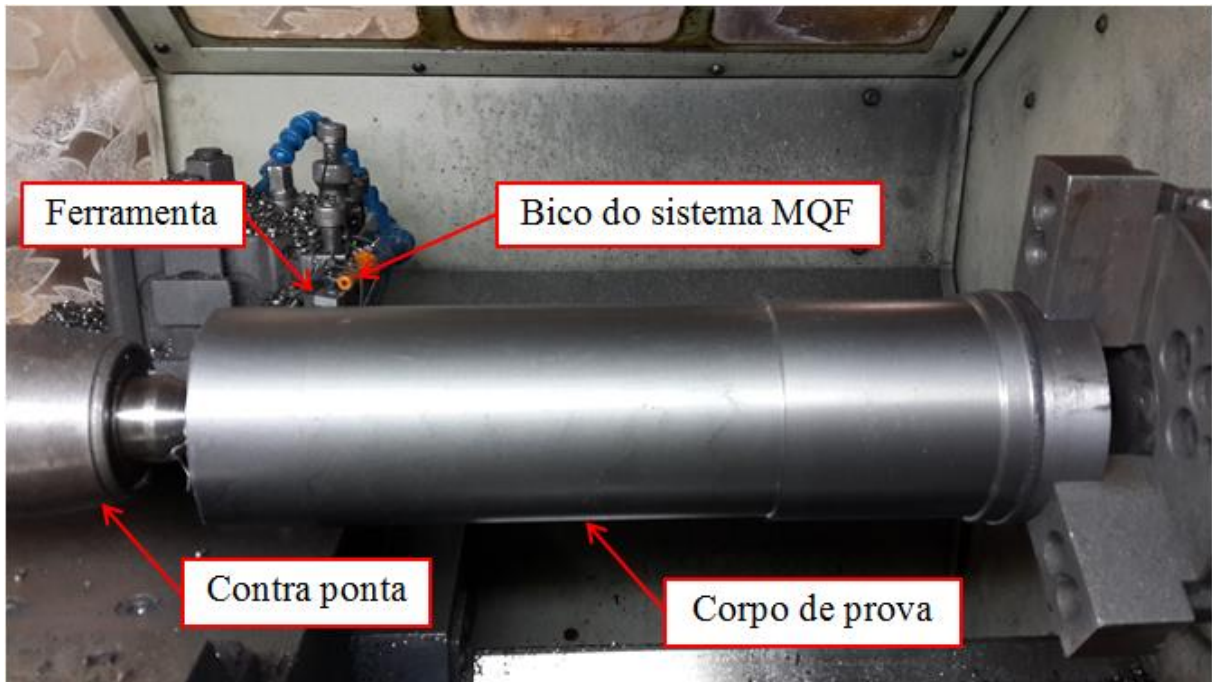


FIGURA 3.10 – Configuração montada para os testes de vida.

O critério de fim de vida adotado foi o desgaste de flanco máximo ($VB_{Bmáx}$) de 500 μm . A cada 2 minutos de teste a aresta de corte era retirada para medição do desgaste de flanco máximo. A medição foi feita por meio de imagens capturadas pela câmera digital instalada em um microscópio óptico configurado para uma ampliação de 30 vezes. As imagens coletadas foram processadas e medidas pelo programa Image-Pro Express devidamente ajustado. Para determinar a extensão do desgaste, primeiro foi identificado visualmente o ponto danificado (ausência da superfície original) mais afastado da aresta de corte principal, e então foi traçada uma linha coincidente à aresta superior do chanfro. Posteriormente foi traçada uma linha perpendicular à primeira linha de forma que o desgaste fosse igual ao comprimento da linha perpendicular (FIG. 3.11). Deve-se ressaltar que o desgaste foi considerado apenas na superfície de folga principal de cada inserto.

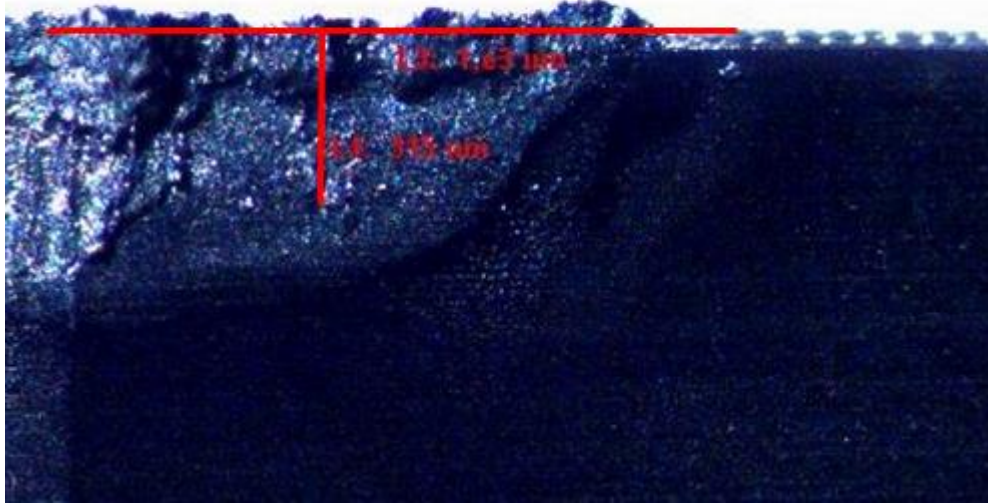


FIGURA 3.11 – Procedimento para medição do desgaste de flanco máximo.

4 RESULTADOS

Neste capítulo serão apresentados os resultados obtidos durante os testes de força de usinagem (componentes da força, rugosidade e cavaco) e durante os testes de vida das ferramentas de corte.

4.1 Força de usinagem

As forças médias mostradas nesta seção foram obtidas com o *software* fornecido com o dinamômetro, que fornece as curvas características para as três componentes da força de usinagem. Com este dado, é possível selecionar uma região (intervalo de pontos), fornecendo o valor de força média, mínima e máxima do intervalo. Todas as curvas apresentaram comportamentos parecidos, sendo que o trecho selecionado neste estudo representa a parte da curva em que a força possui um comportamento estável, como ilustrado na FIG. 4.1. A oscilação da força dentro da região selecionada é devido à formação do cavaco, ou seja, a força aumenta para iniciar a trinca e decresce quando o cavaco é totalmente rompido, formando cavacos descontínuos característicos do ferro fundido cinzento.

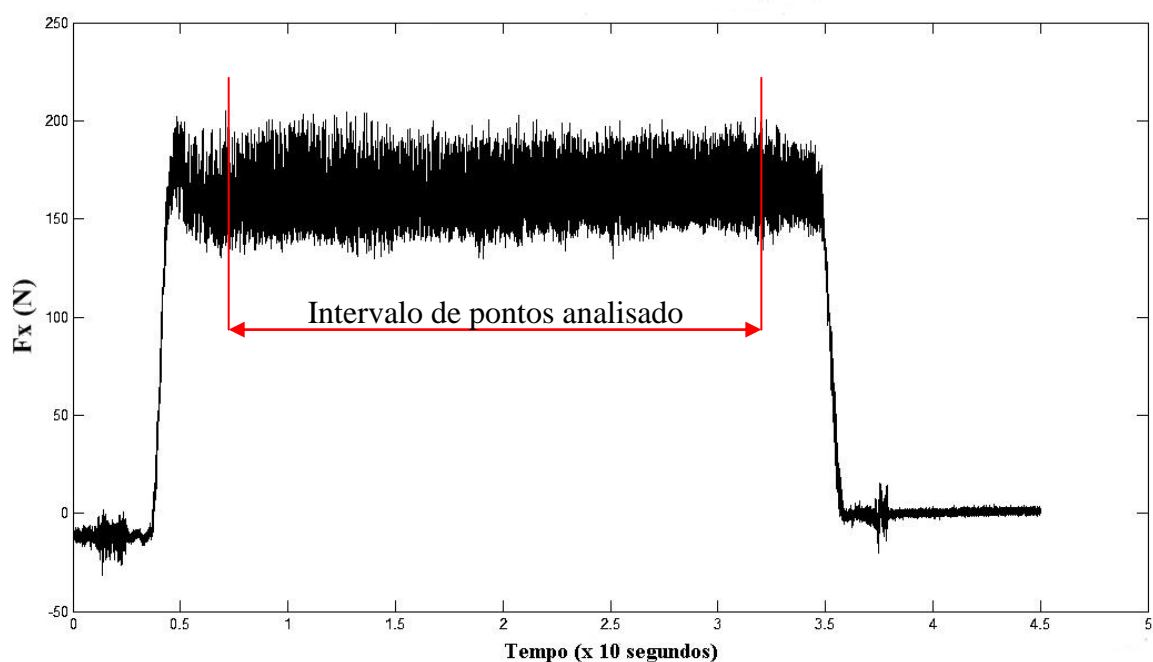


FIGURA 4.1 – Curva característica de força (aquisição de 30 segundos e taxa de aquisição de 1000 Hz).

4.1.1 Influência da velocidade de corte sobre a força de usinagem

As FIG. 4.2 a 4.5 mostram os valores médios das três componentes da força de usinagem no corte a seco e no corte com MQF em função da velocidade de corte, para valores constantes de avanço (0,10 mm/volta) e profundidade de usinagem (1,5 mm).

A FIG. 4.2 indica que, para o corte a seco, ocorreu um aumento considerável da força de corte (principal) com o aumento da velocidade de corte de 100 para 200 m/min e uma ligeira queda quando a velocidade de corte aumenta de 200 para 300 m/min, em oposição ao comportamento esperado de queda da força de corte com o aumento da velocidade de corte, como descrito por Trent e Wright (2000). A queda da força de corte com a elevação da velocidade de corte é, em parte, causada por uma diminuição na área de contato e, em parte, por um aumento no ângulo de cisalhamento devido ao aumento de temperatura na zona de fluxo. Entretanto, pode-se considerar que, no presente caso, a natureza frágil do ferro fundido cinzento não permite um aumento no ângulo de cisalhamento do material. Além disso, o valor de avanço (0,10 mm/volta) adotado faz com que o cavaco seja formado dentro do chanfro (largura da superfície de 106,4 μm), o que resulta em ângulo de saída extremamente negativo de -26° (-20° da inclinação do chanfro e -6° do suporte ferramenta). Portanto, a redução na área de contato não ocorre e o aumento da taxa de remoção de material (velocidade de corte elevada) ocasiona o aumento observado na força de corte. Nenhum tipo de ferramenta apresentou uma tendência constante na redução da força de corte, mas algumas texturas reduziram levemente a força, quando comparadas com a ferramenta sem textura, para taxas de remoção de material baixas e intermediárias (velocidade de corte baixa e intermediária). Para alta taxa remoção de material, a texturização foi prejudicial para a força de corte.

Quanto ao corte com MQF, a força de corte cresceu com o aumento da velocidade de corte, reforçando a hipótese sobre a influência do tipo de material e do elevado ângulo de saída negativo da ferramenta citado anteriormente. Em geral, a magnitude da força de corte com MQF foi ligeiramente menor do que no corte a seco para as velocidades de corte de 100 e 200 m/min, mas para a velocidade de corte de 300 m/min foi um pouco maior, indicando que para velocidades de corte altas o fluido de corte não consegue penetrar de forma eficiente na área de contato cavaco/ferramenta, ou seja, não consegue atuar como lubrificante na superfície de saída do inserto. Além disso, nenhum tipo de inserto apresentou uma tendência clara na redução da força de corte, mas algumas ferramentas texturizadas reduziram a força de corte no torneamento com baixa e alta taxa de remoção de material quando comparadas com a ferramenta sem textura.

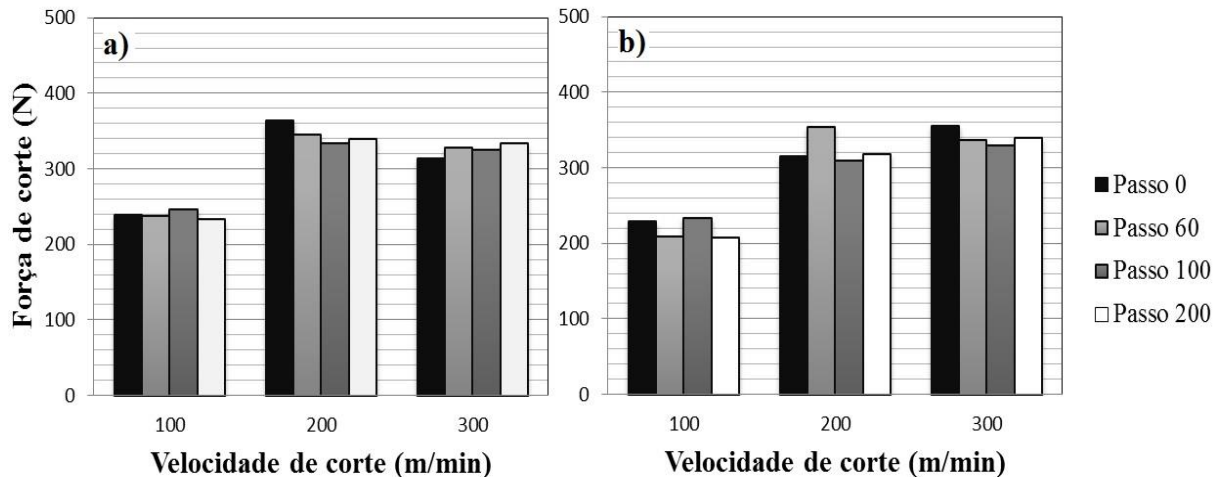


FIGURA 4.2 – Força de corte para os quatro tipos de ferramentas em função da velocidade de corte: (a) corte a seco e (b) MQF. ($f = 0,10$ mm/volta e $a_p = 1,5$ mm).

A FIG. 4.3 mostra que, no corte a seco, a força de avanço apresenta um comportamento semelhante ao apresentado pela força de corte no mesmo ambiente, mas com módulo menor para as três velocidades de corte, o que era esperado, pois a força de corte, geralmente, é a componente de maior módulo dentre as três componentes básicas da força de usinagem. Nenhum tipo de ferramenta apresentou uma tendência constante de redução da força de avanço, porém as ferramentas texturizadas reduziram levemente a força de avanço no corte com baixa e intermediária taxa de remoção de material quando comparadas à ferramenta sem textura.

Como esperado, no corte com mínima quantidade de fluido, a força de avanço apresenta um comportamento idêntico ao apresentado pela força de corte com MQF. Em geral, a magnitude da força de avanço no MQF foi ligeiramente menor do que no corte a seco para as velocidades de corte de 100 e 200 m/min, mas para a velocidade de corte de 300 m/min foi um pouco maior, indicando novamente que o fluido de corte não conseguiu atuar como lubrificante na superfície de saída ferramenta. Além disso, as texturas apresentam comportamento idêntico ao descrito anteriormente para a força de corte com mínima quantidade de fluido.

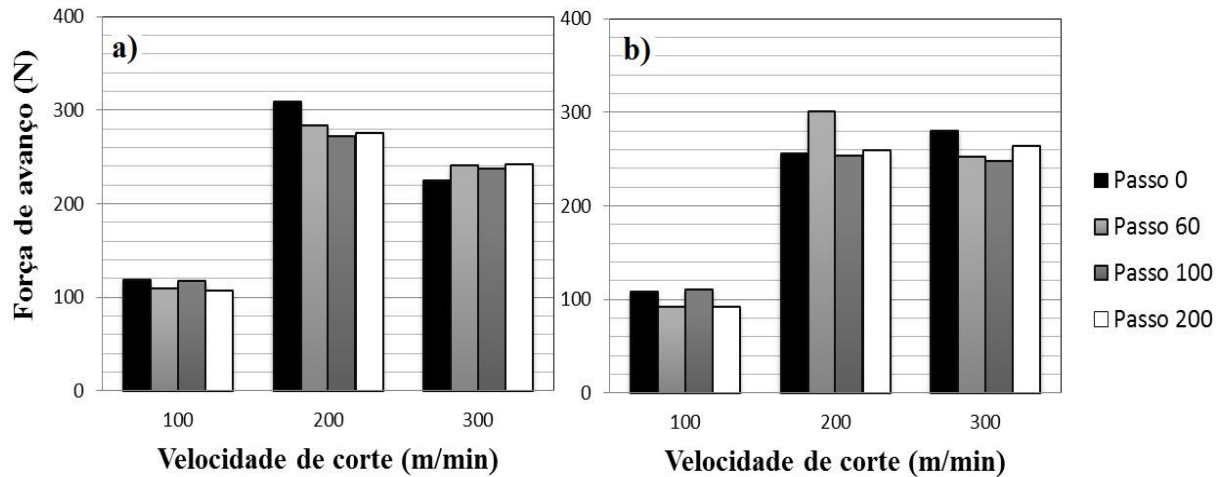


FIGURA 4.3 – Força de avanço para os quatro tipos de ferramentas em função da velocidade de corte: (a) corte a seco e (b) MQF. ($f = 0,10$ mm/volta e $a_p = 1,5$ mm).

A FIG. 4.4 indica que, no corte a seco, a força passiva (componente radial) apresenta comportamento semelhante às forças de corte e de avanço, mas com o menor módulo entre as três componentes para as três velocidades de corte devido ao elevado ângulo de posição da ferramenta ($\chi_r = 75^\circ$). Mais uma vez, nenhum tipo de ferramenta apresentou uma tendência constante na redução da força passiva, mas as texturas reduziram essa força quando empregada uma taxa de remoção de material intermediária em comparação à ferramenta sem texturização.

No corte com MQF, a força passiva apresenta comportamento similar às forças de corte e de avanço com MQF, mas com o menor módulo entre as três forças para todas as velocidades de corte. Novamente o sistema MQF não foi eficiente para velocidade de corte alta, comprovando a dificuldade de penetração do fluido de corte na interface peça/ferramenta em condições mais severas de usinagem. A magnitude da força passiva com aplicação de MQF foi ligeiramente menor do que no corte a seco para as velocidades de corte de 100 e 200 m/min. As texturizadas reduziram consideravelmente a força passiva para alta taxa de remoção de material quando comparadas com o inserto sem textura, mas produziram forças passivas semelhantes ou maiores que o inserto não texturizado para velocidades de corte baixa e média.

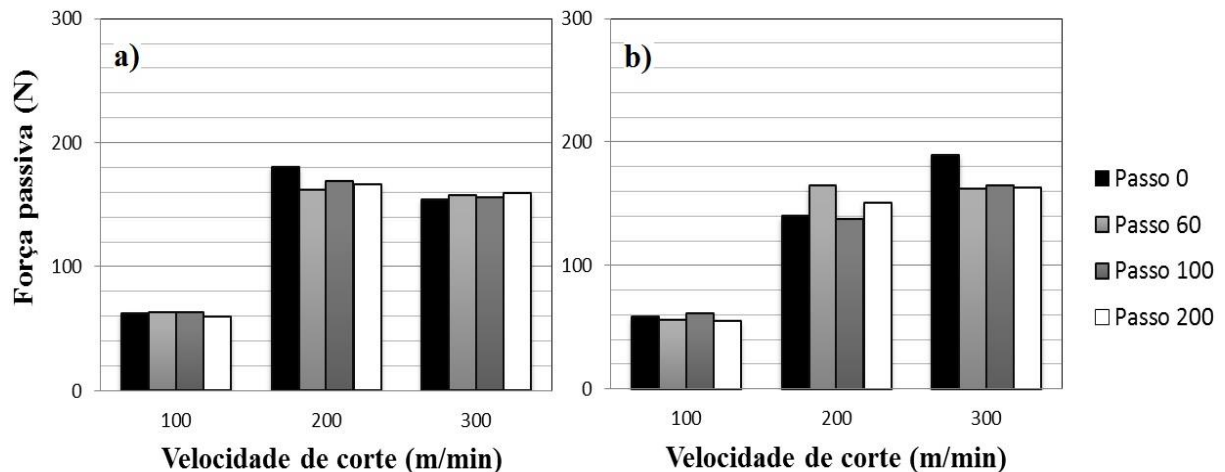


FIGURA 4.4 – Força passiva para os quatro tipos de ferramentas em função da velocidade de corte: (a) corte a seco e (b) MQF. ($f = 0,10$ mm/volta e $a_p = 1,5$ mm).

4.1.2 Influência do avanço sobre a força de usinagem

Os valores médios das três componentes da força de usinagem no corte a seco e no corte com MQF em função do avanço são representados nas FIG. 4.5 a 4.7, para valores constantes de velocidade de corte (200 m/min) e profundidade de usinagem (1,5 mm).

A FIG. 4.5 indica que a força de corte aumenta com a elevação do avanço tanto no corte a seco quanto no corte com MQF, pois, apesar de a pressão específica de corte diminuir com a elevação do avanço (FIG. 2.12), a área de corte aumenta em maior proporção, ocasionando o aumento da força (EQ. 2.2). No corte a seco, as quatro ferramentas apresentaram valores muito próximos de força para os três avanços, mas no corte com MQF as texturas com passo de 60 e 200 μm apresentaram uma tendência de queda, porque reduziram a força de corte quando comparadas à ferramenta sem textura, principalmente para avanços de 0,05 e 0,15 mm/volta. Por fim, o corte a seco apresentou forças menores do que o MQF para avanço de 0,05 mm/volta e forças semelhantes ao MQF para avanços de 0,10 mm/volta e 0,15 mm/volta.

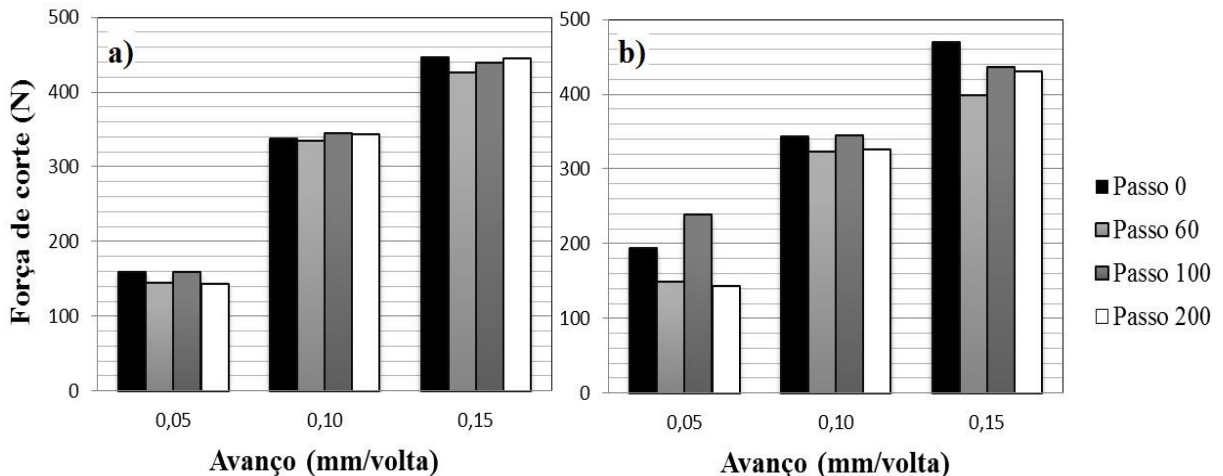


FIGURA 4.5 – Força de corte para os quatro tipos de ferramentas em função do avanço: (a) corte a seco e (b) MQF. ($v_c = 200$ m/min e $a_p = 1,5$ mm).

Novamente, a força de avanço apresenta magnitudes menores que a força de corte para as duas condições de aplicação de fluido de corte (seco e MQF), como mostrado pela FIG. 4.6. Também é evidenciado o aumento da força de avanço com o aumento do avanço tanto no corte a seco, quanto no MQF, mas o corte a seco apresentou forças ligeiramente maiores do que o MQF para os avanços de 0,10 e 0,15 mm/volta. No corte a seco, as quatro ferramentas apresentaram valores muito próximos de força para os avanços de 0,10 e 0,15 mm/volta, mas com o menor avanço as texturas com 60 e 200 μ m de espaçamento produziram forças menores do que o inserto sem textura. Com o uso de MQF, as texturas com passo de 60 e 200 μ m reduziram consideravelmente a força de avanço para os três valores de avanço, confirmando a tendência vista na FIG. 4.5.

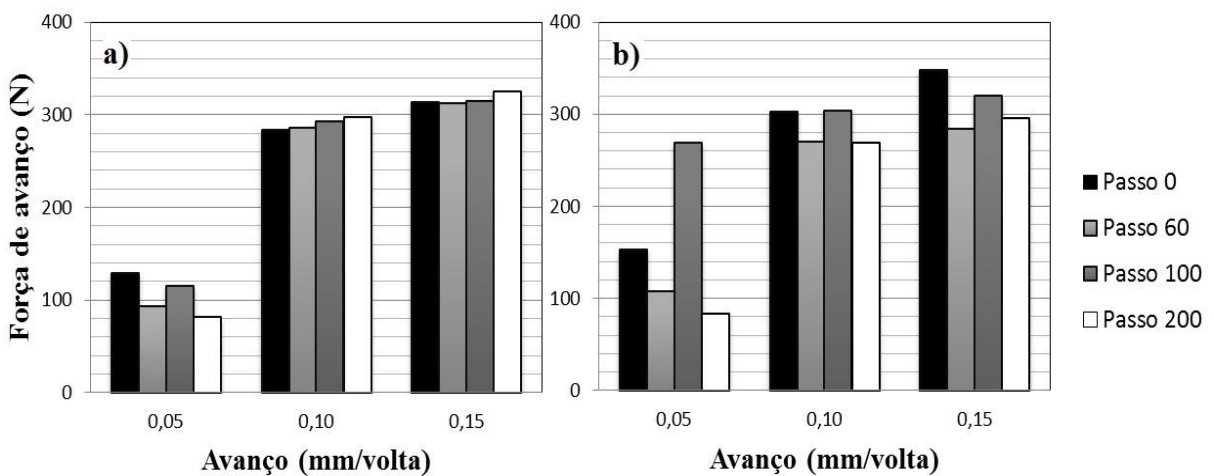


FIGURA 4.6 – Força de avanço para os quatro tipos de ferramentas em função do avanço: (a) corte a seco e (b) MQF. ($v_c = 200$ m/min e $a_p = 1,5$ mm).

A FIG. 4.7 revela que as forças passivas possuem módulos bem menores que as forças de corte e avanço para as duas condições de aplicação do fluido de corte. O aumento do avanço provoca um aumento na força passiva, sendo que, no corte a seco, as forças foram um pouco maiores que o MQF para o avanço de 0,10 e 0,15 mm/volta, como ocorreu com a força de avanço (FIG. 4.6). Novamente, no corte a seco as quatro ferramentas apresentaram valores muito próximos de força para os avanços de 0,10 e 0,15 mm/volta, mas com o menor avanço, as texturas com espaçamento de 60 e 200 μm produziram forças menores do que o inserto sem textura. Também, com o uso de MQF, as texturas com espaçamento de 60 e 200 μm reduziram consideravelmente a força passiva em relação à ferramenta não texturizada para os três valores de avanço, confirmando a tendência vista nas FIG. 4.5 e 4.6.

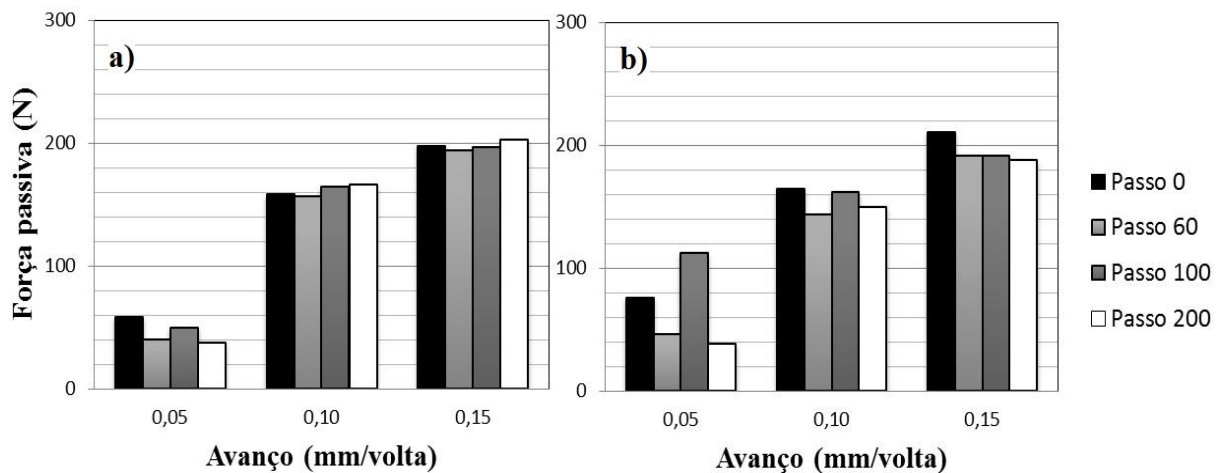


FIGURA 4.7 – Força passiva para os quatro tipos de ferramentas em função do avanço: (a) corte a seco e (b) MQF. ($V_c = 200$ m/min e $a_p = 1,5$ mm).

4.1.3 Influência da profundidade de usinagem sobre a força de usinagem

As FIG. 4.8 a 4.10 mostram os valores médios das três componentes da força de usinagem no corte a seco e no corte com MQF em função da profundidade de usinagem para valores constantes de velocidade de corte (200 m/min) e avanço (0,10 mm/volta).

A força de corte aumenta com o crescimento da profundidade de usinagem tanto para o corte a seco, quanto com MQF, como indicado na FIG. 4.8, pois, apesar da pressão específica de corte diminuir levemente com a elevação da profundidade de usinagem (FIG. 2.12), a área da seção de corte aumenta em maior proporção, ocasionando o aumento da força (EQ. 2.2). No corte a seco, as quatro ferramentas apresentaram valores muito próximos de

força para as profundidades de usinagem de 1,5 e 2,0 mm, mas para $a_p = 1,0$ mm a textura com espaçamento de 60 μm produziu forças menores do que o inserto sem textura. No corte com MQF, a textura de passo de 200 μm apresentou uma redução considerável na força de corte quando comparada à ferramenta sem textura para profundidade de usinagem de 1,0 mm, mas para as outras duas profundidades de usinagem os inserts texturizados geraram forças semelhantes às da ferramenta sem textura. Além disso, o corte a seco apresentou forças semelhantes ao do MQF para todos os valores de profundidade de usinagem testados.

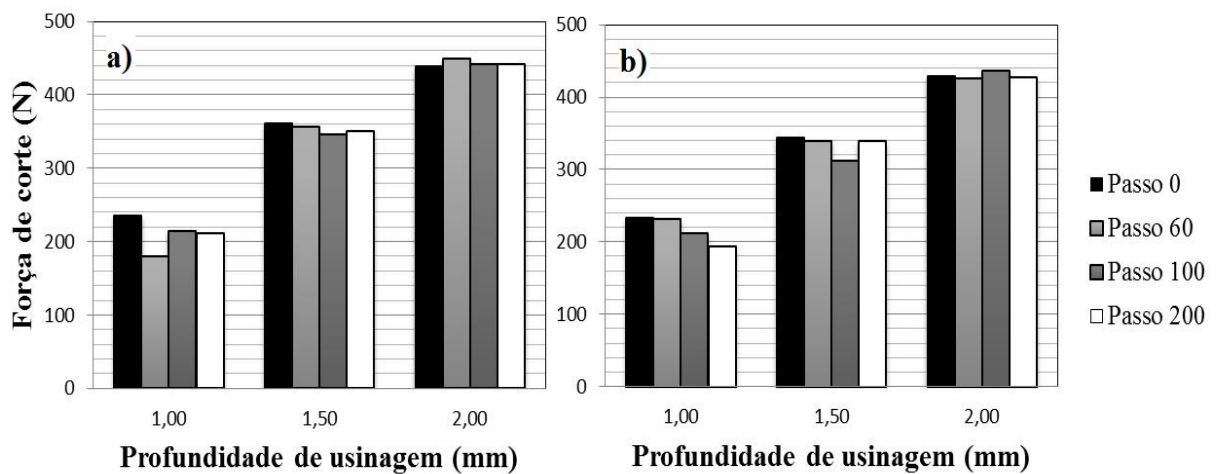


FIGURA 4.8 – Força de corte para os quatro tipos de ferramentas em função da profundidade de usinagem: (a) corte a seco e (b) MQF. ($v_c = 200$ m/min e $f = 0,10$ mm/volta).

Na FIG. 4.9, é possível notar que a força de avanço apresenta magnitudes menores que a força de corte para as duas condições de aplicação de fluido de corte (seco e MQF). Também é evidenciado o aumento da força de avanço com o aumento da profundidade de usinagem, tanto no corte a seco, quanto com MQF, sendo que as duas condições apresentaram forças semelhantes para as três profundidades de usinagem testadas. No corte a seco, as texturas produziram forças menores para profundidades de usinagem de 1,0 e 1,5 mm quando comparadas com o inserto sem textura, mas a ferramenta sem textura produziu força menor com $a_p = 2,0$ mm. Com o uso de MQF, as texturas com passo de 100 e 200 μm reduziram consideravelmente a força de avanço para as profundidades de usinagem de 1,0 e 1,5 mm quando comparadas com a ferramenta não texturizada, mas para $a_p = 2,0$ mm, as quatro ferramentas apresentaram valores de força muito próximos. Isto reforça a hipótese que as texturas armazenam o fluido de corte que consegue penetrar na interface cavaco/ferramenta sob profundidades de usinagem baixas e médias.

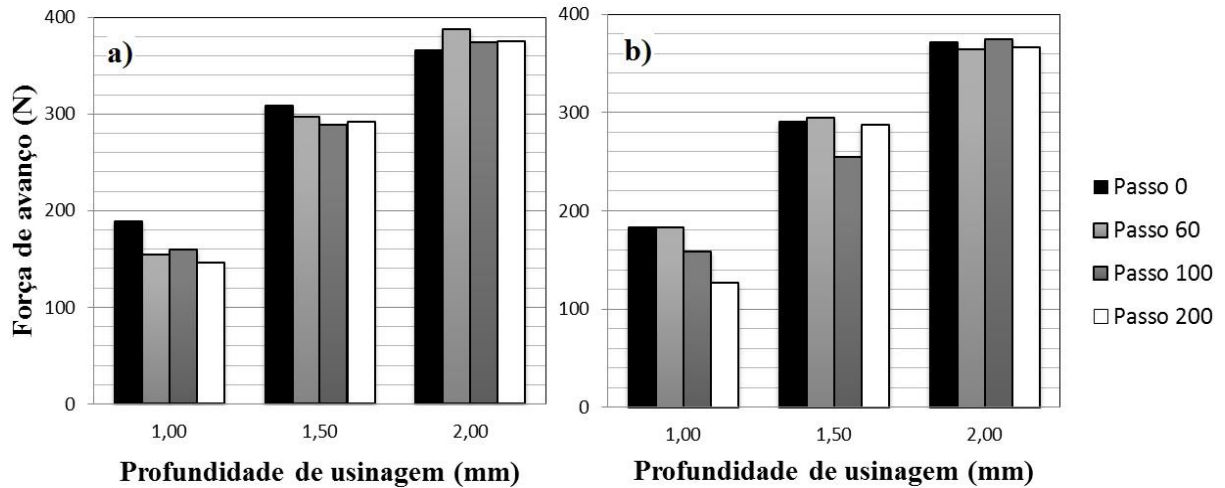


FIGURA 4.9 – Força de avanço para os quatro tipos de ferramentas em função da profundidade de usinagem: (a) corte a seco e (b) MQF. ($v_c = 200$ m/min e $f = 0,10$ mm/volta).

A FIG. 4.10 mostra que os valores de força passiva possuem módulos bem menores que as forças de corte e de avanço para os dois ambientes de corte. O aumento da profundidade de usinagem provoca o aumento na força passiva, sendo que no corte a seco as forças foram ligeiramente maiores do que com MQF para profundidades de usinagem de 1,5 e 2,0 mm. No corte a seco, as texturas apresentaram forças menores quando comparadas à pastilha sem textura para profundidades de usinagem de 1,0 e 1,5 mm. No corte com MQF, as texturas com passo de 100 e 200 μm reduziram a força passiva para profundidades de usinagem de 1,0, reforçando a hipótese de que o fluido de corte é armazenado nas texturas para a condição de corte leve.

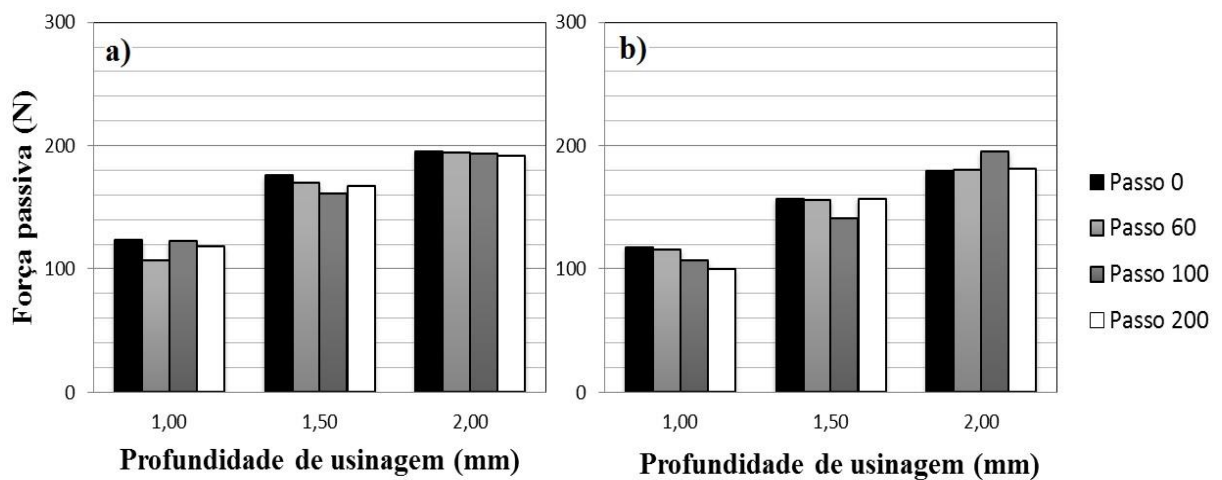


FIGURA 4.10 – Força passiva para os quatro tipos de ferramentas em função da profundidade de usinagem: (a) corte a seco e (b) MQF. ($v_c = 200$ m/min e $f = 0,10$ mm/volta).

4.1.4 Comparação entre o corte a seco e com MQF

De acordo com a TAB. 3.6, os testes 2, 5 e 8 (corte a seco) e os testes 12, 15 e 18 (corte com MQF) possuem os mesmos parâmetros de corte ($v_c = 200$ m/min, $f = 0,10$ mm/volta e $a_p = 1,5$ mm), permitindo uma comparação dos valores mínimos, médios (média aritméticas dos três valores obtidos) e máximos das forças de usinagem entre os sistemas a seco e de mínima quantidade de fluido de corte.

A FIG. 4.11 mostra este comparativo para a força de corte, indicando que para uma mesma textura, o sistema de MQF apresenta valores máximos, médios e mínimos menores do que o sistema a seco, mas com uma redução percentual menor que 7% para o valor médio da força. Este fato indica que a aplicação de fluido de corte não propiciou grandes reduções na força de corte. Além disso, o sistema MQF apresenta uma variação maior entre os valores obtidos do que o corte a seco, porque, provavelmente, o sistema MQF não consegue garantir a presença do fluido de corte de maneira uniforme ou de forma constante nas interfaces peça/ferramenta e cavaco/ferramenta para todos os testes avaliados.

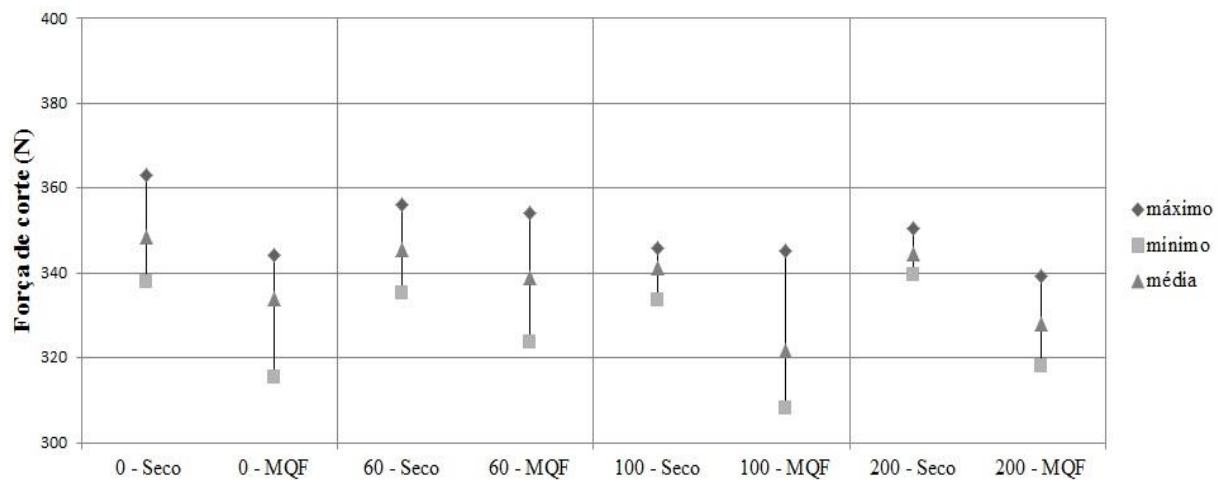


FIGURA 4.11 – Comparação entre a força de corte no sistema a seco e com MQF para velocidade de corte de 200 m/min, avanço de 0,10 mm/volta e profundidade de usinagem de 1,5mm.

A comparação para a força de avanço é apresentada na FIG. 4.12. O sistema MQF para uma mesma ferramenta apresenta valores médios e mínimos menores do que o sistema a seco, mas os valores máximos nas texturas com passo 60 e 100 μ m foram maiores do que o corte a seco. Na maioria dos casos a aplicação de fluido de corte não propiciou grandes reduções (menor que 8%) no valor médio da força de avanço. Novamente, o sistema de MQF apresenta uma variação maior nos valores obtidos do que o corte a seco, confirmando a

hipótese levantada no parágrafo anterior. Por fim, as amplitudes da força de avanço são sempre menores que a força de corte.

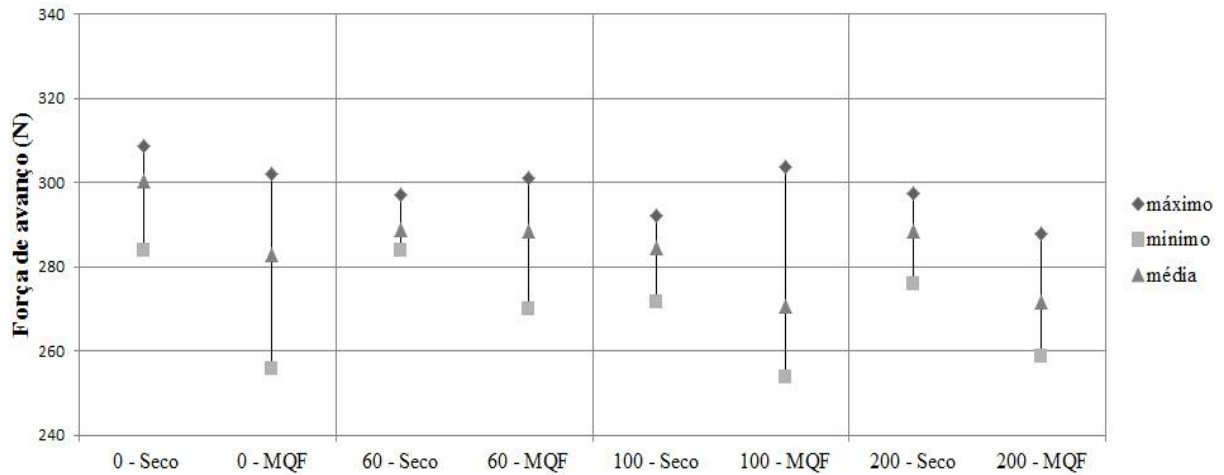


FIGURA 4.12 – Comparação entre a força de avanço no sistema a seco e com MQF para velocidade de corte de 200 m/min, avanço de 0,10 mm/volta e profundidade de usinagem de 1,5mm.

A FIG. 4.13 compara a influência do fluido de corte sobre a força passiva, evidenciando que o sistema MQF propicia valores máximos, médios e mínimos menores do que o sistema a seco, mas na maioria dos casos a redução percentual foi menor que 10 % para o valor médio da força. Portanto, a aplicação de fluido de corte não propicia grandes reduções na força passiva. O sistema MQF também apresenta uma variação maior nos valores obtidos do que o corte a seco, reforçando a hipótese levantada nos parágrafos anteriores. Por fim, as amplitudes da força passiva são sempre menores que a força de corte e a força de avanço.

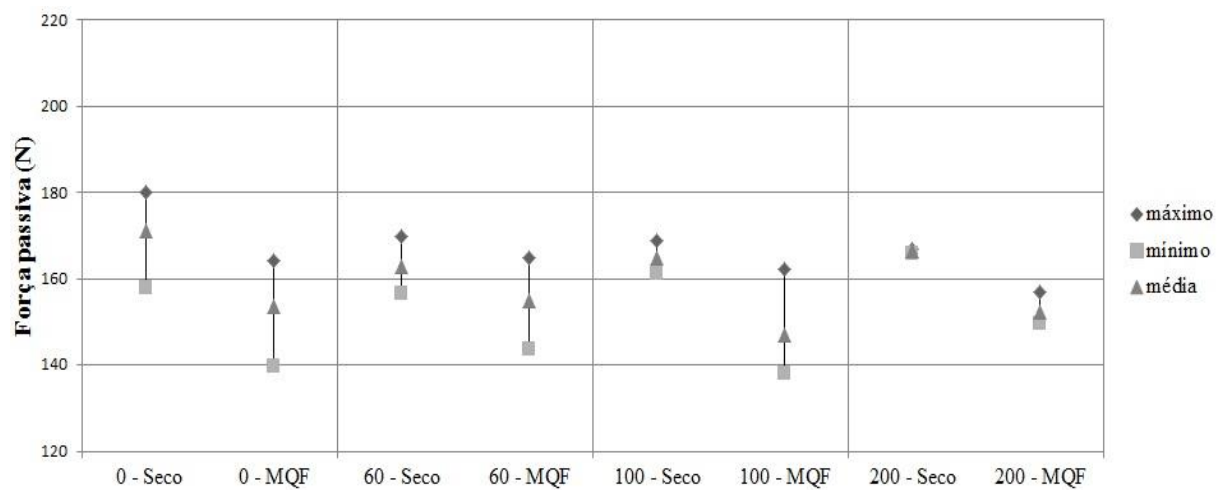


FIGURA 4.13 – Comparação entre a força passiva no sistema a seco e com MQF para velocidade de corte de 200 m/min, avanço de 0,10 mm/volta e profundidade de usinagem de 1,5mm.

4.2 Rugosidade da superfície torneada

Ao fim de cada teste indicado na TAB. 3.6, a rugosidade da superfície usinada foi medida três vezes. As FIG. 4.14 e 4.15 mostram, respectivamente, os valores médios do desvio aritmético médio (R_a) e da altura máxima do perfil (R_z) no corte a seco e no corte com MQF em função da velocidade de corte para valores constantes de avanço (0,10 mm/volta) e de profundidade de usinagem (1,5 mm).

A FIG. 4.14 revela que o aumento da velocidade de corte, em geral, não modificou consideravelmente o valor de R_a para as duas condições de corte, porém no corte a seco as ferramentas com passo de 0 e 200 μm promoveram melhor acabamento em todas as três velocidades de corte testadas, indicando que uma maior densidade de texturas prejudica a superfície final da peça usinada. Já no corte com MQF, a textura de passo de 200 μm apresentou uma tendência de melhora, pois reduziu levemente o valor de R_a para as três velocidades de corte quando comparada com às outras duas texturas e principalmente em relação à não texturizada.

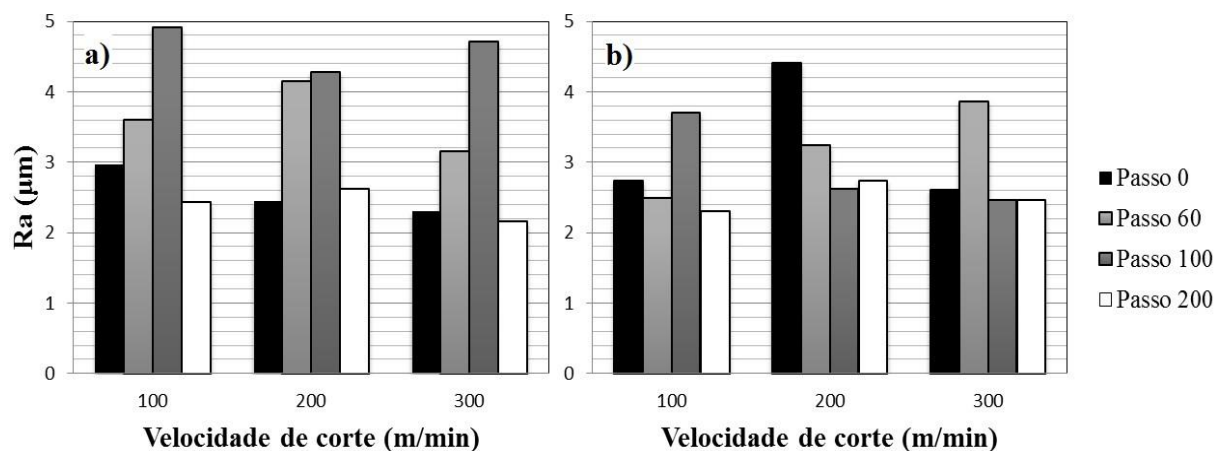


FIGURA 4.14 – Desvio aritmético médio para os quatro tipos de textura em função da velocidade de corte: (a) corte a seco e (b) MQF. ($f = 0,10$ mm/volta e $a_p = 1,5$ mm).

Como mostrado na FIG. 4.15, os valores de R_z apresentam a mesma tendência de R_a para os três valores de velocidade de corte avaliados nos dois ambientes, mas, como se trata do valor máximo do perfil, os valores de R_z possuem módulos bem maiores do que os desvios aritméticos médios.

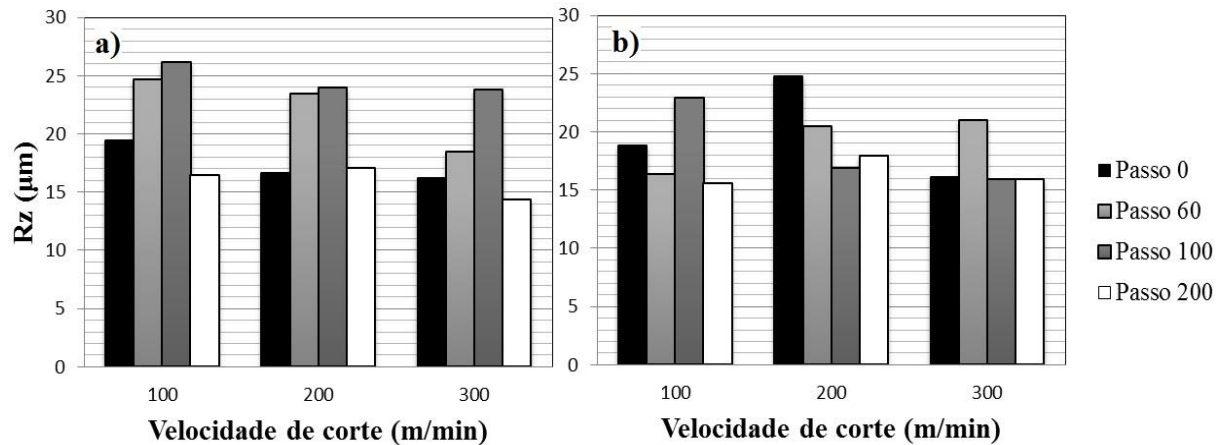


FIGURA 4.15 – Altura máxima do perfil para os quatro tipos de textura em função da velocidade de corte: (a) corte a seco e (b) MQF. ($f = 0,10$ mm/volta e $a_p = 1,5$ mm).

As FIG. 4.16 e 4.17 mostram, respectivamente, os valores de R_a e R_z no corte a seco e com MQF em função do avanço, para os valores constantes de velocidade de corte (200 m/min) e profundidade de usinagem (1,5 mm).

Na FIG. 4.16, é possível ver que no corte a seco o valor de R_a sofreu aumento com o crescimento do avanço, exceto para as texturas com passo de 100 e 200 μm . Este fato era esperado, pois para o torneamento com avanço menor que o raio de ponta da ferramenta (R_ξ) o valor de R_a é igual a $f^2/(31,2 \cdot R_\xi)$, ou seja, quanto maior o avanço, maior o valor de R_a no mesmo tipo de textura. Além disso, analisando-se o comportamento de R_a , é percebido que no corte a seco, os passos de 0 e 200 μm apresentaram melhor acabamento superficial para todos os três avanços. No corte com MQF não foi observado o mesmo comportamento que ocorreu no corte a seco para todas as texturas testadas, pois, provavelmente, a presença de fluido de corte sobre a superfície usinada pode ter interferido na medição da rugosidade. Também no corte com MQF, as texturas com espaçamento de 60 e 100 μm apresentaram R_a mais baixo para avanços de 0,05 e 0,15 mm/volta e a ferramenta não texturizada foi melhor para avanço de 0,10 mm/volta. Isto indica que, no corte com MQF, as texturas com maior densidade de cavidades geraram um acabamento melhor para baixa e alta taxa de remoção de material, indicando uma tendência de armazenamento do fluido de corte nas cavidades. No corte a seco este comportamento foi invertido para as mesmas taxas de remoção de material.

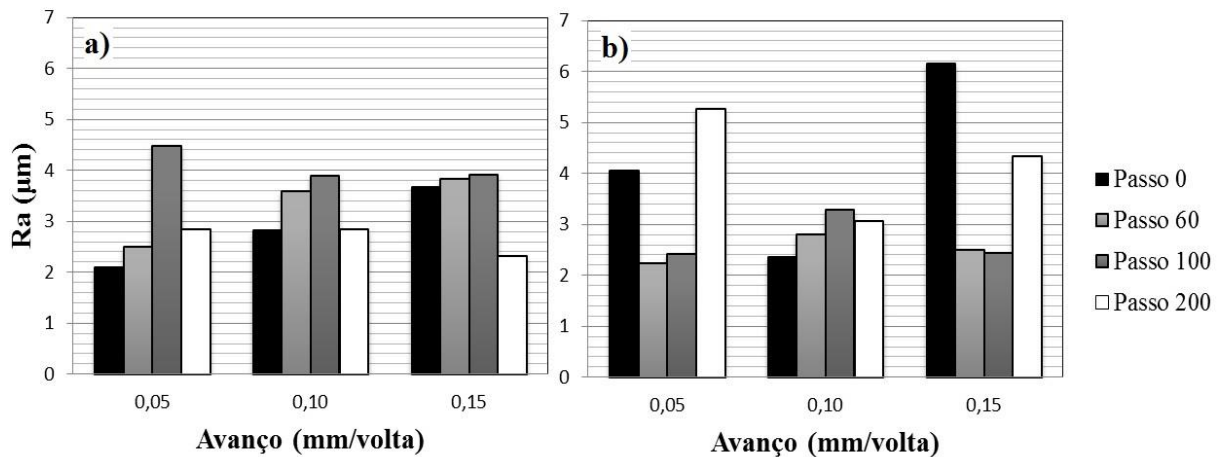


FIGURA 4.16 – Desvio aritmético médio para os quatro tipos de textura em função do avanço: (a) corte a seco e (b) MQF. ($v_c = 200$ m/min e $a_p = 1,5$ mm).

A FIG. 4.17 revela que os valores de R_z apresentam comportamento semelhante aos encontrados para R_a para uma mesma textura nos três valores de avanço e nas duas condições de lubrificação (seco e MQF), mas, como se trata do valor máximo do perfil, os valores de R_z possuem módulos bem superiores aos desvios aritméticos médios.

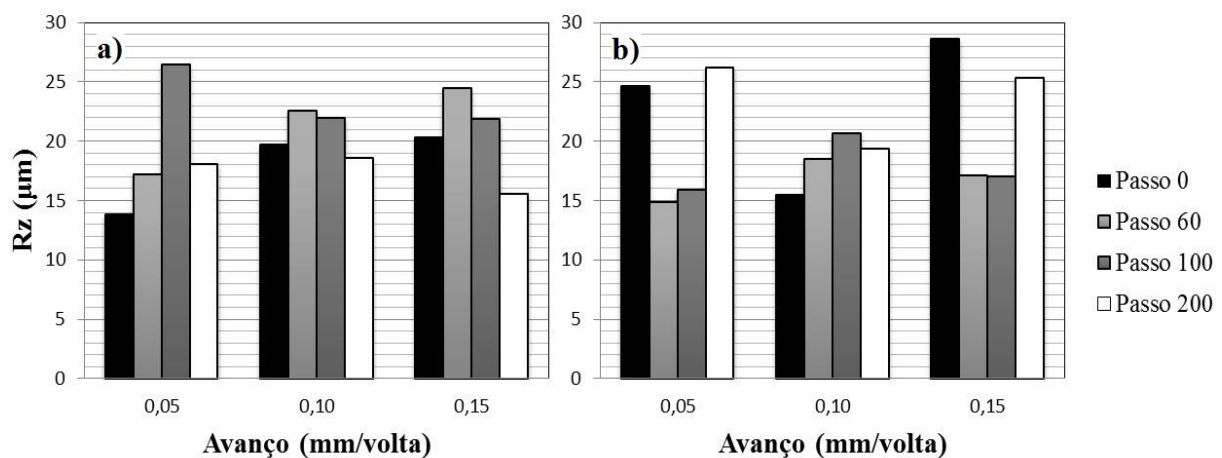


FIGURA 4.17 – Altura máxima do perfil para os quatro tipos de textura em função do avanço: (a) corte a seco e (b) MQF. ($v_c = 200$ m/min e $a_p = 1,5$ mm).

Os valores médios de R_a e R_z , no corte a seco e com MQF, em função da profundidade de usinagem, são representados, respectivamente, nas FIG. 4.18 e 4.19 para os valores constantes de velocidade de corte (200 m/min) e de avanço (0,10 mm/volta).

Como mostrado na FIG. 4.18, o valor de R_a praticamente não foi modificado para o mesmo tipo de textura e condição de corte em relação ao aumento da profundidade de usinagem, exceto para as texturas de passo de 60 e 100 µm no corte com MQF e $a_p = 1,5$ mm.

Mais uma vez, no corte a seco, os passos de 0 e 200 μm apresentaram melhor acabamento para todas as três profundidades de usinagem, indicando que estes dois tipos de ferramentas são mais indicadas no torneamento sem fluido de corte para obter o melhor acabamento da peça usinada dentro dos parâmetros de corte testados. Mas no corte com MQF, as ferramentas de passo de 0 e 200 μm apresentaram melhor R_a para $a_p = 1,5\text{ mm}$, enquanto as de passo de 60 e 100 μm foram melhor para $a_p = 2,0\text{ mm}$. Na profundidade de usinagem de 1,00 mm, as quatro texturas apresentaram valores similares.

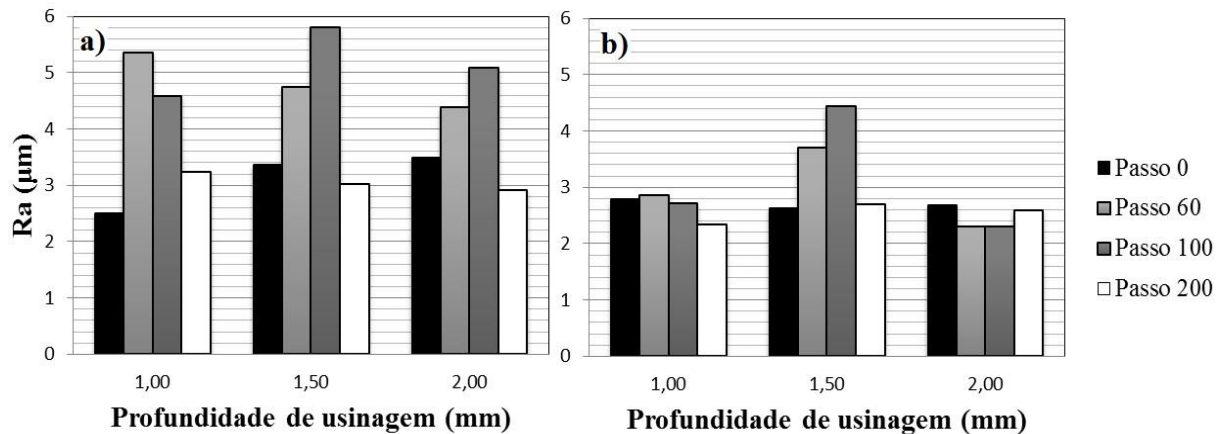


FIGURA 4.18 – Desvio aritmético médio para os quatro tipos de textura em função da profundidade de usinagem: (a) corte a seco e (b) MQF. ($v_c = 200\text{ m/min}$ e $f = 0,10\text{ mm/volta}$).

A FIG. 4.19 revela que o comportamento de R_a observado na FIG. 4.18 é repetido pelo R_z para os três valores de profundidade de usinagem e para os dois ambientes. Os valores de R_z possuem magnitudes bem superiores aos desvios aritméticos médios, pois se trata da altura máxima do perfil e não de uma média das alturas do perfil.

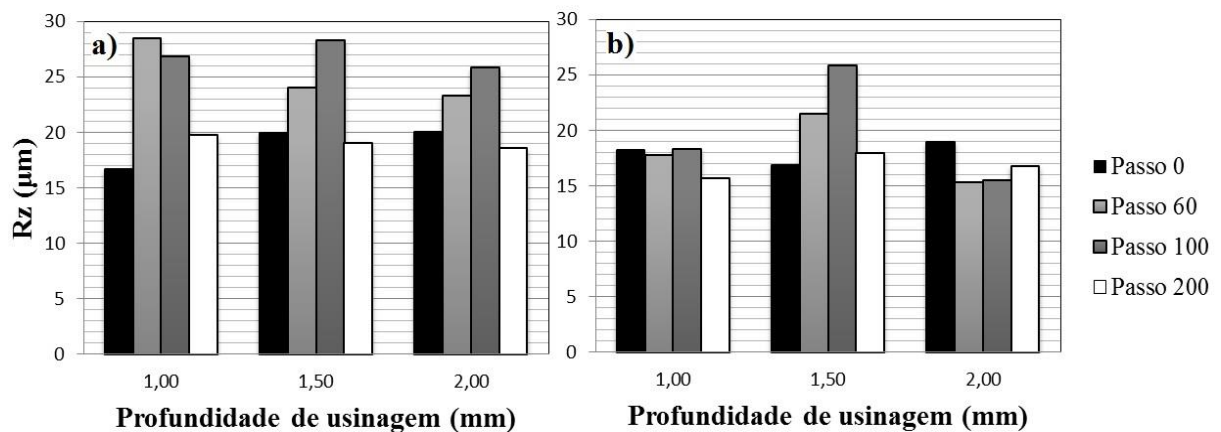


FIGURA 4.19 – Altura máxima do perfil para os quatro tipos de textura em função da profundidade de usinagem: (a) corte a seco e (b) MQF. ($v_c = 200\text{ m/min}$ e $f = 0,10\text{ mm/volta}$).

Também foi feita uma comparação entre o corte a seco e o corte com MQF utilizando os testes 2, 5 e 8 (corte a seco) e os testes 12, 15 e 18 (corte com MQF) da TAB. 3.6, que possuem os mesmos parâmetros de corte ($v_c = 200$ m/min, $f = 0,10$ mm/volta e $a_p = 1,5$ mm), possibilitando analisar os valores mínimos, médios (média aritmética dos três valores obtidos) e máximos de R_a e R_z .

Na FIG. 4.20, é apresentado o gráfico comparativo para R_a , indicando que, em geral, as duas condições de aplicação de fluido de corte possuem variações similares entre máximos e mínimos para uma mesma textura. O sistema MQF apresentou o valor máximo e médio maior do que o seco para a ferramenta sem textura, mas o sistema a seco apresentou valores máximos, médios e mínimos maiores para os inserts de textura com passo de 60 e 100 μm . Para a textura com espaçamento de 200 μm , os dois sistemas foram muito semelhantes e com baixa variação entre valores máximo e mínimo. Além disso, as ferramentas sem textura e com textura de 200 μm apresentam as menores médias de R_a para o corte a seco e com MQF, reforçando o que foi visto nas FIG. 4.14 a 4.19.

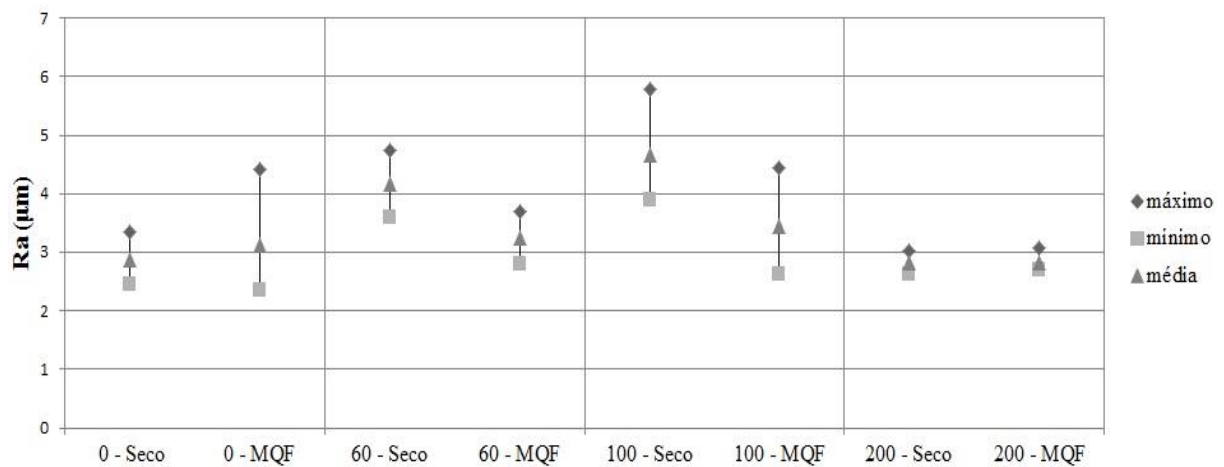


FIGURA 4.20 – Comparação entre R_a no sistema a seco e com MQF para: velocidade de corte de 200 m/min, avanço de 0,10 mm/volta e profundidade de usinagem de 1,5mm.

Por fim, a FIG. 4.21 indica que os valores comparativos de R_z possuem comportamento similar ao encontrado para R_a , mas com valores superiores aos de R_a . Entretanto, no corte com MQF, as ferramentas sem texturização e com passo de 100 μm apresentaram maior variação do que para R_a .

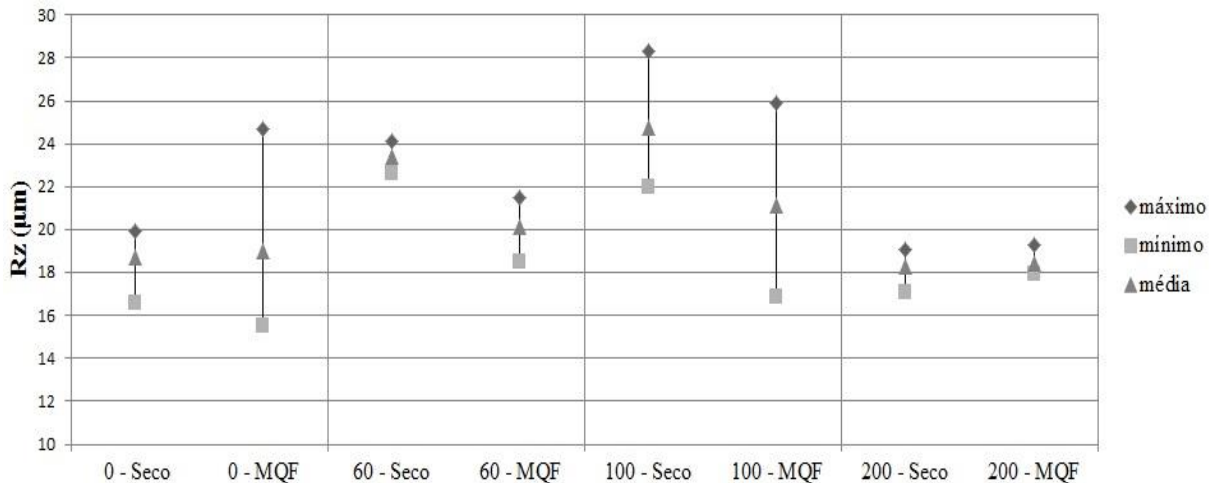


FIGURA 4.21 – Comparação entre R_z no sistema a seco e com MQF para: velocidade de corte de 200 m/min, avanço de 0,10 mm/volta e profundidade de usinagem de 1,5mm.

4.3 Cavacos produzidos

Como citado no capítulo anterior deste trabalho, também foram coletados e fotografados os cavacos produzidos após cada teste indicado na TAB. 3.6. Foram avaliados apenas os cavacos para os valores extremos dos parâmetros de corte analisados. Todos os cavacos coletados eram do tipo descontínuo, mas a alteração nos parâmetros de corte promoveu variações na forma. Este tipo de cavaco já era esperado, pois é o mais comum na usinagem de materiais frágeis, como ferro fundido cinzento, uma vez que este não é capaz de suportar grandes deformações sem fratura.

A variação na forma do cavaco para as duas condições de lubrificação em função do aumento da velocidade de corte é vista na FIG. 4.22. Seguindo a norma ISO 3685 (1993), pode-se classificar os cavacos do corte a seco e com MQF para $v_c = 100$ m/min como descontínuos (pedaços ou lascas). Já para a velocidade de corte de 300 m/min no corte a seco, considerando os quatro insertos testados, o cavaco possui forma de arco solto e no corte com MQF, as ferramentas texturizadas tendem a produzir um cavaco em fita curta, sendo que, na ferramenta sem textura, o cavaco possui forma de arco solto. O aumento da velocidade de corte contribuiu para o cavaco se tornar mais longo, pois o aumento de velocidade de corte eleva a temperatura de corte (calor), tornando o material mais dúctil. Além disso, para o maior valor de velocidade de corte testado, o uso do MQF combinado com as texturas provocou um aumento no raio de curvatura dos cavacos quando comparado com o corte a seco, indicando uma menor deformação sobre os mesmos.

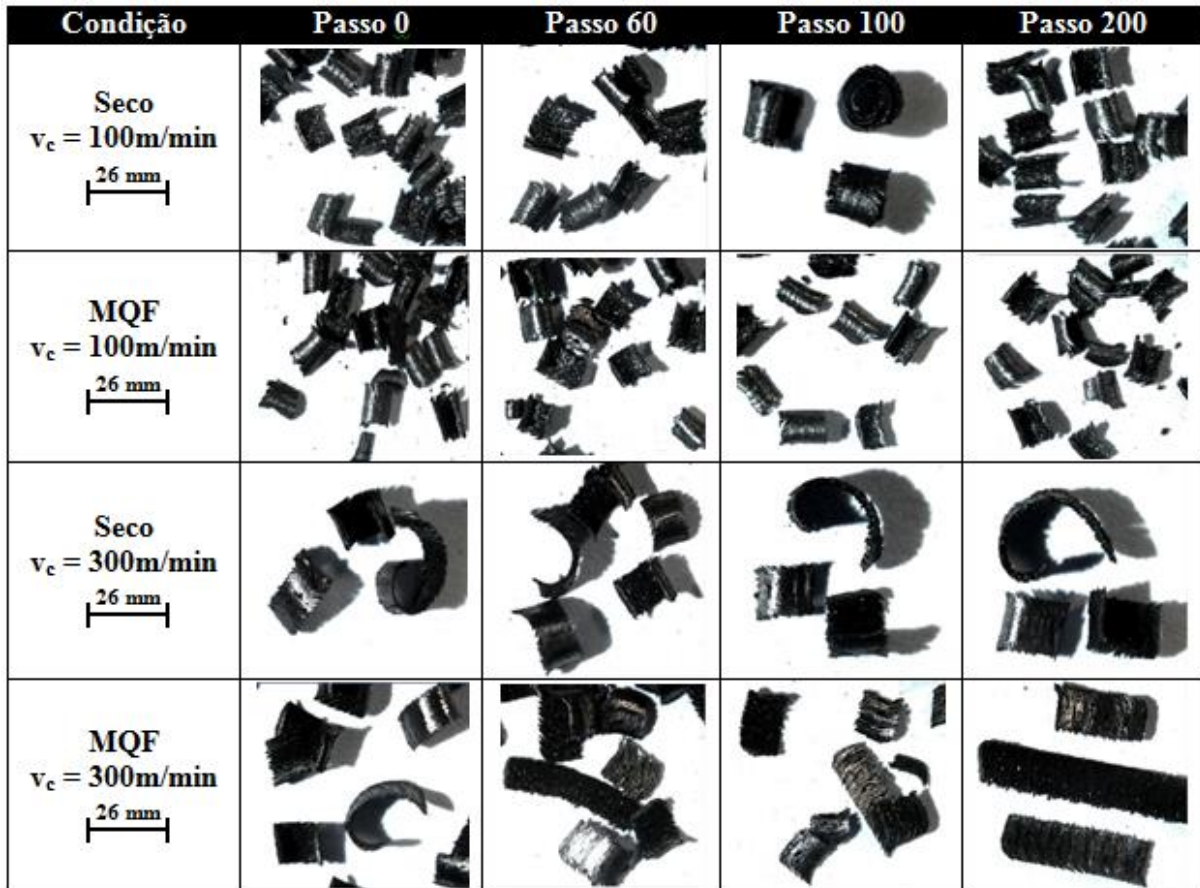


FIGURA 4.22 – Formas dos cavacos nos sistemas a seco e com MQF em função de velocidade de corte ($f = 0,10$ mm/volta e $a_p = 1,5$ mm).

Na FIG. 4.23, os cavacos do corte a seco e com MQF para avanço de $0,05$ mm/volta são classificados como fragmentados. Para avanço de $0,15$ mm/volta no corte a seco, considerando as quatro texturas, os cavacos possuem forma de arco solto e no corte com MQF todas as texturas tendem a produzir um cavaco em fita longo. Este fato não era esperado, pois o aumento do avanço tende a manter a forma do cavaco como fragmentado, uma vez que a espessura do cavaco aumenta e o torna mais quebradiço (mais rígido). O sistema MQF para o maior avanço produziu um aumento no raio de curvatura dos cavacos dos quatro tipos de texturas quando comparados aos do corte a seco, indicando uma menor deformação sobre os mesmos. Portanto, o aumento do avanço combinado com MQF produziu cavacos mais contínuos, ou seja, com menor quantidade de interrupções (ruptura brusca de material) na superfície da peça torneada, o que pode ter contribuído para manter os valores de R_a e R_z estáveis mesmo com o aumento do avanço, como mostrado nas FIG. 4.16 e 4.17.

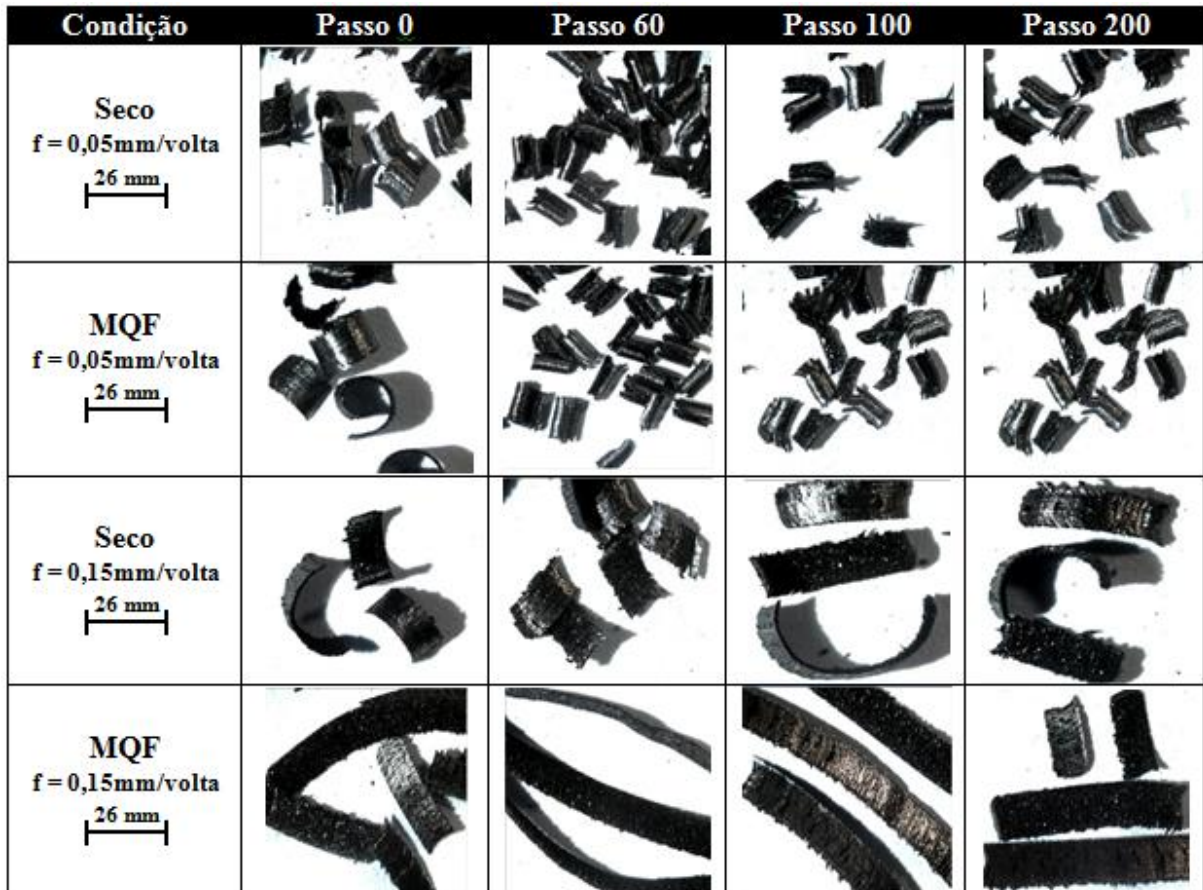


FIGURA 4.23 – Formas dos cavacos nos sistemas a seco e com MQF em função do avanço ($v_c = 200\text{ m/min}$ e $a_p = 1,5\text{ mm}$).

A variação na forma do cavaco para as duas condições de corte em função do aumento da profundidade de usinagem é vista na FIG. 4.24. Para profundidade de usinagem de 1,0 mm, tanto no corte a seco, quanto no corte com MQF, considerando todas as quatro texturas, o cavaco possui forma de fita curta. Mas para $a_p = 2,0\text{ mm}$ no corte a seco, o cavaco é em forma de arco solto e no corte com MQF, o cavaco permanece como fita curta. O aumento da profundidade de usinagem produziu cavacos mais largos para os dois ambientes, mas não produziu cavacos mais contínuos, como esperado inicialmente. Novamente, o uso do MQF para profundidade de usinagem maior provocou um aumento no raio de curvatura dos cavacos quando comparado com o corte a seco para a mesma profundidade de usinagem, indicando uma menor deformação sobre os mesmos.

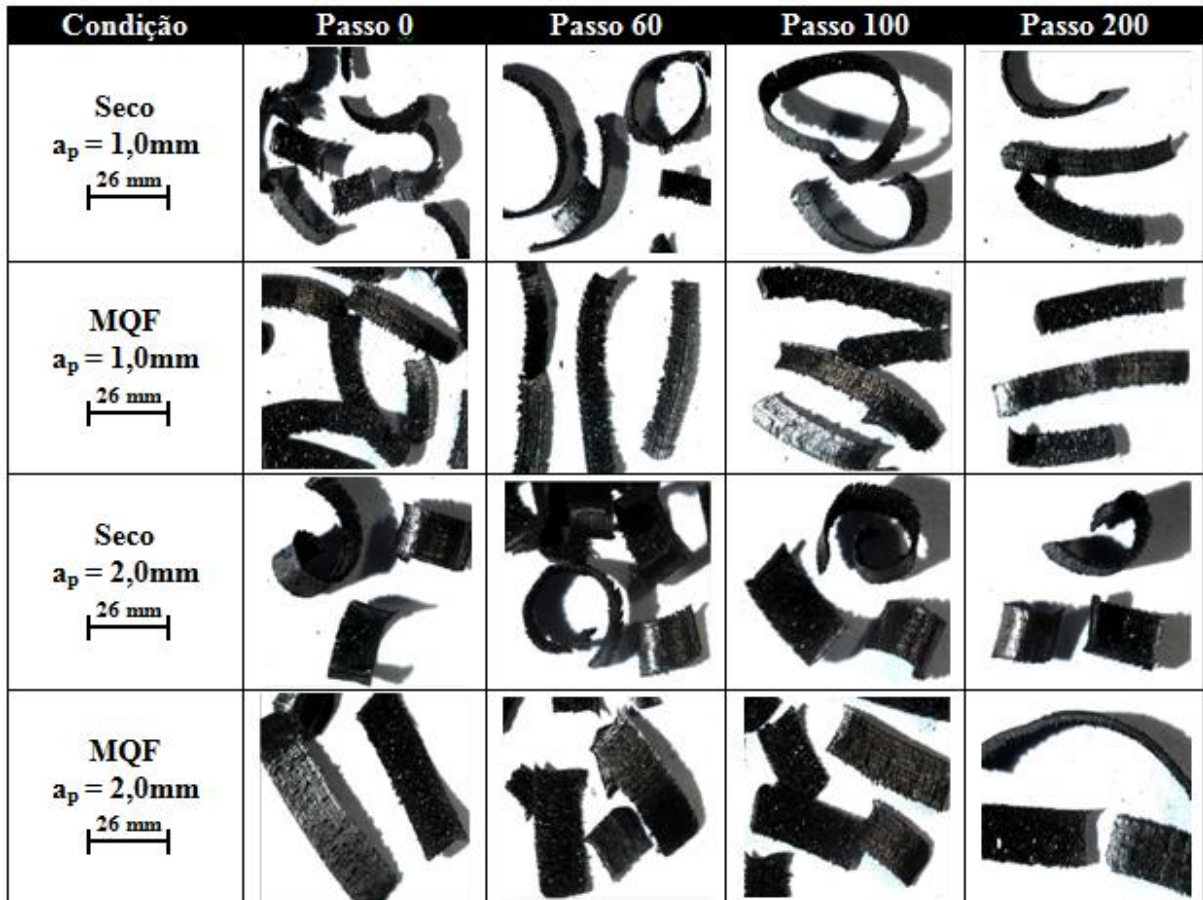


FIGURA 4.24 – Formas dos cavacos nos sistemas a seco e com MQF em função da profundidade de usinagem ($v_c = 200\text{ m/min}$ e $f = 0,10\text{ mm/volta}$).

4.4 Vida de ferramenta

Devido à limitação do número de arestas de corte, foi definido apenas um valor para cada parâmetro de corte no teste de vida: velocidade de corte de 200 m/min , avanço de $0,10\text{ mm/volta}$ e profundidade de usinagem de $1,5\text{ mm}$. Esta condição foi escolhida, pois, como citado anteriormente, é a condição que mais se repete dentre os testes definidos na TAB. 3.6, permitindo uma correlação com os dados de força e de rugosidade. A FIG. 4.25 mostra o desgaste de flanco máximo ($VB_{B_{\text{máx}}}$) para as quatro ferramentas ao longo do tempo no corte a seco. Neste teste, cada tipo de textura foi testada apenas uma vez, pois as pastilhas não apresentaram diferenças consideráveis no comportamento de desgaste, além da limitação de arestas de corte disponíveis. A figura mostra que, após 2 minutos de corte, as ferramentas sem texturização e com passo de $200\text{ }\mu\text{m}$ apresentam valores muito próximos entre si e as ferramentas 60 e 100 também apresentam valores próximos entre si. Após 4 minutos, o menor

desgaste é o da ferramenta com passo de 60 μm , enquanto as outras três apresentam valores similares. Após 6 minutos de corte, todos os insertos excederam o critério de vida adotado (500 μm), mas a ferramenta com passo de 200 μm sofreu um desgaste excessivo ($VB_{B_{\text{máx}}} = 825 \mu\text{m}$). A ferramenta sem texturização obteve o menor desgaste ($VB_{B_{\text{máx}}} = 506 \mu\text{m}$) entre os insertos testados após 6 minutos. Além disso, analisando a curva de desgaste, é possível perceber que as texturas não foram benéficas às ferramentas de corte e até aceleraram o fim da vida quando comparadas com a ferramenta sem textura, pois, considerando o desgaste linear, a ferramenta com espaçamento de 200 μm ultrapassou o critério de vida com menos de 5 minutos e as ferramentas com passo de 60 e 100 μm ultrapassaram $VB_{B_{\text{máx}}} = 500 \mu\text{m}$ próximo aos 5 minutos e 30 segundos. Durante a medição foi percebido que todas as ferramentas apresentaram aderência de material na aresta de corte após 2 e 4 minutos de torneamento, mas para 6 minutos só a ferramenta sem textura apresentou aderência na aresta de corte e até na superfície de folga principal.

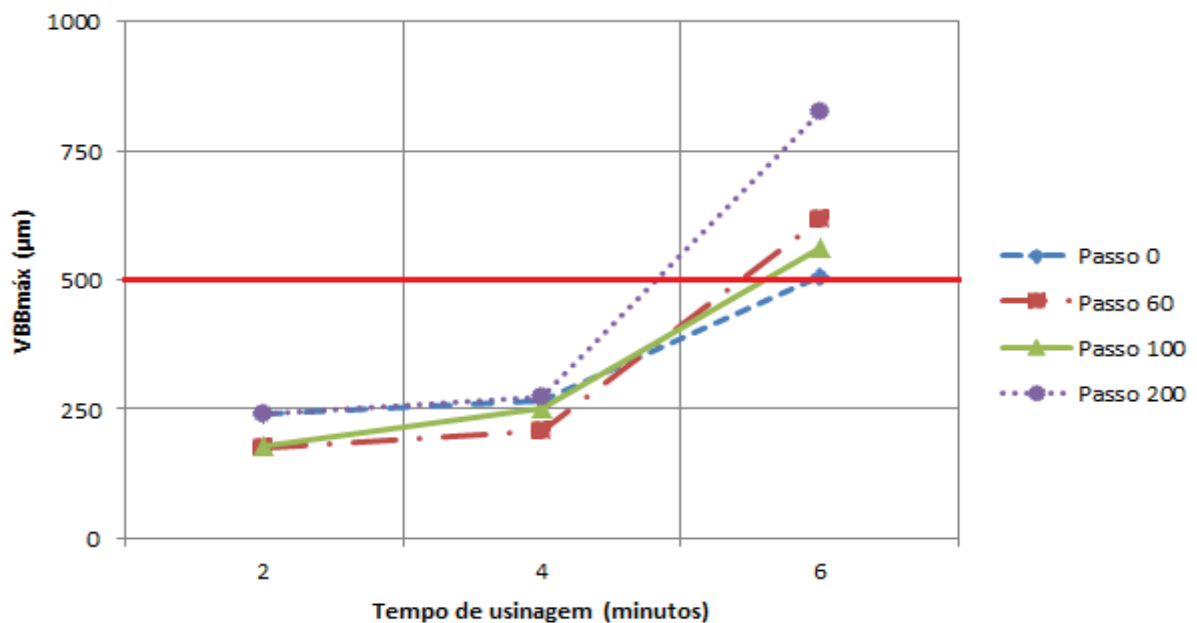


FIGURA 4.25 – Desgaste de flanco máximo em relação ao tempo de usinagem no corte a seco. ($v_c = 200 \text{ m/min}$, $f = 0,10 \text{ mm/volta}$ e $a_p = 1,5 \text{ mm}$).

No corte com MQF cada textura foi testada duas vezes, pois nos primeiros testes foram notadas diferenças consideráveis entre os comportamentos. A FIG. 4.26 apresenta o valor médio das duas medições do desgaste de flanco máximo para cada inserto. Com o uso da mínima quantidade de fluido de corte, todas as ferramentas aumentaram o tempo de vida quando comparadas com as utilizadas no corte a seco, pois provavelmente o fluido de corte

contribuiu para reduzir o atrito na interface peça/ferramenta (desgaste de flanco) através da sua característica lubrificante. Assim como no teste a seco, o inserto com passo de 200 μm apresentou o menor tempo de vida (quase 7 minutos), mesmo apresentando uma evolução de desgaste semelhante às outras ferramentas até os 6 minutos de torneamento, embora o aumento na vida tenha sido superior a 50% quando comparada com o corte sem fluido de corte. Ao contrário do corte a seco, a ferramenta sem textura apresentou a segunda pior vida (quase 8 minutos) no corte com MQF, mas ainda assim apresentou um aumento superior a 30% na vida quando comparada à ferramenta usada no corte a seco. A textura de 60 apresentou uma vida maior que 8 minutos e a textura de 100 uma vida de aproximadamente 8 minutos e 30 segundos, indicando um aumento de quase 50% na vida das duas quando comparadas às ferramentas usadas no corte a seco. Este fato indica que a presença de texturas com o uso de fluido de corte contribuiu para aumentar consideravelmente a vida do mesmo tipo de ferramenta. Além disso, a maior densidade de texturas na aresta de corte com o uso do MQF produz as maiores vidas entre as ferramentas testadas, porque provavelmente o aumento do número de cavidades por área aumenta a quantidade de fluido de corte armazenado na aresta de corte, aumentando assim a capacidade de lubrificação para reduzir o atrito entre ferramenta e peça. Considerando os parâmetros de corte testados no teste de vida e analisando as FIG. 4.11, 4.12, 4.13, 4.20 e 4.21 é possível perceber que o uso de MQF com a textura com passo de 100 μm produz vida da ferramenta mais longa, mas sem ocasionar um aumento considerável nas forças de usinagem e na rugosidade em relação aos outros tipos de insertos.

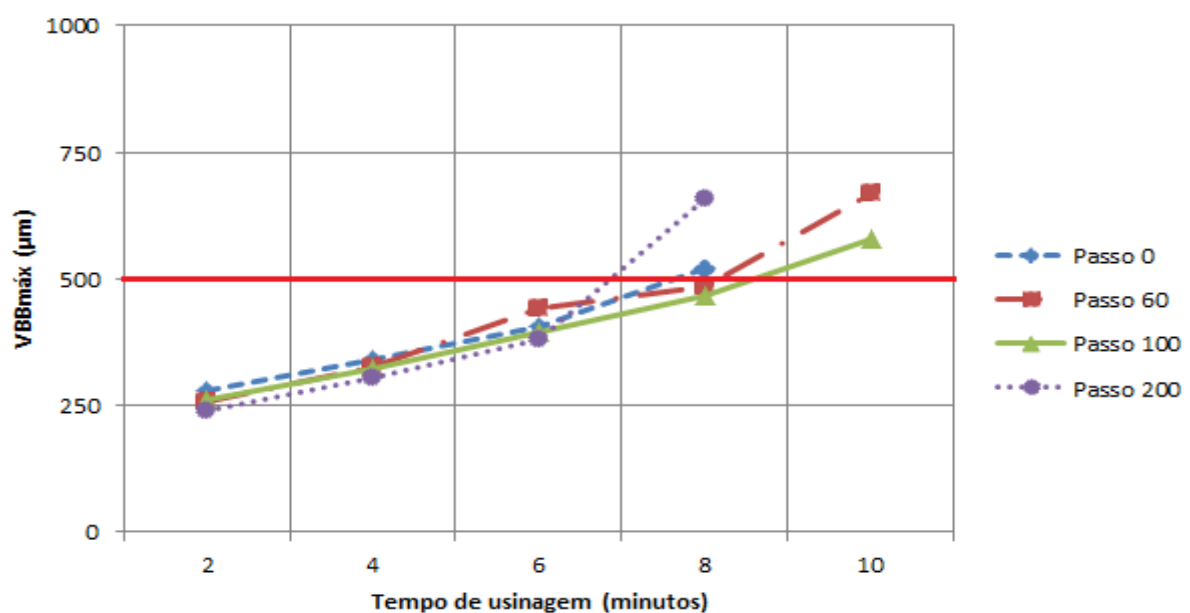


FIGURA 4.26 – Desgaste de flanco máximo em relação ao tempo de usinagem no corte com MQF. ($v_c = 200$ m/min, $f = 0,10$ mm/volta e $a_p = 1,5$ mm).

A FIG. 4.27 mostra a imagem do MEV de uma ferramenta com passo de 60 μm após 10 minutos de usinagem com MQF. Esta imagem mostra o desgaste de flanco e de cratera da ferramenta, sendo que é evidenciada a degradação das cavidades mais próximas à ponta da ferramenta e o entupimento com ferro fundido das cavidades remanescentes na aresta de corte desgastada. A figura também indica que o mecanismo de desgaste predominante é por difusão (transferência de material no nível atômico), pois as áreas desgastadas apresentam uma aparência lisa. Além disso, deve-se ressaltar que as imagens de MEV de todas as ferramentas usadas no teste de desgaste, tanto para o corte a seco, quanto com MQF, apresentaram as mesmas características vistas na FIG 4.27.

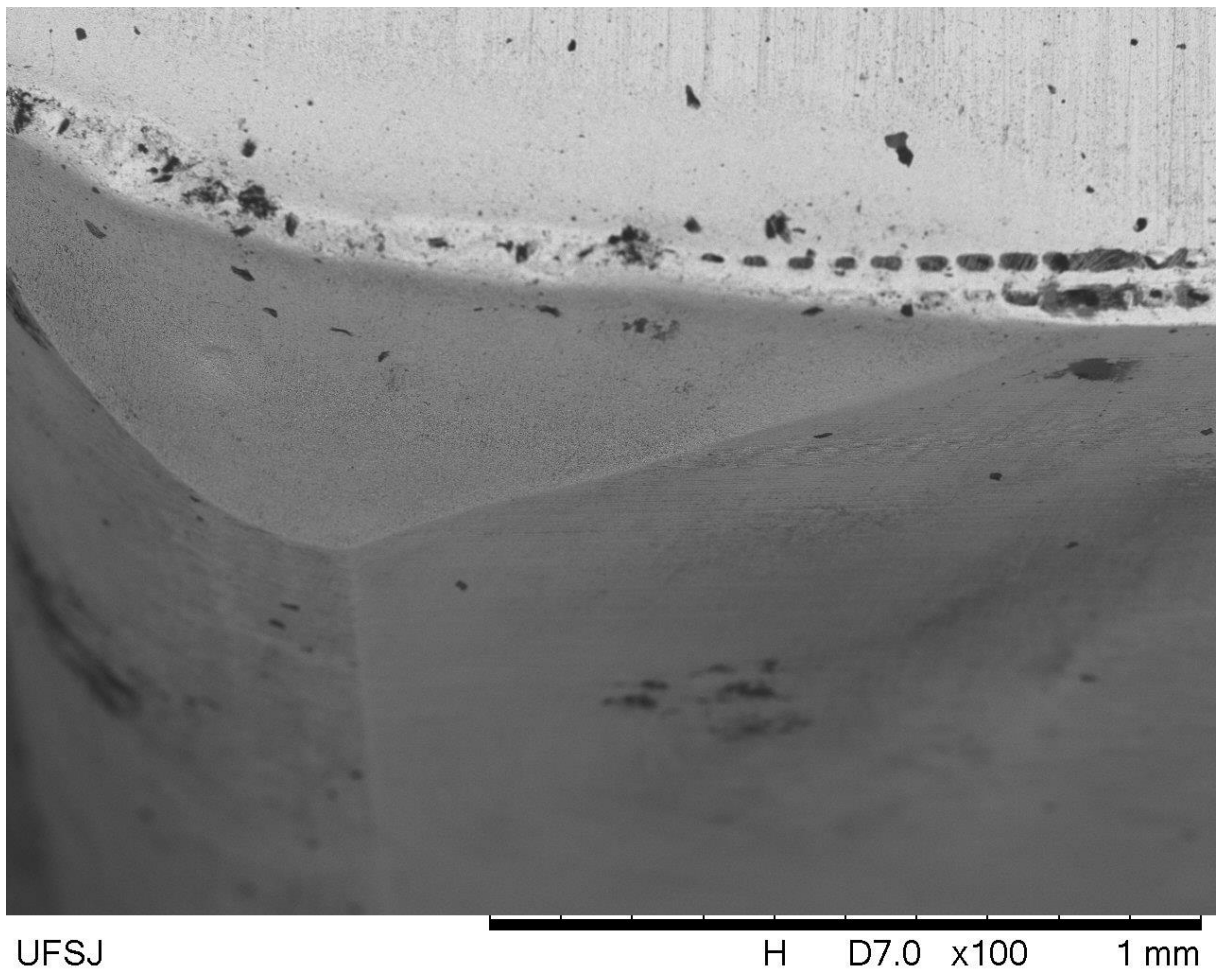


FIGURA 4.27 – Imagem do MEV com ampliação de 100x da aresta de corte desgastada da ferramenta com passo de 60 μm após 10 minutos de usinagem com o uso de MQF.

5 ANÁLISE DOS RESULTADOS

Este capítulo tem como objetivo discutir e compreender os resultados apresentados no capítulo anterior por meio de sua análise, permitindo um melhor entendimento da influência das quatro texturas produzidas sobre as forças de usinagem, a rugosidade da peça, as formas dos cavacos e a vida das ferramentas.

5.1 Forças de usinagem

Baseado nos testes de força realizados, é possível constatar que, em geral, o aumento da velocidade de corte provocou o aumento das três componentes da força de usinagem para as duas condições de lubrificação (seco e MQF), sendo a força de corte a de maior módulo entre as três componentes. O aumento desta força com o aumento da velocidade de corte não era esperado, pois a pressão específica de corte diminuiu com o aumento da temperatura provocado pelo aumento de velocidade de corte. A hipótese levantada para justificar o comportamento encontrado nos testes é ligada à natureza frágil do ferro fundido cinzento e ao ângulo de saída da ferramenta extremamente negativo (-26°), ocasionado pelo chanfro da aresta de corte (-20°) e pelo suporte ferramenta (-6°). No corte a seco as texturas só promoveram uma leve redução nas três forças para a velocidade de corte de 200 m/min, sendo que para outras velocidades de corte o desempenho da ferramenta sem textura foi igual ou superior ao desempenho das ferramentas com textura. Portanto, nenhuma textura apresentou uma tendência clara para redução das forças. Já o uso de MQF produziu forças ligeiramente menores que o corte a seco apenas para velocidades de corte baixas e intermediárias, indicando que para maior velocidade de corte o fluido não penetrou adequadamente na zona de corte. Além disso, as texturas apresentaram uma ligeira redução das forças para baixa e alta taxa de remoção de material, mas nenhuma textura com cavidades apresentou uma tendência clara para redução das forças de usinagem. Portanto, o uso do sistema MQF combinado com a presença de cavidades deve ser restrito para condições de usinagem leve.

O aumento no avanço gerou um aumento nas três forças de usinagem para os dois ambientes, sendo novamente a força de corte a de maior magnitude entre as componentes. O

aumento da força de corte com o avanço ocorreu porque a redução da pressão específica de corte acontece em menor proporção do que o aumento da área da seção de corte. No corte a seco, as texturas não promoveram redução das forças de usinagem em relação à ferramenta não texturizada. No corte com MQF, as forças foram semelhantes às do corte a seco, mas nesta condição as texturas com passo de 60 e 200 μm apresentaram reduções nas forças, principalmente para avanços baixos e altos. Portanto, o uso de MQF vinculado às cavidades não propiciou uma tendência clara de redução da força de usinagem para maiores valores de avanço testados, indicando, que o fluido de corte não conseguiu penetrar de maneira eficiente na interface ferramenta/peça para reduzir o atrito (lubrificação) nas condições de corte mais severas.

Observou-se também que o aumento na profundidade de usinagem produziu um aumento nas três forças de usinagem para os dois ambientes, sendo a força de corte a de maior magnitude entre as componentes. A força de corte aumentou com a profundidade de usinagem, pois a redução da pressão específica de corte é menor que o aumento da área da seção de corte. No corte a seco, as cavidades não promoveram redução das forças de usinagem em relação à ferramenta não texturizada. No sistema de mínima quantidade de fluido, as forças foram semelhantes às do corte a seco, mas as texturas produziram ligeiras reduções nas forças para profundidades de usinagem baixas e intermediárias quando comparadas ao inserto não texturizado, mas nenhuma textura com cavidades apresentou uma tendência clara para redução da força de usinagem. Assim sendo, o uso do sistema MQF combinado com as cavidades não provocou diminuição clara das componentes da força de usinagem para o maior valor de profundidade de usinagem testado, indicando novamente a dificuldade de penetração do fluido de corte entre a interface ferramenta/peça nesta situação.

5.2 Rugosidade da superfície torneada

Para todos os parâmetros de usinagem e ambientes testados, os valores de R_a e R_z apresentaram comportamentos análogos, diferenciando-se apenas pelo maior módulo da altura máxima do perfil.

Na maioria dos casos, o aumento da velocidade de corte não produziu modificações consideráveis na rugosidade da peça. No corte a seco, as ferramentas sem texturização e com passo de 200 μm produziram as menores rugosidades para as três velocidades de corte, indicando que, para o corte sem fluido de corte, o uso de médias ou altas

densidades de cavidades não é benéfico para o acabamento final da peça usinada. No corte com MQF, as rugosidades obtidas apresentaram valores similares aos do corte a seco, sendo que a apenas sob velocidades de corte baixa e intermediária a textura com passo de 200 μm melhorou ligeiramente o acabamento em comparação com a ferramenta sem textura, ou seja, a presença de fluido de corte nas cavidades contribuiu pouco e apenas em condições de corte leves.

O crescimento do avanço aumentou a rugosidade do corpo de prova no corte a seco para as texturas com espaçamento de 0 e 60 μm . No corte a seco as ferramentas sem texturização e com passo de 200 μm produziram as menores rugosidades entre todas as ferramentas, considerando os três avanços, confirmando que, para o corte sem fluido de corte, o uso de muitos furos na aresta de corte não é benéfico para o acabamento final da peça, ou seja, a baixa densidade de material ressolidificado (em volta das cavidades) na aresta de corte chanfrada danificou menos a superfície torneada da peça. O corte com MQF alterou o comportamento citado para o corte a seco, porque a presença de fluido de corte sobre a superfície usinada após o torneamento pode ter interferido na medição do R_a . Nesta condição de corte, as rugosidades apresentaram valores próximos aos do corte a seco, sendo que as texturas com passo de 60 e 100 μm obtiveram uma redução considerável na rugosidade para avanços baixos e altos, indicando que o fluido de corte foi armazenado nas cavidades para estas condições de corte.

O aumento da profundidade de usinagem não ocasionou mudanças consideráveis nos valores de rugosidade para uma mesma textura e uma mesma condição de corte. No corte a seco, os insertos sem textura e com passo de 200 μm produziram as menores rugosidades entre todas as texturas para as três profundidades de usinagem, indicando que, para esta condição de corte, o uso de médias ou altas densidades de textura não é benéfico para o acabamento final da peça. Ao contrário do observado anteriormente, o uso do MQF contribuiu para reduzir levemente os valores de rugosidade em relação aos valores obtidos no corte a seco.

Portanto, é possível perceber que as pastilhas com espaçamento de 0 e 200 μm possuem desempenho similar sobre a rugosidade da peça, assim como as pastilhas de passo 60 e 100 apresentam comportamentos semelhantes. Esta tendência provavelmente está ligada à densidade de cavidades presentes em uma mesma área da aresta chanfrada. Além disso, para o corte a seco, os insertos de passo 0 e 200 são os mais indicados para obter uma superfície final melhor, pois a alta densidade de material ressolidificado (em volta das cavidades) na aresta de corte chanfrada danificou mais a superfície torneada da peça.

Deve-se ressaltar que todos os valores de R_a obtidos neste estudo não se aproximaram dos valores teóricos indicativos ($R_a = f^2/(31,2.R_\xi)$) para um torneamento com avanço menor que o raio de ponta da ferramenta (R_ξ), indicando que os valores reais de R_a foram acrescidos provavelmente por outros fatores como: flexões geradas pelos esforços de usinagem, vibrações durante o corte, ângulo de saída extremamente negativo (aumento da força de usinagem) e problemas de alinhamento da peça no torno.

5.3 Cavacos produzidos

Os cavacos coletados após o teste de força são do tipo descontínuo (pedaços ou lascas) para valores de velocidade de corte e avanço baixos, tanto no corte a seco quanto no corte com MQF. Para velocidade de corte e avanço altos, o corte sem fluido de corte produz cavacos em forma de arco solto, enquanto a mínima quantidade de fluido de corte alonga os cavacos para o formato de fita curto com aumento da velocidade de corte ou para o formato de fita longa com o aumento do avanço. Sob profundidade de usinagem baixa, o corte a seco e MQF produzem cavacos em forma de fita curta, mas sob profundidade de usinagem elevada o corte sem fluido produz arcos soltos e o MQF mantém a forma de fita curta.

O uso do MQF com o aumento de qualquer um dos parâmetros de corte testados produz cavacos com maior raio de curvatura do que os gerados no corte a seco, considerando os mesmos valores dos parâmetros, indicando que, no corte com fluido de corte, o cavaco sofre menores deformações, provavelmente devido à redução do atrito na interface cavaco/ferramenta. Além disso, independentemente do ambiente e dos valores dos parâmetros de corte utilizados, o tipo de textura não influenciou no formato do cavaco.

5.4 Vida da ferramenta

Quanto ao desgaste de flanco máximo das ferramentas testadas, é possível perceber que no corte a seco o uso de texturas diminuiu sua vida, pois, provavelmente, a presença de cavidade e material ressolidificado acelerou os mecanismos de desgaste sobre a aresta de corte chanfrada. Por isso, no corte sem fluido, a ferramenta sem texturização é recomendada. Já o uso do MQF permitiu aumentar a vida dos quatro tipos de ferramentas, sendo este aumento mais relevante para os insertos texturizados a *laser*, pois o ganho sobre o

tempo de vida é maior que 50% quando comparado ao corte sem fluido. Este fato reforça a hipótese de armazenamento do fluido de corte nas cavidades produzidas a *laser*, porque a presença do fluido diminui o atrito na interface peça/ferramenta, reduzindo a taxa de crescimento do desgaste da ferramenta. Além disso, para os parâmetros utilizados e considerando os dados levantados no capítulo anterior, a ferramenta com passo de 100 μm obteve maior vida dentre as arestas de corte testadas, sem provocar aumento nas forças de usinagem ou perda considerável na qualidade superficial da peça produzida no torneamento.

6 CONCLUSÕES

A análise dos resultados apresentada neste estudo permite as seguintes conclusões:

- Para os dois ambientes testados nenhum tipo de textura apresentou uma tendência clara de redução das forças de usinagem.
- A natureza frágil do ferro fundido cinzento e o ângulo de saída da ferramenta extremamente negativo contribuíram para aumentar a força de corte com o aumento da velocidade de corte.
- Em todos os parâmetros de corte testados no torneamento a seco, as ferramentas com passo de 0 e 200 μm produziram melhor acabamento na peça usinada, indicando que a presença de muitas cavidades e materiais ressolidificados na aresta de corte sem o fluido de corte aumentou o dano à superfície final da peça. Já no corte com MQF nenhum tipo de ferramenta apresentou uma tendência clara de melhora do acabamento.
- O uso de fluido de corte com parâmetros de corte mais severos produziu cavacos com menores deformações (maior raio de curvatura), pois, provavelmente, a ação lubrificante do fluido de corte reduziu o atrito na interface cavaco/ferramenta (superfície de saída).
- O uso do sistema MQF prolongou a vida da ferramenta em pelo menos 30% para todas as ferramentas testadas, podendo chegar a mais de 50% de aumento da vida para ferramentas com maiores densidades de cavidades (Passo de 60 e 100 μm). A textura com passo de 100 μm com MQF é recomendada para se obter maior tempo de vida entre as ferramentas testadas, mas sem provocar aumento nas forças de usinagem ou na rugosidade da peça.
- O uso de ferramentas texturizadas a *laser* não é justificável no corte a seco, pois estas texturas não melhoram a rugosidade da peça e não reduzem as forças de usinagem e os desgastes das ferramentas quando comparadas com o inserto sem cavidades.

7 SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS

Em função do elevado número de variáveis envolvidas neste estudo e do número baixo de ferramentas de corte disponíveis para teste, existem aspectos que não foram desenvolvidos e que poderiam ser investigados de forma mais aprofundada, tais como:

- Medir a temperatura de corte em função dos parâmetros de usinagem e para as duas condições de lubrificação (seco e MQF) para avaliar o efeito das texturas e do fluido de corte sobre a redução ou não da temperatura durante o torneamento do ferro fundido cinzento.
- Avaliar o desgaste de flanco com outros parâmetros de corte e avaliar o desgaste de cratera para validar ou não o benefício da textura com espaçamento de 100 μm sobre a vida de ferramenta no corte com MQF.
- Analisar o comportamento das forças de usinagem com o uso de ferramentas desgastadas para comparar com o comportamento encontrado para as ferramentas novas e avaliar a influência das texturas gastas ao longo da operação de torneamento.
- Variar a profundidade da cavidade produzida para avaliar o efeito deste parâmetro sobre a força de usinagem e o desgaste da ferramenta. Além disso, utilizar cavidades produzidas por eletroerosão como comparativo com as cavidades usinadas a *laser*.

Estes estudos poderiam levar a uma melhor racionalização no processo de torneamento de ferro fundido cinzento com o uso de ferramentas texturizadas a *laser* na aresta de corte chanfrada.

ABSTRACT

Worldwide is common to use the turning operation in manufacturing, so many studies are conducted to improve this process. Currently, there is a great focus on tools with textured surfaces artificially to increase their performance in various machining processes. This paper investigates a gray cast iron turning process with carbide inserts that have undergone laser texturing (Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation) in the chamfered cutting edge, and produced three variations of textures (semispherical cavities). Also used was a group of beveled insert without texturing for comparison with the modified inserts. The experiments were divided into two groups: dry turning and turning using the minimum quantity of cutting fluid system (MQF). This work evaluates the variation tool texture on: the machining force, the roughness of the turned part, the chip produced and flank wear of the inserts. The results indicate that the dry cutting using textures is not advantageous for the reduction of machining force and roughness. The textures are only interesting with using MQF system, but only for some values of cutting speed, feed and depth of cut. Furthermore, the use of the minimum quantity of cutting fluid provides a significant increase in the life of all tested tools, especially for the texture with the largest number of cavities. But this reduction of wear is not linked to a reduction in machining force or surface roughness of the piece.

Keywords: Laser texturing; Turning; Minimum quantity of cutting fluid; Machining force; Roughness; Tool life.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABRÃO, A. **Processos não convencionais de usinagem**. Apostila do curso de Usinagem Não Convencional da Universidade Federal de Minas Gerais: [s.n.].

ARROYO, J. M. **Investigação sobre o uso da texturização a laser na preparação da superfície a ser recoberta em ferramentas de metal duro para fresamento**. Tese de Doutorado em Engenharia Mecânica—Campinas - SP: Universidade Estadual de Campinas, 2009.

BOUBEKRI, N.; SHAIKH, V.; FOSTER, P. R. A technology enabler for green machining: minimum quantity lubrication (MQL). **Journal of Manufacturing Technology Management**, v. 21, n. 5^a, p. 556–566, 2010.

BRINKSMEIER, E.; RIEMER, O.; TWARDY, S. Tribological behavior of micro structured surfaces for micro forming tools. **International Journal of Machine Tools and Manufacture**, v. 50, n. 4, p. 425–430, abr. 2010.

BRUZZONE, A. A. G. et al. Advances in engineered surfaces for functional performance. **CIRP Annals - Manufacturing Technology**, v. 57, n. 2, p. 750–769, jan. 2008.

CHANG, W. et al. Investigation of microstructured milling tool for deferring tool wear. **Wear**, v. 271, n. 9-10, p. 2433–2437, jul. 2011.

CORREIA, A. E.; DAVIM, J. P. Efeito da lubrificação mínima (MQL - minimal quantity of lubricant) na maquinagem de uma liga de alumínio. **Revista da Associação Portuguesa de Análise Experimental de Tensões**, v. 13, p. 27–34, 2006.

DEEPAKKUMAR, P.; SADAIAH, M. Investigations on Finish Turning of AISI 4340 Steel in Different Cutting Environments by CBN Insert. **International Journal of Engineering Science and Technology (IJEST)**, v. 3, n. 10^a, p. 7690–7706, 2011.

DHAR, N. R. et al. The influence of minimum quantity of lubrication (MQL) on cutting temperature, chip and dimensional accuracy in turning AISI-1040 steel. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 171, n. 1, p. 93–99, jan. 2006.

DHAR, N. R.; KAMRUZZAMAN, M.; AHMED, M. Effect of minimum quantity lubrication (MQL) on tool wear and surface roughness in turning AISI-4340 steel. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 172, n. 2, p. 299–304, fev. 2006.

DUMITRU, G. et al. Laser processing of hardmetals: Physical basics and applications. **International Journal of Refractory Metals and Hard Materials**, v. 23, n. 4-6, p. 278–286, jul. 2005.

ENOMOTO, T. et al. Highly wear-resistant cutting tools with textured surfaces in steel cutting. **CIRP Annals - Manufacturing Technology**, v. 61, n. 1, p. 571–574, 2012.

ENOMOTO, T.; SUGIHARA, T. Improving anti-adhesive properties of cutting tool surfaces by nano-/micro-textures. **CIRP Annals - Manufacturing Technology**, v. 59, n. 1, p. 597–600, 2010.

EVANS, C. J.; BRYAN, J. B. “Structured”, “Textured” or “Engineered” Surfaces. **CIRP Annals - Manufacturing Technology**, v. 48, n. 2, p. 541–556, jan. 1999.

FERRARESI, D. **Fundamentos da Usinagem dos Metais**. São Paulo: Blucher, 1970.

FRANZEN, V. et al. Textured surfaces for deep drawing tools by rolling. **International Journal of Machine Tools and Manufacture**, v. 50, n. 11, p. 969–976, nov. 2010.

HADAD, M.; SADEGHI, B. Minimum quantity lubrication-MQL turning of AISI 4140 steel alloy. **Journal of Cleaner Production**, v. 54, p. 332 – 343, 2013.

HAN, M.-S.; MIN, B.-K.; LEE, S. J. Micro-electrochemical discharge cutting of glass using a surface-textured tool. **CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology**, v. 4, n. 4, p. 362–369, jan. 2011.

HUBER, J.; MARX, W. **Production Laser Cutting**. In: PROC. CONF. ON APPLICATIONS OS LASERS IN MATERIALS PROCESSING. Washington: 1979

ITOIGAWA, F. et al. Effects and mechanisms in minimal quantity lubrication machining of an aluminum alloy. **Wear**, v. 260, n. 3, p. 339–344, fev. 2006.

KAWASEGI, N. et al. Development of cutting tools with microscale and nanoscale textures to improve frictional behavior. **Precision Engineering**, v. 33, n. 3, p. 248–254, jul. 2009.

KHAN, M. M. A.; DHAR, N. R. Performance evaluation of minimum quantity lubrication by vegetable oil in terms of cutting force, cutting zone temperature, tool wear, job dimension and surface finish in turning AISI-1060 steel. **Journal of Zhejiang University SCIENCE A**, v. 7, n. 11, p. 1790–1799, nov. 2006.

KISTLER. **Cutting Force Measurements. Innovative Precision for Optimizing Productivity** Kistler, , [s.d.] . Acesso em: 1 maio. 2015

KÜMMEL, J. et al. Study on micro texturing of uncoated cemented carbide cutting tools for wear improvement and built-up edge stabilisation. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 215, p. 62–70, jan. 2015.

LI, K.-M.; LIANG, S. Y. Performance profiling of minimum quantity lubrication in machining. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 35, p. 226–233, 2007.

LIMA, M. S. F. **Usinagem a laser: corte e furação com feixes de alta energia**. São José dos Campos - SP: Instituto Tecnológico de Aeronáutica, 2006.

LOHAR, D. V.; NANAVATY, C. R. Performance Evaluation of Minimum Quantity Lubrication (MQL) using CBN Tool during Hard Turning of AISI 4340 and its Comparison with Dry and Wet Turning. **Bonfring International Journal of Industrial Engineering and Management Science**, v. 3, n. 3, p. 102–106, 30 set. 2013.

MACHADO, Á. R. et al. **Teoria da Usinagem dos Materiais**. 2ª edição ed. São Paulo: Blucher, 2011.

MCGEOUGH, J. A. **Advanced Methods of Machining**. 1ª. ed. Londres: Chapman and Hall, 1988.

MELLO, H. J. DE et al. **Efeito da aplicação de mínima quantidade de fluido (MQF) no torneamento de aços de diferentes condutividades térmica**. In: II CONGRESSO NACIONAL DE ENGENHARIA MECÂNICA. João Pessoa - PB: 2002

NEVES, D. **Influência da texturização a laser na vida de ferramentas de torneamento revestidas por CVD e PVD**. Campinas - SP: Universidade Estadual de Campinas, 2010.

OBIKAWA, T. et al. Micro-texture at the coated tool face for high performance cutting. **International Journal of Machine Tools and Manufacture**, v. 51, n. 12, p. 966–972, dez. 2011.

PRASANNA, P. K.; KIRAN, J. O.; DEELEPKUMAR, S. G. Effect of tool nose radius and cutting parameters on tool life, surface roughness in turning of grey cast iron. **International Journal of Engineering Science and Technology (IJEST)**, v. 6, n. 3, p. 69–75, mar. 2014.

RÖMER, G. R. B. E. et al. On the formation of laser induced self-organizing nanostructures. **CIRP Annals - Manufacturing Technology**, v. 58, n. 1, p. 201–204, 2009.

SANCHEZ, L. E. A.; LOSNAK, C.; PEREZ, F. R. C. **Efeito da lapidação de pastilhas de metal duro sobre a vida da ferramenta**. In: 1º CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA DE FABRICAÇÃO (COBEF). Curitiba - Paraná - Brasil: abr. 2001

SOARES, E. Y. F. Análise econômica da usinagem de aço automotivo DIN 100Cr6. 2009.

SUAREZ, M. P. et al. **Influência da texturização a laser da superfície de saída da ferramenta na força de usinagem**. In: VI CONGRESSO NACIONAL DE ENGENHARIA MECÂNICA. Campina Grande - PB - BR: 2010Disponível em: <<http://www.abcm.org.br/anais/conem/2010/PDF/CON10-0464.pdf>>. Acesso em: 9 out. 2015

SUAREZ, M. P. et al. **Efeito do tipo de textura a laser na superfície de saída da ferramenta de corte sobre as forças de usinagem**. In: 6º CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA DE FABRICAÇÃO (COBEF). Caxias do Sul - Rio Grande de Sul - Brasil: abr. 2011Disponível em: <<http://alvarestech.com/temp/cobef2011/grima.ufsc.br/cobef2011/media/trabalhos/COF11-0270.pdf>>. Acesso em: 27 ago. 2015

SUGIHARA, T.; ENOMOTO, T. Development of a cutting tool with a nano/micro-textured surface—Improvement of anti-adhesive effect by considering the texture patterns. **Precision Engineering**, v. 33, n. 4, p. 425–429, out. 2009.

SUGIHARA, T.; ENOMOTO, T. Improving anti-adhesion in aluminum alloy cutting by micro stripe texture. **Precision Engineering**, v. 36, n. 2, p. 229–237, abr. 2012.

SUGIHARA, T.; ENOMOTO, T. Crater and flank wear resistance of cutting tools having micro textured surfaces. **Precision Engineering**, v. 37, n. 4, p. 888–896, out. 2013.

TAI, B. L.; DASCH, J. M.; SHIH, A. J. Evaluation and comparison of lubricant properties in minimum quantity lubrication machining. **Machining Science and Technology**, v. 15, n. 4, p. 376–391, out. 2011.

TASDELEN, B.; THORDENBERG, H.; OLOFSSON, D. An experimental investigation on contact length during minimum quantity lubrication (MQL) machining. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 203, n. 1-3, p. 221–231, jul. 2008.

THAMIZHMANI, S.; HASAN, S. Analyses of roughness, forces and wear in turning gray cast iron. **Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering**, v. 7, n. 1-2, p. 401–404, ago. 2006.

TRENT, E.; WRIGHT, P. **Metal Cutting**. Quarta edição ed. Estados Unidos da América: Butterworth Heinemann, 2000.

VEPSÄLÄINEN, L. et al. Frequency analysis of micropillar structured surfaces: A characterization and design tool for surface texturing. **Applied Surface Science**, v. 263, p. 523–531, dez. 2012.

VIANA, R. **Estudo da caracterização de ferramentas de corte texturizadas a laser e revestidas utilizadas no fresamento frontal de ferro fundido vermicular**. Tese de Doutorado em Engenharia Mecânica—Uberlândia - MG: Universidade Federal de Uberlândia, 2009.

WEINERT, K. et al. Dry machining and minimum quantity lubrication. **CIRP Annals - Manufacturing Technology**, v. 53, n. 2^a, p. 511–537, 2004.

XIE, J. et al. Experimental study on cutting temperature and cutting force in dry turning of titanium alloy using a non-coated micro-grooved tool. **International Journal of Machine Tools and Manufacture**, v. 73, p. 25–36, out. 2013.

XU, S. et al. Fabrication of hybrid micro/nano-textured surfaces using rotary ultrasonic machining with one-point diamond tool. **International Journal of Machine Tools and Manufacture**, v. 86, p. 12–17, nov. 2014.

ZHANG, K. et al. Effect of microscale texture on cutting performance of WC/Co-based TiAlN coated tools under different lubrication conditions. **Applied Surface Science**, v. 326, p. 107–118, jan. 2015.