

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA - CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA
TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

MICROFRESAMENTO: UMA ANÁLISE DETALHADA DOS PARÂMETROS DO PROCESSO
PARA A APLICAÇÃO EM LARGA ESCALA

por

Ramiro Silva Miranda

Monografia apresentada ao Departamento de Engenharia Mecânica da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para obtenção do diploma de Engenheiro Mecânico.

Porto Alegre, maio de 2021

Miranda, Ramiro Silva
Microfresamento: uma análise detalhada dos
parâmetros do processo para a aplicação em larga
escala / Ramiro Silva Miranda. -- 2021.
24 f.
Orientador: Heraldo José de Amorim.

Coorientadora: Michele Bernardes de Almeida
Ribeiro.

Trabalho de conclusão de curso (Graduação) --
Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Escola de
Engenharia, Curso de Engenharia Mecânica, Porto
Alegre, BR-RS, 2021.

1. Microusinagem. 2. Microfresamento. 3. Fabricação
de microcomponentes. I. de Amorim, Heraldo José,
orient. II. Ribeiro, Michele Bernardes de Almeida,
coorient. III. Título.

Elaborada pelo Sistema de Geração Automática de Ficha Catalográfica da UFRGS com os
dados fornecidos pelo(a) autor(a).

Ramiro Silva Miranda

MICROFRESAMENTO: UMA ANÁLISE DETALHADA DOS PARÂMETROS DO PROCESSO
PARA A APLICAÇÃO EM LARGA ESCALA

ESTA MONOGRAFIA FOI JULGADA ADEQUADA COMO PARTE DOS
REQUISITOS PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO DE
ENGENHEIRO MECÂNICO
APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELA BANCA EXAMINADORA DO
CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA

Prof. Dr. Mário Roland Sobczyk Sobrinho
Coordenador do Curso de Engenharia Mecânica

Área de concentração: Processos de Fabricação

Orientador: Prof. Heraldo José de Amorim

Coorientadora: Eng. Michele Bernardes de Almeida Ribeiro

Comissão de Avaliação:

Prof. Heraldo José de Amorim

Prof. André João de Souza

Prof. Arnaldo Ruben Gonzalez

Porto Alegre, maio de 2021

À minha família, pelo suporte e por sempre acreditar em mim.
Aos meus amigos, pelo apoio e fraternidade ao longo desta jornada acadêmica.

AGRADECIMENTOS

Agradeço aos meus pais por terem sido fontes de inspiração através do seu exemplo, pelo apoio e suporte em todos os objetivos que tracei ao longo da minha vida.

À minha irmã, por sempre ter sido uma referência enquanto engenheira e por ter me incentivado nesta jornada.

Aos meus amigos, por estarem comigo nos momentos mais difíceis e celebrar comigo cada uma das minhas conquistas.

Ao Professor Heraldo José de Amorim, por ter aceitado o desafio de orientar este trabalho totalmente à distância nesta situação de pandemia.

À minha coorientadora Michele Bernardes, por toda a disponibilidade e dedicação ao longo deste trabalho.

Aos professores que fizeram parte da minha formação, sobretudo os da área de processos de fabricação, responsáveis por proporcionar o meu contato com esta área que despertou meu interesse e hoje é tema deste trabalho.

Descobrir consiste em olhar para o que todo mundo está vendo e pensar uma coisa diferente.

Roger Von Oech

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA - CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA
TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO – 2021

MICROFRESAMENTO: UMA ANÁLISE DETALHADA DOS PARÂMETROS DO PROCESSO
PARA APLICAÇÃO EM LARGA ESCALA

Miranda, Ramiro Silva
ramirosm96@gmail.com

Resumo. *No cenário atual em que a necessidade de produzir componentes miniaturizados de geometrias complexas em larga escala é cada vez maior, o processo de microfresamento se apresenta como uma alternativa promissora de fabricação. Para que isso seja possível, é necessário compreender as particularidades que surgem quando o processo de fresamento é executado em microescala. Inicialmente foram analisados parâmetros chave de entrada no microfresamento como o material da peça a ser usinada, as ferramentas de corte, a máquina-ferramenta e o fluido de corte. Na sequência, foram analisados parâmetros de saída como rugosidade, força, emissão acústica, formação do cavaco e formação de rebarbas. O trabalho buscou identificar quais fatores nos diferentes tipos de parâmetros dificultam a utilização do microfresamento em larga escala. Entre eles, é possível destacar a necessidade de uma microestrutura refinada no material da peça, a produção de microferramentas com elevada resistência e a fabricação desafiadora de micromáquinas-ferramentas. A utilização de técnicas de lubrificação-refrigeração mostrou-se eficiente para melhorar o desempenho do processo.*

Palavras-chave: *microusinagem, microfresamento, fabricação de microcomponentes.*

Abstract. *In the current scenario in which the need to produce miniaturized components of complex geometries on a large scale is increasingly greater, the micro-milling process presents itself as a promising manufacturing alternative. For this to be possible, it is necessary to understand the specific conditions that arise when the milling process is performed on a microscale. Initially, key input parameters for micro-milling were analyzed, such as the workpiece material, the cutting tools, the machine tool, and the cutting fluid. Then, output parameters such as surface roughness, cutting forces, acoustic emission, chip formation, and burr formation were analyzed. The work sought to identify which factors in the different types of parameters hinder the micro-milling on a large scale. It is possible to highlight the need for a refined microstructure in the part material, the production of highly resistant micro-tools, and the challenging manufacture of micro-machine tools. The use of lubri-cooling techniques proved to be efficient in improving the process performance.*

Keywords: *micro-machining, micro-milling, microcomponent manufacturing.*

1. INTRODUÇÃO

A demanda por produtos, componentes e dispositivos compactos e integrados tem aumentado de maneira significativa ao longo dos últimos anos. Entre os fatores que promovem essa tendência, pode-se apontar a necessidade de equipamentos de pequenas dimensões para aplicações bioquímicas, biotecnológicas, aeroespaciais e eletrônicas. Um outro ponto que contribui para este crescimento é o surgimento de ganhos técnicos decorrentes do aumento da relação entre a superfície e o volume dos produtos quando são miniaturizados. Por fim, a tendência de mercado atual exige aparelhos cada vez

mais compactos (Okazaki et al., 2004). A Figura 1 mostra o crescimento da fatia de mercado de equipamentos de escala reduzida fabricados a partir de mecânica de precisão em bilhões de dólares.

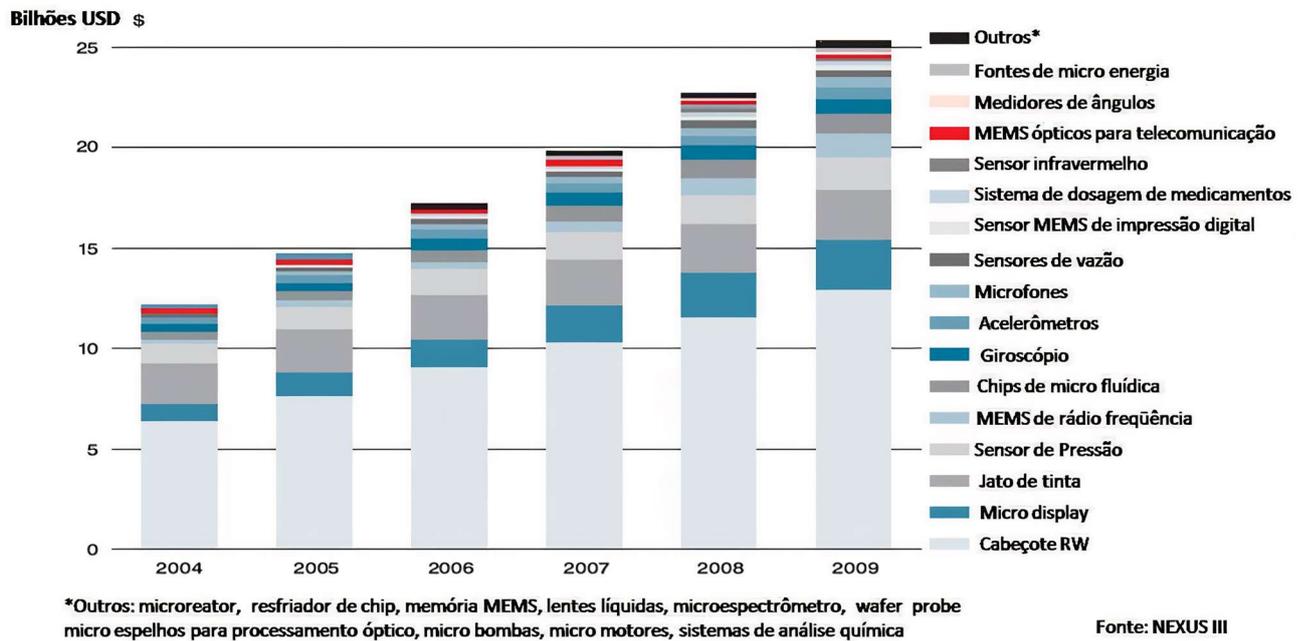


Figura 1 - fatia de mercado de equipamentos de escala reduzida fabricados a partir de mecânica de precisão em bilhões de dólares (NEXUS, 2009).

Entre as técnicas que permitem a produção em larga escala de microcomponentes estão aquelas baseadas nos processos de replicação, como a microinjeção de moldes. Porém, este tipo de processo requer que sejam fabricados moldes e matrizes que consigam manter sua forma e integridade de superfície sem que haja um desgaste excessivo, mesmo após numerosos ciclos de produção. A utilização desse tipo de técnica é fortemente dependente de novas tecnologias que sejam capazes de produzir moldes e matrizes na escala desejada, sendo a microusinagem uma alternativa que traz grande versatilidade nas formas e geometrias que podem ser geradas (Bissacco et al., 2005). A Figura 2 traz exemplos de produtos microusinados.

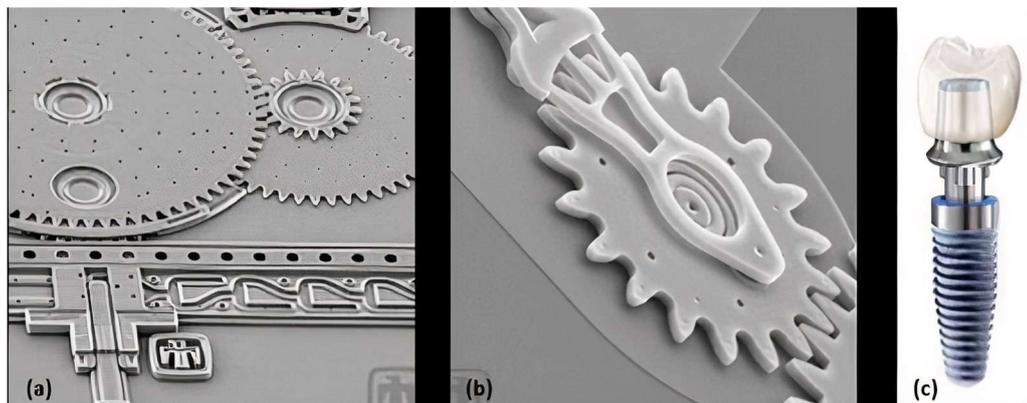


Figura 2 – Exemplos de produtos microusinados (a) microengrenagens (Riomar et al., 2018); (b) micromotores (Riomar et al., 2018); (c) pino utilizado em implantes odontológicos (Adentis, 2018)

No final da década de 1980, a usinagem de ultraprecisão foi estendida para a microestrutura da peça com o intuito de produzir moldes de lentes de Fresnel¹ e dispositivos para a aplicação de microfluidos. Neste novo horizonte de aplicações em componentes miniaturizados, estas estruturas eram caracterizadas pelo elevado grau de recalque (relação entre a espessura do cavaco e a espessura de corte), alta complexidade geométrica e moderada qualidade superficial. Ao encontro desta necessidade, as vantagens oferecidas pelo microfresamento são o elevado grau de recalque, a liberdade de movimento nas três direções e o fato de possuir compatibilidade com uma ampla gama de materiais. Neste cenário, o microfresamento com ferramentas de metal duro surgiu como um método de fabricação promissor para estas aplicações (Weule et al., 2001). Entretanto, mesmo tendo diversas características semelhantes à usinagem tradicional, o microfresamento possui questões que devem ser resolvidas, sobretudo em relação ao tamanho e escala de operações, pois fatores que, em macroescala não afetam as operações de usinagem, podem se mostrar essenciais para os resultados de qualidade superficial e integridade dos microcomponentes.

De maneira geral, o processo de usinagem em escala reduzida pode ser definido com base nas dimensões da ferramenta de corte, que possuem diâmetro na faixa de 1 a 1000 μm . Contudo, a propriedade mais relevante que caracteriza este tipo de operação é o fato da espessura de corte e do tamanho de grão do material da peça serem da ordem do raio da aresta de corte (Câmara et al., 2012). As dimensões e geometria da ferramenta, como o diâmetro, por exemplo, são capazes de influenciar em diversos aspectos da usinagem dependendo do tamanho da microestrutura dos materiais usinados e do formato que se almeja obter (Dornfeld et al., 2006). De acordo com Bissacco et al. (2005), a escolha dos parâmetros de corte não pode se basear nos conhecimentos do fresamento convencional por conta dos efeitos escala e da menor resistência das microfresas.

Apesar de seu grande potencial, o microfresamento apresenta particularidades que ainda impedem sua aplicação em grande proporção. Neste cenário, o presente trabalho busca analisar os principais parâmetros envolvidos no processo com o objetivo de investigar as razões que dificultam a sua utilização em larga escala.

2. FUNDAMENTAÇÃO

2.1. Fresamento

De acordo com Ferraresi et al. (1974), pode-se definir fresamento como o processo de usinagem formador de cavaco que se caracteriza pelos seguintes fatores: a ferramenta multicortante (fresa) possuir arestas cortantes alocadas simetricamente ao redor de um eixo, possibilitando que cada uma das arestas cortantes (ditos dentes da fresa) remova uma porção do material; a movimentação de avanço, que possibilita a execução da operação é usualmente feita pela peça em usinagem, que é fixada na mesa da máquina (no entanto, em anos recentes, máquinas operatrizes onde o avanço é realizado pelo eixo árvore têm se tornado mais comuns, especialmente em máquinas com estruturas tipo pórtico); o ato do avanço faz a peça passar pela ferramenta cortante, que lhe confere as forma e dimensão almejadas.

Diniz et al. (2001) estabelecem fresamento como a operação de usinagem que é caracterizada pela ferramenta (fresa), que é dotada de arestas cortantes distribuídas simetricamente ao redor de um eixo. A efetuação do corte se dá pela rotação da fresa em torno do seu eixo. A movimentação de avanço é normalmente feita pela própria peça a ser usinada, que se encontra fixada na mesa da máquina. Ao passar pela ferramenta em rotação, o corte acontece. A Figura 3 ilustra os dois principais tipos de fresamento: tangencial e frontal, respectivamente.

¹ Usadas em conjunto com os sensores piroelétricos de infravermelho (sensores de presença) em alarmes e detectores de incêndios, as lentes de Fresnel são fundamentais para seu desempenho. (Instituto NCB, 2010)

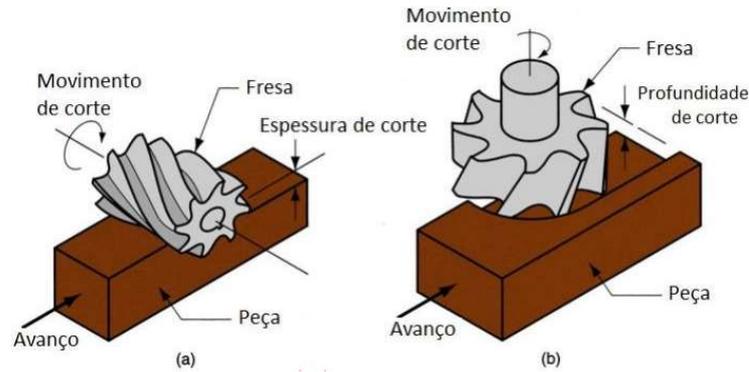


Figura 3 – (a) fresamento tangencial; (b) fresamento frontal (Janisevicius, 2016)

Em resumo, é possível definir o fresamento como uma operação de remoção de material com espessura de corte instantaneamente variável, em corte interrompido, produzido pela ação conjunta do avanço da mesa e do movimento rotativo da ferramenta multicortante de geometria definida (fresa).

2.2. Microfresamento

De acordo com Takács et al. (2003), a adaptação dos processos de remoção de material para a escala micrométrica se mostra uma alternativa promissora, especialmente no processo de fresamento, pela diversidade de geometrias possíveis de serem geradas. A Figura 4 ilustra alguns exemplos de peças fabricadas com microfresamento em alguma etapa.



Figura 4 – geometrias geradas a partir do microfresamento (Wayken Rapid Manufacturing, 2020.)

Apresentando grande versatilidade em relação às demais operações de microusinagem, o microfresamento possibilita a geração de geometrias complexas e tridimensionais que se traduzem em uma ampla gama de microprodutos.

Apesar de possuir muitas semelhanças com o processo convencional de fresamento, existem algumas particularidades que surgem com a diminuição das dimensões envolvidas na operação. O tamanho e a orientação dos grãos do material usinado, por exemplo, exercem influência direta no processo de corte, uma vez que as dimensões da aresta de corte podem ser da mesma ordem de grandeza da microestrutura do material.

O processo de remoção de material no microfresamento sofre ação de diferentes fenômenos além da operação de corte. Dentre estes, tem-se o *ploughing* (deformação plástica do material que acaba sendo empurrado para baixo da aresta de corte), o *rubbing* (ferramenta atrita contra a superfície, mas não corta), deformações plásticas e elásticas. Como resultado destes fenômenos, há um aumento da

rugosidade e na formação de rebarbas, sendo esses fatores uma boa maneira de avaliar se os parâmetros de usinagem utilizados são adequados (Kiswanto et al., 2014)

A Figura 5 apresenta alguns dos aspectos fundamentais que devem ser analisados no processo de microfresamento, como o material a ser usinado, as ferramentas de corte e a máquina em que a operação será executada.

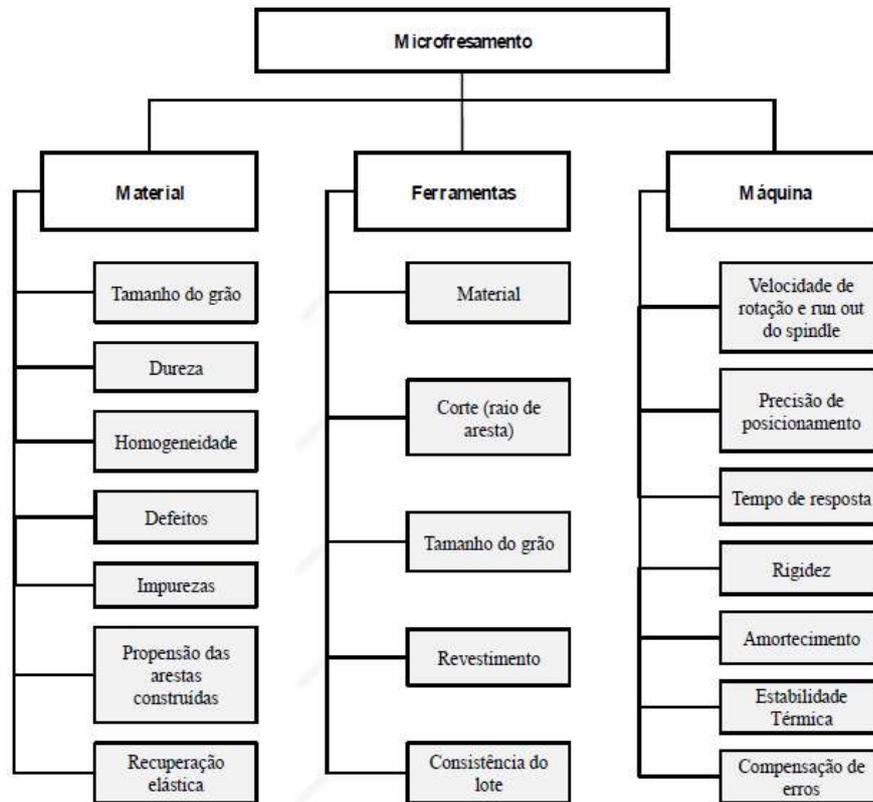


Figura 5: Aspectos-chave do microfresamento (Adaptado de Câmara et al., 2012).

É fundamental que os fatores particulares do microfresamento sejam analisados para que se possa entender sua influência no resultado final, possibilitando a escolha de parâmetros ótimos no planejamento da micromanufatura.

3. ANÁLISE DE PARÂMETROS DE ENTRADA

3.1 Material da Peça

Com a redução das dimensões da ferramenta, naturalmente também se reduz as dimensões e o volume do material que é removido. Entretanto, o tamanho de grão do material segue o mesmo. No fresamento tradicional, o cavaco formado compreende um número grande de grãos. Por outro lado, no microfresamento, frequentemente o cavaco formado possui a espessura de apenas um grão do material que está em usinagem. Neste tipo de interação, as forças de corte variam de maneira drástica dependendo da orientação de cada grão. De acordo com Bissacco et al. (2005), a escolha de materiais que possuam o menor tamanho de grão possível e alta homogeneidade proporciona condições melhores para o microfresamento.

A forma como se dá o processo de remoção de material no microfresamento faz da interação entre o material usinado e a aresta de corte da ferramenta um fator determinante nos resultados obtidos. A microestrutura do material usinado pode exercer significativa influência nesta interação, alterando as

condições de corte. Materiais que possuem composições semelhantes podem apresentar comportamentos distintos durante o fresamento quando o tamanho dos grãos é diferente. Considerando as escalas do processo, o tamanho de grão causa diferenças ainda mais significativas no microfresamento. O fato de o volume de material removido ser comparável ao tamanho dos próprios grãos torna o acabamento da superfície usinada bastante dependente da microestrutura (Popov et al., 2006). Komatsu et al. (2012) apontam que, recentemente, tem havido um grande esforço no desenvolvimento de materiais com grãos ultrafinos, melhorando o comportamento mecânico e a uniformidade desses materiais.

Segundo Popov et al. (2006), a textura cristalina do material pode proporcionar variações na espessura do cavaco, além de variações no ângulo de corte grão-a-grão. Defeitos na estrutura cristalina afetam diretamente as condições de corte para os materiais metálicos. O refinamento estrutural do material a ser usinado contribui muito para se obter condições de corte mais favoráveis. No estudo que conduziram, os autores fizeram experimentos utilizando liga de alumínio (Al 5083) com diferentes microestruturas. O material bruto sofreu dois processos de modificação estrutural, sendo o primeiro o endurecimento convencional por extrusão e o segundo para uma obtenção de estrutura ultrafina dos grãos. Em seguida, foram realizadas operações de microfresamento com estratégias de usinagem apropriadas, utilizando-se primeiramente o material bruto e em seguida os dois materiais modificados, para então analisar a integridade de cada um deles. O estudo evidenciou que o refinamento da microestrutura dos materiais pode melhorar de maneira significativa a integridade microestrutural da superfície usinada. A rugosidade se mostrou fortemente dependente do tamanho de grão do material, sendo possível melhorá-la de maneira significativa com a redução do tamanho dos grãos para a liga de alumínio usada nos experimentos. A estrutura cristalina do material, quando utilizada de forma favorável em relação à direção do corte, também pode contribuir para a melhora da rugosidade, porém não na mesma proporção do refinamento dos grãos (Popov et al., 2006).

De acordo com Komatsu et al. (2012), diversos estudos apontam resultados superiores no microfresamento de materiais com grãos ultrafinos, sobretudo em relação ao acabamento e à formação de rebarbas. As rebarbas surgem a partir de variações nas forças de corte na saída da ferramenta e seu surgimento também é reduzido com a diminuição do tamanho dos grãos do material.

Através da análise da literatura conclui-se que a microestrutura do material da peça representa um fator limitante para a aplicação do microfresamento em maiores escalas. O processo apresenta resultados amplamente superiores em materiais com microestrutura mais refinada, condição que nem sempre é possível ser satisfeita ao fabricar microcomponentes.

3.2. Ferramenta de Corte

Recentemente, um grande avanço nas tecnologias de fabricação de microferramentas ocorreu, proporcionando técnicas de corte em microescala com alta taxa de remoção de material e a geração de estruturas tridimensionais complexas nas peças usinadas. A fabricação de ferramentas de microcorte vem sendo cada vez mais difundida. Como exemplo deste fato, tem-se a fabricação de brocas de 10 μm de diâmetro e fresas helicoidais de 30 μm de diâmetro (Egashira et al., 2011). A Figura 6 ilustra a diferença de dimensões entre uma fresa de topo reto de tamanho convencional (6 mm de diâmetro) e outra própria para o microfresamento (200 μm de diâmetro).



Figura 6: Fresa de topo reto de 6 mm de diâmetro (à esquerda) e microfresa de 200 μm (à direita) (Bissacco et al., 2005).

A ferramenta utilizada na operação de microfresamento é o primeiro requisito para a geração de superfícies tridimensionais com elevada razão entre a maior e a menor dimensão. Na maioria dos casos são utilizadas microfresas de topo reto e topo esférico, sendo o primeiro tipo aplicado em rasgos e canais e o segundo em superfícies tridimensionais.

Os materiais usualmente escolhidos para a fabricação destas ferramentas são o aço-rápido (HSS – *high-speed steel*) e o metal-duro (WC-Co), sendo o segundo preferencialmente utilizado por apresentar dureza elevada e resistência em altas temperaturas (Wang et al., 2007). Com o aumento do teor de cobalto (Co) no metal-duro, a dureza e resistência ao desgaste da ferramenta são reduzidas (Trent e Wright, 2000). A granulação de carboneto de tungstênio (WC) utilizada na confecção de ferramentas para microusinagem varia de 600 nm a 2 μm , sendo observados comportamentos bastante diferentes dentro desta faixa. Na comparação de duas ferramentas de metal-duro que possuam o mesmo teor de WC, uma de granulação grosseira (2 μm) e outra de granulação mais fina (600 nm), a segunda apresentará maior tenacidade à fratura para a mesma dureza. Isto ocorre pois para o mesmo volume de partículas duras (WC) a soma das áreas externas dos grãos da ferramenta com menor granulação será maior, proporcionando maior possibilidade de absorção de energia (tenacidade à fratura) por ter o cobalto (fase macia) mais bem distribuído no volume.

As faixas de avanço por dente empregados em microfresamento também apontam o metal-duro com menor granulação como a melhor escolha. O tamanho do grão é da mesma ordem de grandeza do avanço por aresta, e no processo de formação do cavaco é a matriz de cobalto a responsável por sustentar o grão de WC. Desta maneira, grãos maiores implicam em maior energia específica e ângulos de saída mais negativos durante a formação do cavaco, o que acaba acelerando o processo de desgaste da ferramenta (Filiz et al., 2007).

Apesar das propriedades favoráveis do metal-duro, como a elevada dureza e boa resistência em altas temperaturas, a granulação do material da microferramenta é um requisito que deve ser satisfeito para a larga aplicação do processo. As ferramentas de granulação mais fina produzem melhores resultados e contribuem para uma maior vida da ferramenta, se mostrando mais adequadas para o microfresamento.

3.3 Máquina-ferramenta

A produção de máquinas-ferramenta é o grande desafio a ser superado para a maior difusão da microusinagem. De acordo com Rahman et al. (2010), é fundamental que as máquinas de microusinagem possuam um sistema CNC (Controle Numérico Computadorizado) que possibilite o monitoramento adequado dos movimentos e parâmetros envolvidos no processo.

Segundo estudos realizados por Baldo (2013), as micromáquinas-ferramentas requerem um inflexível processo de fabricação, uma vez que as propriedades requeridas precisam ser superiores às do processo convencional, que por sua vez, costumeiramente apresentam falhas em seus comandos e controles. Quando se trata de macroescala, esses desvios podem não causar consequências

preocupantes. Entretanto, em microusinagem, os mesmos desvios podem causar defeitos na peça final.

É fundamental que todos os componentes mecânicos e articulações desde a fonte de energia até a ferramenta de corte possuam elevada rigidez a deformações em mudanças de cargas. Entre eles, se destacam o eixo-árvore, os mancais e suportes, as guias de deslizamento ou lineares, a estrutura da máquina, a ferramenta de corte e o dispositivo de fixação da peça (Wang et al., 2007).

A escolha correta de materiais também é primordial, sobretudo pelas propriedades de dilatação térmica. Deformações originadas de gradientes térmicos são profundamente prejudiciais ao desempenho adequado das máquinas de microfresamento. Minimizar o gradiente térmico isolando as fontes de calor do sistema e garantir que o sistema atinja e mantenha o equilíbrio térmico estável é fundamental. O controle de temperatura em máquinas de microfresamento deve ficar na faixa de 0,1° C (Porto et al., 2004; Creighton et al., 2010).

Apesar de apresentar um desafio em sua fabricação, as micromáquinas-ferramentas também trazem consigo vantagens importantes na sua utilização. Chae et al. (2006) apontam diversos benefícios ligados à utilização de micromáquinas de usinagem, como, por exemplo, a diminuição no gasto de energia e de matéria-prima, redução do espaço e menor custo para a produção. Outro ponto favorável é que as micromáquinas-ferramentas apresentam frequências naturais mais altas quando comparadas às máquinas convencionais pelo fato de possuírem uma massa muito menor. A vantagem está na possibilidade de utilização de um grande intervalo de velocidades de rotação com reduzida instabilidade.

3.4. Métodos Lubrificadores

Vazquez et al. (2015) analisaram os efeitos de quatro diferentes condições de lubrificação no microfresamento da liga de titânio Ti6Al4V: a seco, por jato (fluido em abundância) e utilizando MQL (Mínima Quantidade de Lubrificante) em duas direções: a favor e contra a direção de corte. Os resultados do estudo em relação à rugosidade nas diferentes condições são mostrados na Figura 7.

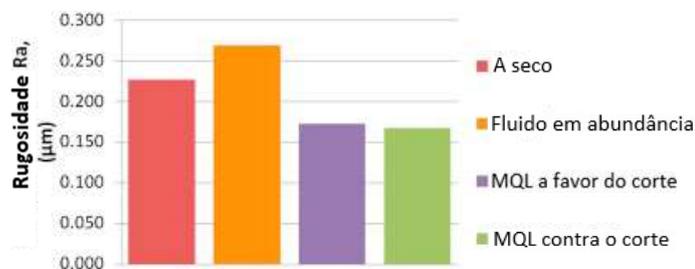


Figura 7 – Rugosidade dos microcanais em diferentes condições de lubrificação (fonte: Vazquez et al., 2015).

Ao observar os resultados da Figura 7, os autores concluíram que maior rugosidade gerada com a lubrificação com fluido em abundância pode ser explicada pelo fluxo desordenado gerado pela aplicação do jato, sendo ineficiente no contexto da microescala por não atingir a pequena zona de corte. Quando compara-se o resultado do método de fluido em abundância ao obtido utilizando MQL em direção contrária ao corte, observa-se que a rugosidade da superfície reduz-se em 60% (Vazquez et al., 2015). As diferenças na rugosidade da superfície são causadas principalmente pelo desgaste da ferramenta. A aplicação de MQL resulta não apenas em uma melhor interação entre o cavaco e a ferramenta, reduzindo o desgaste da ferramenta, mas também melhora a qualidade da superfície. Como a aresta de corte é mais bem preservada no uso de MQL, a rugosidade da superfície alcançou melhores resultados em relação à aplicação de fluido em abundância e à usinagem a seco. Os autores

também compararam os resultados das diferentes condições de lubrificação em relação a formação de rebarbas, medindo sua altura (Figura 8).

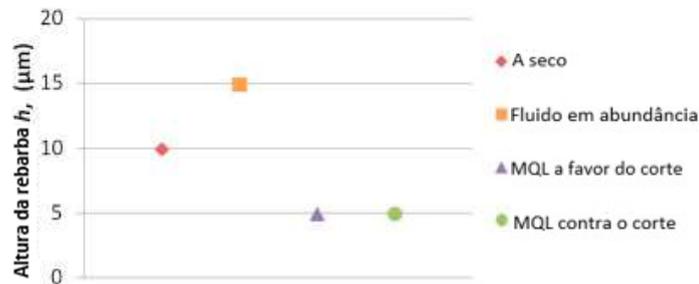


Figura 8 – Altura da rebarba com os diferentes métodos de lubrificação (fonte: Vazquez et al., 2015).

Segundo a Figura 8, o método de lubrificação a jato apresentou resultados inferiores novamente, gerando uma rebarba maior. As rebarbas de tamanho mais reduzido foram atingidas com o uso de MQL nas duas formas estudadas. Isso pode ser explicado pela influência indireta da aresta de corte, que apresenta um desempenho superior durante o corte com o uso de MQL quando comparada aos métodos a jato e a seco. Desse modo, o uso de MQL permite remoção de material de maneira mais eficiente e contribui para a menor formação de rebarbas.

Li e Chou (2010) também realizaram um estudo comparativo, neste caso entre o microfresamento a seco e utilizando MQL. O trabalho teve como objetivo verificar os impactos no desgaste da ferramenta de corte e na qualidade da superfície usinada. Foram utilizadas fresas de topo reto de 600 μm de diâmetro para microfresamento de canais em aço, variando-se a rotação do eixo-árvore (20000, 30000 e 40000 rpm) e o avanço (1,0, 1,5 e 2,0 $\mu\text{m}/\text{rev}$). Os resultados do experimento são apresentados na Figura 9.

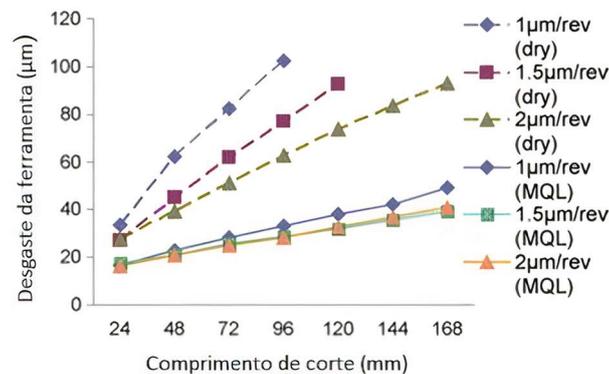


Figura 9 - Desgaste da aresta de corte em função do comprimento de corte para usinagem a seco e MQL (Li e Chou, 2010).

Segundo os resultados apresentados na Figura 9, a vida da ferramenta diminuiu com a redução do avanço. Isso pode se explicar pelo fato de que o desgaste é analisado em relação ao comprimento de corte. Desta maneira, para avanços menores, o tempo em que a ferramenta está exposta ao corte é maior. A tendência se manteve tanto com o uso de MQL quanto para o corte a seco. No microfresamento, a ferramenta é exposta a condições mais severas que no fresamento convencional, sobretudo devido à brusca variação de forças que surge de acordo com as diferentes orientações de cada grão e à maior fragilidade por causa das dimensões da microferramenta. Dessa maneira, o estudo evidencia que quanto menor for o tempo de exposição ao corte (portanto maior o avanço para o mesmo comprimento de corte), menos desgaste a microferramenta apresentará. A rugosidade não

demonstrou variação significativa para os avanços utilizados na usinagem com MQL. Por outro lado, nas condições de corte a seco, a rugosidade aumentou conforme o comprimento de corte foi aumentado para todos os avanços. Os autores constataram a formação de rebarbas de menor dimensão em todos os testes utilizando MQL, o que foi atribuído ao menor desgaste da ferramenta nessa condição.

O estudo de Li e Chou (2010) demonstra que a Mínima Quantidade de Lubrificante proporciona a redução do desgaste da aresta de corte da ferramenta em aproximadamente 60% quando comparado ao desgaste na usinagem a seco. A utilização do fluido de corte também se mostrou eficaz na melhora da qualidade da superfície, diminuindo a rugosidade.

A utilização de fluidos lubrificantes nas operações em microescala se apresenta como uma alternativa bastante promissora. Seus efeitos na melhora da rugosidade e na redução do desgaste da ferramenta podem abrir caminho para a difusão do processo de microfresamento. Contudo, ainda há a necessidade que mais estudos sejam conduzidos sobre este tema para que o seu potencial seja melhor explorado em diferentes materiais e condições de fabricação.

4. RESULTADO EM PARÂMETROS DE SAÍDA

4.1 Rugosidade

De maneira geral, os melhores valores de rugosidade e acabamento são obtidos quando as flexões ocasionadas por esforços de usinagem ou vibrações são pequenas, o material da peça é puro e livre de defeitos (trincas, bolhas e inclusões), o eixo principal da máquina-ferramenta está corretamente alinhado e as guias não apresentam desgaste. Outro fator que pode influenciar o acabamento do material microfresado é a elasticidade do conjunto máquina-ferramenta-peça (Liu e Wang, 2009). Os parâmetros de processo também exercem forte influência sobre a rugosidade. O avanço é o que tem maior influência: a altura dos picos e a profundidade dos vales das marcas de avanço tendem a aumentar em proporção quadrática em relação ao avanço (Shaw, 1997). O incremento da velocidade de avanço aumenta as forças de usinagem e a amplitude das vibrações da ferramenta, tendendo a gerar maiores alturas das ondulações (Wentian e Yude, 2010), principalmente devido ao aumento no avanço por dente resultante.

Velocidades de corte baixas demais podem ocasionar aresta postiça de corte (APC), um fenômeno que tende a piorar o acabamento. Isso ocorre devido ao desprendimento de porções da APC durante o processo, que acabam por aderir à superfície da peça usinada. Desta forma, o aumento da velocidade de corte contribui para a melhora da rugosidade, uma vez que a temperatura de usinagem aumenta, impedindo o encruamento do material do cavaco sobre a superfície de saída da ferramenta e inibindo a formação de APC (Souza, 2016). Além disso, a dureza do material diminui, facilitando o seu cisalhamento. Contudo, o aumento da velocidade de corte requer rotações mais altas, o que pode gerar vibrações e prejudicar o acabamento.

Um dos fatores que influencia diretamente a qualidade da superfície usinada são as microferramentas utilizadas no processo. Por conta de seu diâmetro reduzido, o desgaste da ferramenta aumenta proporcionalmente ao seu volume quando comparado com o que ocorre no fresamento convencional. Essa particularidade acarreta mudanças em características do processo como rugosidade, forças de corte e desempenho (Hung e Lu, 2013).

Outra característica que influencia significativamente a superfície da peça usinada no microfresamento é a razão entre a espessura de corte (h) e o raio da aresta de corte (r_β). Baixos valores dessa razão fazem com que o material acabe sendo empurrado e não cortado, deformando a superfície ao invés de remover o material (efeito *ploughing*). Também é possível que esse efeito ocorra no fresamento convencional em macroescala. Contudo, no microfresamento ele acontece de maneira prolongada e numa extensão maior, causando um desgaste mais severo na ferramenta. O volume de

cavaco que não é cortado fica aderido à superfície, assemelhando-se a rebarbas, contribuindo para o aumento da rugosidade superficial do material (Afazov et al., 2010).

Também acerca desse tema, Aramcharoen e Mativenga (2009) estudaram o comportamento da rugosidade da superfície usinada em relação à razão entre a espessura do cavaco (h) e o raio da aresta de corte (r_β). A Figura 10 apresenta o gráfico da rugosidade média (R_a) em relação à razão entre a espessura de corte ($h = fz$) e o raio da aresta de corte para a usinagem de microcanais no aço ferramenta H13, variando a razão entre 0,2 e 2,0 e a velocidade de corte entre 12 e 216 mm/min. A rotação do eixo-árvore (30000 rpm) e a profundidade de corte ($50 \mu\text{m}$) foram mantidos constantes.

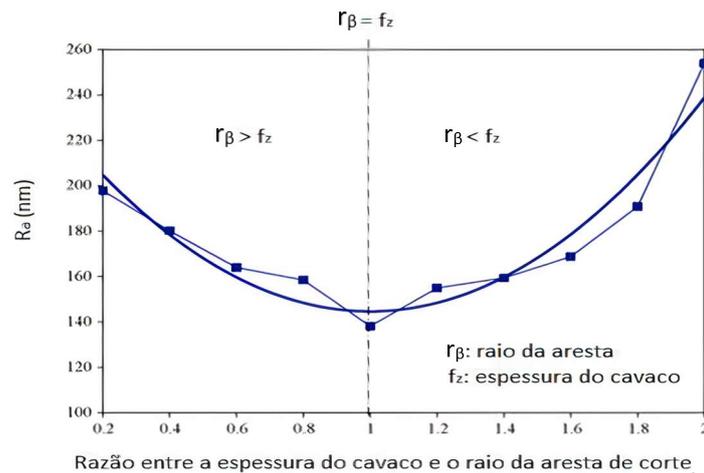


Figura 10 - Rugosidade Média x Razão entre espessura do cavaco e o raio da aresta de corte (Aramcharoen e Mativenga, 2009).

No estudo, foram observados dois fenômenos. Primeiramente, quando o valor da razão é inferior a unidade, a rugosidade diminui com o aumento da espessura do cavaco. Isso acontece pela diminuição do efeito de deformação para valores maiores de avanço por dente, devido à menor recuperação elástica do material (efeito *ploughing*). Quando a razão atinge valores maiores que a unidade, o aumento no avanço por dente leva também a um aumento na rugosidade, apresentando um comportamento semelhante ao fresamento em macroescala (Aramcharoen e Mativenga, 2009).

4.2 Componentes da Força de Usinagem

A força de usinagem está fortemente ligada ao processo de formação de cavaco. No processo de microfresamento, essa formação de cavaco passa por algumas particularidades, entre as quais três devem ser destacadas: a espessura de corte (h) ser da mesma ordem de grandeza do raio da aresta de corte; a provável recuperação elástica do material da peça após a passagem da aresta de corte, que gera mais uma fonte de atrito; os grãos do material usinado, com diferentes orientações cristalográficas, sendo acessados separadamente pela aresta de corte. Entretanto, ao passo que a intensidade da força no microfresamento está diretamente relacionada à espessura h , ela é inversamente proporcional ao coeficiente de atrito do sistema tribológico “material da superfície de saída da ferramenta de corte – material em usinagem”.

Observações de cunho experimental sobre forças no processo de microfresamento com diferentes materiais e sob diversas condições de usinagem são mencionadas na literatura. Afazov et al., (2010) realizaram um estudo sobre a influência exercida pelo raio r_β na força na direção de avanço em função da espessura h na usinagem do aço AISI 4340 (31 HRC). Os resultados obtidos indicaram que o incremento do raio r_β provocou um aumento da força na direção do avanço. Esse efeito pode ser

explicado pelo fato do comprimento de contato aresta de corte-peça ser maior para maiores r_{β} , resultando em maior atrito (Afazov et al., 2010).

Bissacco et al. (2005) também realizaram observações experimentais de esforços em microfresamento. Eles realizaram um estudo sobre as forças nas direções do avanço (F_x), perpendicular à direção de avanço (F_y) e axial (F_z) no microfresamento de um aço ferramenta com dureza de 58 HRC utilizando uma microfresa de topo esférico de metal duro com raio de aresta de corte de 1 μm . Foram usados três avanços por aresta: 3, 6 e 15 μm . Os autores observaram que, devido à relação estabelecida entre h e r_{β} , três fenômenos ocorreram: grande deflexão da ferramenta, alto valor de rugosidade e formação de rebarbas. De acordo com os autores, uma maneira de aprimorar o desempenho do processo seria aumentar a razão, sendo que a melhor maneira de atingir este objetivo seria reduzindo o raio r_{β} , o que não é viável devido a limitações tecnológicas dos processos de fabricação usados na produção de ferramentas de metal-duro. Em contrapartida, é possível aumentar a espessura de corte (h) ao aumentar-se o avanço por aresta de corte (f_z). Apesar de isso se mostrar claramente benéfico para a redução das rebarbas e para a melhora da rugosidade, o efeito sobre as forças de usinagem e, portanto, sobre a deflexão da ferramenta não é tão óbvio. Enquanto, por um lado, o aumento da espessura de corte pode levar a maiores valores de forças, por outro, a razão entre h e r_{β} pode levar a valores médios mais favoráveis de ângulo da saída, proporcionando a melhora da geometria de remoção de material e reduzindo a pressão específica de corte (Bissacco et al., 2005).

4.3 Emissão Acústica

Pode-se definir emissão acústica como ondas de pressão ou de tensão geradas durante processos dinâmicos em materiais (Liptai et al., 1970). Em situações em que são submetidos à carga, os materiais têm como resposta movimentos na direção do estado de mais baixa energia e tendem a desenvolver condições localmente instáveis consideravelmente antes de toda massa se tornar instável. A emissão acústica se apresenta como uma característica marcante nos processos de microusinagem.

De acordo com Hung e Lu (2013), a geração da emissão acústica em microusinagem é proveniente sobretudo de deformações plásticas no plano de cisalhamento, do atrito na superfície de saída e da deformação do material na superfície de folga desgastada. Os autores observaram que o aumento do desgaste da aresta de corte secundária provocou aumento na intensidade do sinal de emissão acústica durante o microfresamento do aço AISI W1.

Rahnama et al. (2009) realizaram um estudo monitorando o microfresamento de uma liga de alumínio 7075 utilizando sinais de emissão acústica. Os autores detectaram vibrações através de significativas mudanças nos tempos e frequências dos sinais quando comparados a sinais de uma microusinagem estável, além de relacionarem essas vibrações à formação de rebarbas maiores.

As operações de microusinagem apresentam a particularidade de serem executadas em escala micrométrica ou mesmo nanométrica (com respeito à espessura do material não deformado). Para que seja possível obter as informações para a avaliação da quantidade de material retirado, do acabamento superficial e dos danos subsuperficiais, se fazem necessários sensores apropriados capazes de detectar tais respostas (Dornfeld, 1999). A Figura 11 ilustra diversos tipos de sensores, adequados para faixas de aplicação distintas.

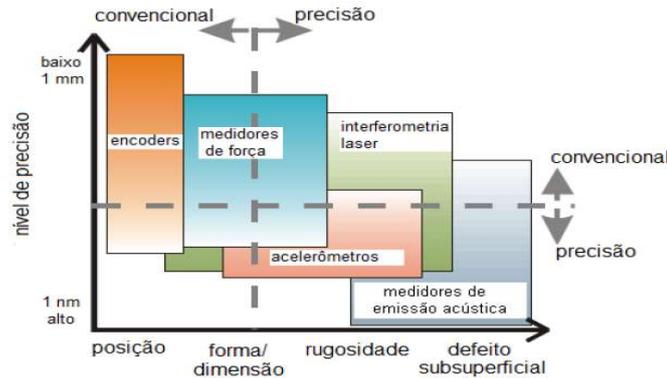


Figura 11 – Aplicação de sensores versus nível de precisão e erros em parâmetros de controle (Dornfeld, 1999).

Sensores convencionais, como os sensores de força e vibração, apresentam inexatidão devido à perda de sensibilidade em ocasiões em que frequências extremamente altas estão presentes. São os sensores de emissão acústica que dão a melhor resposta no campo da alta frequência presente na microusinagem, em um cenário em que são menores as influências dos ruídos de baixa frequência induzidos pela máquina (Lee et al., 2006). Pode-se concluir que a presença de sensores deste tipo se mostra necessária para um controle de parâmetros preciso em microusinagem, o que pode refletir em custos adicionais nas operações.

4.4 Formação do Cavaco

Chae et al. (2006) afirmam que a maior parte das abordagens utilizadas na usinagem convencional não se aplicam na microusinagem. Quando se trata de corte e remoção de material, as interações que ocorrem entre a ferramenta e o material usinado possuem um comportamento bastante distinto em microescala. Isso deve sobretudo aos efeitos de deformação (*ploughing*) que ocorrem quando espessuras tão finas são usinadas. Neste cenário de espessuras de cavaco tão pequenas a ação de corte pode apresentar considerável instabilidade, prejudicando o resultado do processo.

Se a profundidade de corte não atingir um valor mínimo, o cavaco acaba não se formando e o que ocorre é uma deformação sem remoção efetiva de material. Na medida em que a espessura de corte se aproxima da espessura mínima do cavaco, o material começa a ser removido, apesar de uma certa deformação elástica do material seguir ocorrendo. No momento em que se atingem valores acima da espessura mínima de cavaco é que toda a profundidade de corte é removida em forma de cavaco, ocorrendo uma redução expressiva do fenômeno de deformação elástica (Chae et al., 2006).

De acordo com Chae et al. (2006), a espessura mínima de cavaco apresenta forte relação com o raio da aresta de corte e com as características do material que será usinado. Mesmo que se saiba a medida da aresta de corte, determinar e medir a espessura mínima de cavaco não é tão simples. Entretanto, é importante determinar esta espessura antes que se dê início ao processo de corte para que a condição ideal para a formação de cavaco seja estabelecida e a remoção de material ocorra de maneira satisfatória.

A necessidade de determinar e respeitar a espessura mínima de cavaco é uma condição limitante do processo. Para evitar efeitos de deformação do material é preciso usinar sempre com uma espessura acima da mínima, restringindo valores de parâmetros que influenciam a espessura do cavaco, como o avanço por dente e o raio da aresta de corte da ferramenta.

Ji et al. (2013) realizaram um estudo acerca das forças ligadas à formação do cavaco. Nele, os autores analisaram detalhadamente as forças de corte ao longo da interface ferramenta/cavaco durante a microusinagem de monocristais de cobre com ferramentas de diamante, observando a influência do ângulo de inclinação da ferramenta e profundidade de corte. Os resultados obtidos evidenciaram que

a formação de cavaco, a deformação subsuperficial e a suavidade da superfície usinada variam, sobretudo, com os diferentes ângulos de inclinação da ferramenta. O estudo mostrou que a força normal aumenta consistentemente ao longo da interface ferramenta/cavaco quando um ângulo de inclinação mais negativo é usado.

4.5 Formação de Rebarbas

Jeong et al. (2009) destacam que a maior parte das aplicações de componentes microusinados, como nas áreas de ótica, eletrônica, medicina, dispositivos biomédicos, comunicação e aviação apresentam requisitos relacionados ao acabamento e à qualidade da superfície. Neste cenário, as rebarbas geradas durante a operação de corte são especialmente indesejadas. Ainda assim, elas são inevitáveis devido às características do processo de fresamento, no qual o material sofre escoamento no contato mecânico entre este e a ferramenta de corte. Quando as operações se dão em microescala, este fenômeno também ocorre.

A presença de rebarbas gera diversos inconvenientes na utilização do material microusinado. Entre estes, destacam-se a dificuldade de encaixe desses componentes nos processos de montagem e o risco de ferimentos durante o manuseio do material. Desta forma, processos posteriores à microusinagem podem ser necessários para a remoção das rebarbas. Se de um lado esses processos são capazes de melhorar a condição de acabamento, de outro possuem o inconveniente de aumentar o custo total de fabricação (Jeong et al., 2009).

De acordo com Saptaji et al. (2012), nos processos de microfresamento existe grande deformação plástica ao redor da aresta de corte da ferramenta. As rebarbas que se formam quando a aresta de corte deixa a superfície que está sendo usinada são denominadas rebarbas de saída. Além destas, também se formam rebarbas laterais no processo de corte ortogonal conhecidas como rebarbas de Poisson. As rebarbas que surgem nas partes superiores das paredes laterais dos canais microfresados possuem a característica de serem menores nas paredes de entrada do que nas paredes de saída. Isso ocorre devido à ação do cavaco que vai sendo formado ao longo do corte.

É necessário ressaltar que a remoção dessas rebarbas exige certos cuidados, uma vez que pode provocar danos aos resultados obtidos nas partes usinadas. Ainda que existam alguns métodos que realizam o acabamento e removem essas rebarbas, uma boa alternativa consiste em realizar algumas mudanças nos parâmetros do processo que podem resultar na sua diminuição, como diminuir a profundidade de corte, aumentar a velocidade de corte e utilizar ferramentas com ângulos de inclinação maiores (Saptaji et al., 2012).

Lekkala et al. (2011) realizaram um estudo sobre a formação de rebarbas para diferentes materiais e propuseram um modelo experimental para prever a altura da rebarba nas operações de microfresamento. O procedimento experimental envolveu o uso de diferentes níveis de velocidade de corte, avanço e profundidade de corte, considerando como variáveis de resposta a altura e a espessura da rebarba. Os autores concluíram que dois fatores contribuíram de maneira mais significativa para a diminuição da altura das rebarbas: o aumento do avanço e o aumento do diâmetro da ferramenta. O modelo teórico proposto para previsão da altura da rebarba demonstrou uma precisão que variou de 0,65% a 25%.

A presença de rebarbas no final da operação de microfresamento não é admissível em grande parte de suas aplicações. O controle de parâmetros de entrada para a redução de rebarbas é mais um dos fatores que impõe restrições ao processo.

5. CONCLUSÃO

Diferentes particularidades do processo de microfresamento foram analisadas buscando compreender quais delas se mostram como desafios para a evolução desse tipo de processo.

Entre os desafios que se apresentam quando se executa o processo de fresamento em escala reduzida, estão aqueles ligados ao material da peça a ser usinada. Em microfresamento, materiais que possuem uma microestrutura mais refinada proporcionaram melhor integridade e permitem a obtenção de superfícies com melhor acabamento (menor rugosidade), sendo este um dos fatores que dificulta a aplicação do processo em diferentes tipos de materiais.

A construção das microferramentas revela outra condição a ser satisfeita para um desempenho satisfatório do processo. Elas precisam ser fabricadas em uma granulação menor para que possuam um melhor desempenho. É necessário que apresentem uma tenacidade à fratura elevada mesmo possuindo dimensões muito reduzidas, e a menor granulação contribui para isso. Isso é especialmente importante quando se considera que, devido ao raio da aresta de corte ser da mesma ordem de grandeza dos grãos da microestrutura do material usinado, é necessário o uso de ferramentas mais afiadas, i.e., com arestas de corte com raios tão pequenos quanto possível, o que exige o uso de grãos ultrafinos em sua fabricação,

Fabricar máquinas-ferramenta para a operação de microfresamento é mais um desafio a ser superado. Em microescala, pequenas deflexões são capazes de provocar distorções importantes no processo. Portanto, uma elevada rigidez e o controle da dilatação térmica se mostram imprescindíveis ao longo de seu exigente processo de fabricação. Além disso, a fabricação de elementos de dimensões reduzidas exige comandos numéricos computadorizados com elevada resolução, o que reflete fortemente nos custos associados ao sistema de posicionamento (servos, *encoders*, conversores analógico/digitais, entre outros).

Parâmetros de saída como rugosidade e força também apresentaram fatores limitantes, sobretudo em relação à razão entre a espessura do cavaco e o raio da aresta de corte. Baixos valores desta razão fazem com que o material seja deformado e não cortado, gerando maiores valores de rugosidade; esse efeito se torna crítico quando a espessura do cavaco é menor que o tamanho de grão do material usinado. No caso das forças, estas são mais elevadas quando os valores da razão são reduzidos. No entanto, a diminuição do raio da aresta de corte para elevar o valor dessa razão esbarra em questões de tecnologia na fabricação das microferramentas, incluindo a granulometria dos componentes.

A formação do cavaco também apresenta limitações para a aplicação do microfresamento. Para que ela aconteça de maneira satisfatória é necessário que a profundidade de corte atinja um valor mínimo. Caso contrário, o cavaco não se forma e acaba ocorrendo uma deformação sem a remoção de material efetivamente. Essa característica limita a utilização de valores de profundidades de corte mais baixos, como em operações de acabamento.

Em relação a operações de acabamento, um desafio a ser superado é a redução da formação de rebarbas, sobretudo porque quando se trata de microcomponentes, na maioria dos casos, a presença de rebarbas é especialmente indesejada. Isso é especialmente importante quando se considera que sua remoção por diversos métodos tradicionais sem causar danos aos elementos usinados é bastante difícil e implica custos adicionais. Restringir os parâmetros de entrada a janelas nas quais a formação de rebarbas seja reduzida é uma solução tecnicamente viável, mas que reduz a flexibilidade do processo.

O uso de lubrificarrefrigerante adequado apresenta uma terceira solução para o problema das rebarbas no microfresamento. O MQL surge como melhor alternativa para a redução das dimensões das rebarbas, além de proporcionar uma menor rugosidade e um menor desgaste da microferramenta de corte. O menor desgaste da microferramenta proporciona uma redução significativa de rebarbas, além de melhorar o acabamento. Portanto, é possível concluir que a utilização de MQL demonstra grande potencial para elevar o desempenho do processo e viabilizar a sua utilização em larga escala.

Apesar de apresentar desafios em diferentes aspectos, o processo de microfresamento possui grande potencial para fabricar componentes complexos em microescala. Algo que pode ser abordado em futuros trabalhos é a exploração de técnicas que proporcionem um desempenho superior ao processo mesmo estando submetido a essas particularidades desafiadoras, como a utilização de diferentes condições de lubrificarrefrigeração.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ADENTIS. **Korony na implantach**. Disponível em: <<https://adentis.pl/uslugi-i-eny/ortodoncjabez-ekstrakcji/protetyka/korony-na-implantach>>.
- AFAZOV, S. M.; RATCHEV, S. M.; SEGAL, J. Modelling and simulation of micro-milling cutting forces. **Journal of Materials Processing Technology**. v. 210. p.2154-2162. Elsevier, 2010.
- ARAMCHAROEN, A.; MATIVENGA, P. T. Size effect and tool geometry in micromilling of tool steel. **Precision Engineering**. v. 33. p. 402-407. Elsevier, 2009.
- BALDO, D. **Estudo do microfresamento da liga de titânio TI-6Al-4V utilizando análise de sinais de força e emissão acústica**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal de São João Del-Rey, São João Del-Rey, MG, 2013.
- BISSACCO, G.; HANSEN, H. N.; DE CHIFFRE, L. Micromilling of hardened tool steel for mould making applications. **Journal of Materials Processing Technology**, vol. 167, nº 2, pp. 201-207, 2005.
- CÂMARA, M. A. et al. State of the art on micromilling of materials, a review. **ScienceDirect**, v. 28, n. 8, p. 673-685, 2012.
- CHAE, J.; PARK, S. S.; FREIHEIT, T. Investigation of micro-cutting operations. **International Journal of Machine Tools & Manufacture**, v.46, n.3-4, p.313-332, 2006.
- CREIGHTON, E. et al. Analysis of thermal errors in a high-speed micro-milling spindle. **International Journal of Machine Tools & Manufacture**, v. 50. p.386-393. Elsevier, 2010.
- DINIZ, A. E.; MARCONDES, F.C.; COPPINI, N. L. (2009). **Tecnologia da usinagem dos materiais**. 7ª ed. São Paulo: Artliber.
- DORNFELD, D. A. Process monitoring and control for precision manufacturing, **Manufacturing Automation**. University California. 1999.
- DORNFELD, D.; MIN, S.; TAKEUCHI, Y. Recent advances in mechanical micromachining. **CIRP Annals-Manufacturing Technology**, vol. 55, nº 2, pp. 745-768, 2006.
- EGASHIRA, K.; S. H., TAKEMOTO S.; MASAO, Y. Fabrication and cutting performance of cemented tungsten carbide micro-cutting tools, **Precision Engineering**, vol. 35, nº 4, pp. 547-553, 2011.
- FERRARESI, D.; RUFFINO, R. T.; PALLEROSI, C. A. **Usinagem dos metais: processo de fresamento**, 3ª ed. São Paulo: ABM, 1974.
- FILIZ, S. et al. Micromilling of microbarbs for medical implants, **International Journal of Machine Tools & Manufacture**, v. 48. p. 459-472. Elsevier, 2008.
- HUNG, C.; LU, M. Model development for tool wear effect on AE signal generation in micromilling, **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 66. p. 1845-1858. Springer, 2013.
- Instituto NCB, **As lentes de Fresnel (ART148)**, 2010. Disponível em: <<https://www.newtoncbraga.com.br/index.php/como-funciona/1024-as-lentes-de-fresnel-art148.html>>.
- JANISEVICIUS, R. G. **Apostila SEM 0534 – Processos de Fabricação Mecânica**, Departamento de Engenharia Mecânica, Escola de Engenharia, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2016.
- JEONG, Y. et al. Deburring microfeatures using micro-EDM, **Journal of materials processing technology**, vol. 209, nº 14, pp. 5399-5406, 2009.
- JI, C. et al. A numeric investigation of friction behaviors along tool/chip interface in nanometric machining of a single crystal copper structure, **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, vol. 68, nº 1-4, pp. 365-374, 2013.
- KISWANTO, G.; ZARIATIN, D. L.; KO, T. J. The effect of spindle speed, feedrate and machining time to the surface roughness and burr formation of Aluminum Alloy 1100 in micro milling operation, **Journal of Manufacturing Processes**, 2014.
- KOMATSU, T.; YOSHINO, T.; TORIZUKA, M. T. Effect of crystal grain size in stainless steel on

- cutting process in micromilling, **Procedia CIRP**, vol. 1, pp. 150-155, 2012.
- LEE, D. E. et al. Precision manufacturing process monitoring with acoustic emission, **International Journal of Machine Tools & Manufacture**, v. 46. p.176-188. Elsevier, 2006.
- LEKKALA, R. et al. Characterization and modeling of burr formation in micro-end milling, **Precision Engineering**, vol. 35, n° 4, pp. 625-637, 2011.
- LI, K. M.; CHOU, S. Y. Experimental evaluation of minimum quantity lubrication in near micro-milling, **Journal of Materials Processing Technology**, vol. 210, n° 15, pp. 2163-2170, 2010.
- LIPTAI, R. G. et al. Acoustic emission techniques research, **Proceedings of the Symposium on Advanced Experimental Techniques in the Mechanics of Materials**, San Antonio, Texas. 1970.
- LIU, Z.; WANG, X. Characteristic of surface profile and roughness in micro turn-milling of aluminum alloy 2A12, **International Technology and Innovation Conference**, p. 1-4, 2009.
- NEXUS. **Market Analysis III**, 2009. Disponível em <<http://www.nexus-mems.com>>.
- OKAZAKI, Y.; MISHIMA, N.; ASHIDA, K. Microfactory – concept, history and developments, **Journal of Manufacturing Science and Engineering**, v.126, p. 837-844, 2004.
- POPOV, K. et al. The effects of material microstructure in micro-milling, **Proceedings of the 2nd International Conference on Multi-Material Micro Manufacture**, pp. 127-130, 2006.
- PORTO, A. J. V. **Usinagem de ultraprecisão**, São Carlos, S.P. RiMa, FAPESP, 2004.
- RAHMAN, M. A. et al. A multiprocess machine tool for compound micromachining, **International Journal of Machine Tools & Manufacture**, v.50, n.4, p.344-356, 2010.
- RAHNAMA, R.; SAJJADI, M.; PARK, S. S. Chatter suppression in micro end milling with process damping, **Journal of Materials Processing Technology**, v.209. p.5766-5776. Elsevier, 2009.
- RIOMAR, A.; BARBOSA, E.; BENINI, L. Conceitos Básicos de Microusinagem, **III Semana acadêmica de Engenharia Mecânica e de Produção**, Universidade Federal de Viçosa, 2018.
- SAPTAJI, K.; SUBBIAH, S.; DHUPIA, J. S. Effect of side edge angle and effective rake angle on top burrs in micro-milling, **Precision Engineering**, vol. 36, n° 3, pp. 444-450, 2012.
- SHAW, M. C. **Metal cutting principles**, Oxford University Press. 1984. Reprinted 1997. 594p.
- SOUZA, A. J. **Apostila ENG03343 – Processos de Fabricação por Usinagem**, Departamento de Engenharia Mecânica, Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2016.
- TAKACS, M.; VERÖ, B.; MESZAROS, I. Micromilling of metallic materials, **Journal of Materials Processing Technology**, vol. 138, n° 1, pp. 152-155, 2003.
- TRENT, E. M.; WRIGHT, P. K. **Metal cutting**, 4th ed, Boston: Butterworth-Heinemann, 2000.
- VAZQUEZ, E. et al. Analyzing effects of cooling and lubrication conditions in micromilling of Ti6Al4V, **Journal of Cleaner Production**, Volume 87, pages 906-913, 2015.
- WANG, J. et al. Micro milling technologies for MEMS, **International Conference on Perspective Technologies and Methods in Design**, p. 86-95, 2007.
- Wayken Rapid Manufacturing**, 2020. Disponível em: <<https://waykenrm.com/blogs/micro-milling>>.
- WENTIAN, S.; YUDE, L. Fabrication of micro gear based on micro-milling, **International Conference on Computer, Mechatronics**, v. 1. p. 608-611, 2010
- WEULE, H.; HÜNTRUP, V.; TRITSCHLER, H. Micro-cutting of steel to meet new requirements in miniaturization, **CIRP Annals - Manufacturing Technology**, v. 50, p. 61-64, 2001.