

IMPORTÂNCIA E INFLUÊNCIA DAS MÁQUINAS-FERRAMENTAS NO PROCESSO DE MICROUSINAGEM: UMA REVISÃO

Letícia Cristina Silva, Universidade Federal de Uberlândia, leticia.cristina@ufu.br

Márcio Bacci da Silva, Universidade Federal de Uberlândia, mbacci@mecanica.ufu.br

Resumo: Com o constante desenvolvimento da tecnologia, a necessidade de microcomponentes tem se elevado bastante nos últimos anos. A utilização de máquinas-ferramentas precisas é um método efetivo de se produzir microcomponentes com características tridimensionais. O tamanho e a qualidade dos microprodutos dependerão diretamente das propriedades das máquinas-ferramentas utilizadas na sua produção, incluindo a sua precisão geral e seu desempenho dinâmico. A qualidade e as capacidades da máquina-ferramenta são de extrema importância para condições específicas do produto, tais como: tamanho, precisão, rugosidade superficial e capacidade de repetição dimensional. Assim, o objetivo deste trabalho é apresentar uma revisão sobre máquinas-ferramentas, demonstrando sua importância, seus problemas e influência no processo de microusinagem.

Palavras-chave: microusinagem, máquina-ferramenta, vibração, desbalanceamento.

1. INTRODUÇÃO

O prefixo “micro” utilizado em microusinagem indica “micrometro” e representa a faixa de dimensões das ferramentas utilizadas no processo, de 1 μm a 999 μm de acordo com Masuzawa (2000). Sendo considerada a principal característica o fato de que a espessura de corte e o tamanho do grão do material da peça a usinar tenham dimensões comparáveis ao raio da cunha cortante da ferramenta de microusinagem (Câmara et al., 2012).

O processo de microcorte (microusinagem) é capaz de usinar vários tipos de materiais, incluindo metais, polímeros, cerâmicas, entre outros, atendendo satisfatoriamente aos requisitos de precisão e rugosidade superficial. Assim, a microusinagem mecânica tem encontrado aplicações em diversas áreas que necessitam de microcomponentes (Cheng e Huo, 2013). Alguns exemplos de microcomponentes usinados são apresentados na Fig. (1).



Figura 1: (a) Canais microfresados com paredes em degrau, (b) componente neurovascular, (c) microengrenagem. (Liu et al., 2004).

Neste contexto, o microfresamento está entre os principais processos de fabricação que permitem o desenvolvimento de componentes que possuem dimensões micrométricas (Câmara et al., 2012). Sendo o fresamento (adaptado para escalas micrométricas) uma alternativa viável de produção, já que este apresenta uma grande versatilidade entre as diversas operações de usinagem, permitindo a fabricação de uma ampla gama de microprodutos (Takács, Vero e Mészáros, 2003).

Porém, utilizar os processos já conhecidos de usinagem convencional adaptando-os para a microusinagem requer o entendimento de certas limitações e dos diferentes fenômenos envolvidos, não sendo possível uma modelagem de processo baseada apenas na redução das escalas das operações (Chae, Park e Freiheit, 2006).

Portanto a microusinagem é cinematicamente semelhante ao corte convencional apesar de não ser uma simples escala do macrocorte (Cheng e Huo, 2013). Ao contrário deste, no microcorte uma série de questões críticas, tais como o efeito do raio da aresta de corte, o ângulo de saída negativo, contato ferramenta-peça na superfície de folga, espessura mínima de corte e o efeito da microestrutura, tornam-se proeminentes.

O desempenho do processo de microcorte é fortemente dependente de suas tecnologias fundamentais, ou seja, máquinas-ferramentas adequadas, microferramentas e sistemas de medição e inspeção (Cheng e Huo, 2013). Destacando-se principalmente como um dos fatores fundamentais, o desempenho de máquinas-ferramentas, que são responsáveis diretamente pela precisão de forma e rugosidade superficial alcançável dos componentes (Zhang, Wang e Zhu, 2015).

2. MÁQUINAS-FERRAMENTAS

Dois tipos de máquinas-ferramenta são normalmente utilizadas nos processos de microusinagem: máquinas tradicionais ou centros de usinagem de alta precisão (mesmo sendo originalmente fabricadas para processos macro); e mini ou micromáquinas (fabricadas especialmente para estes processos), muitas vezes construídas até mesmo pelos próprios pesquisadores (Chae, Park e Freiheit, 2006; Cheng e Huo, 2013).

De acordo com Cheng e Huo (2013), as máquinas-ferramentas fabricadas especialmente para usinagem de alta precisão, são consideradas ótimas para processos micro, pois além de terem alta precisão, são equipadas com sistemas de controle e diversos sensores, são capazes de atingir altas rotações, além de possuírem grande rigidez. Uma desvantagem deste tipo de máquina é que, se forem utilizadas apenas para microusinagem, elas podem significar um custo muito elevado por não serem fabricadas especificamente para este fim.

Existe uma série de fresadoras e tornos industriais de ultra-precisão disponíveis para a fabricação de componentes de precisão. A maior parte deles geralmente é voltada para outros mercados e não são totalmente adequados para a fabricação de microcomponentes de precisão. Na Figura (2) é mostrado alguns exemplos de máquinas industriais de ultra-precisão com capacidade de microcorte, disponíveis comercialmente.



Figura 2: Máquinas-ferramentas comerciais de ultra precisão: (a) DT-110; (b) W-408 MT; (c) Hyper2j; (d) Kugler; (e) Kern; (f) Mori Seiki. (Adaptado de Chae, Park e Freiheit, 2006).

Algumas destas máquinas necessitam de grande espaço para instalação, cerca de 5 m² a 7 m². Seu alto custo e baixa flexibilidade limitam a sua aplicação à microcomponentes de geometrias simples e de alto valor agregado, como componentes ópticos (Cheng e Huo, 2013).

Após o desenvolvimento das máquinas-ferramentas convencionais por comando numérico que deixaram os processos de fabricação mais flexíveis e precisos, com a evolução dos materiais das ferramentas e da peça de trabalho surge à necessidade de avanço das pesquisas na área de fabricação. Anos mais tarde, devido à redução das peças e das ferramentas de corte, houve a necessidade de redução dimensional das máquinas-ferramentas para a produção de microcomponentes. Assim, as mini ou micromáquinas de alta precisão (fabricadas especificamente para microprocessos) ganharam espaço nas últimas décadas (Cheng e Huo, 2013).

Numerosos esforços de investigação têm sido realizados para desenvolver máquinas miniaturizadas ou microfábricas para a fabricação de microcomponentes de precisão. Alguns estudos realizados mostram máquinas-ferramentas miniaturizadas, podendo chegar ao tamanho da mão de uma pessoa adulta, como apresentado na Fig. (3). A grande vantagem deste tipo de equipamento é que suas dimensões reduzidas possibilitam a implantação destes em qualquer fábrica ou local de produção, podendo ainda ser adequadas para a produção em campo devido a sua maior acessibilidade em comparação com as máquinas-ferramentas convencionais (Chae, Park e Freiheit, 2006).

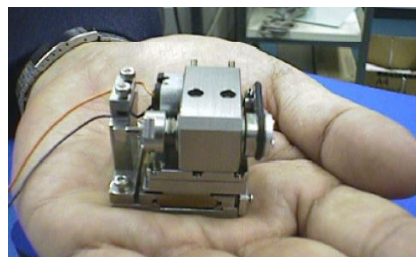


Figura 3: Minitorno. (Chae, Park e Freiheit, 2006)

Existem também vários outros benefícios na utilização de minimáquinas, como: redução de energia, de espaço, de material. De acordo com Chae, Park e Freiheit (2006), como elas são muito menores que as máquinas de alta precisão, um volume muito menor de material é gasto na sua fabricação, o que viabiliza a utilização de materiais mais caros e eficazes.

Outra vantagem é que máquinas-ferramentas menores são menos afetadas por flutuações ambientais, tais como mudanças de temperatura, pressão e umidade em comparação com suas versões em macroescala convencionais. A massa reduzida da miniatura reduz a força de inércia necessária para acionar o sistema máquina-ferramenta, consumindo assim, menos energia e ainda proporcionando maior exatidão de posicionamento. Por isso, a utilização de máquinas-ferramentas em miniatura também é vista como tendo imenso potencial para a redução dos custos de produção (Cheng e Huo, 2013).

Porém, alguns detalhes em relação a estes equipamentos ainda precisam ser resolvidos e estudados. Por exemplo, as minimáquinas precisam ser equipadas de diversos sensores, que precisam também atender a critérios de dimensões bastante reduzidos, o que acaba sendo um fator complicatório. Além disso, existem ainda problemas relacionados à rigidez e vibração das minimáquinas (Chae, Park e Freiheit, 2006).

Outro fator que também precisa ser investigado, são os efeitos sobre a saúde no processo de microusinagem (escala industrial). Em muitos casos talvez seja necessário a realização das operações em ambientes fechados com sistemas de remoção de poeira. À medida que os cavacos de microusinagem se tornam menores, a micro-poeira no ar pode causar riscos à saúde respiratória. O tamanho típico de micro-poeira é menor que alguns micrômetros e portanto, a adoção de sistemas apropriados de sucção e filtragem pode ser um componente essencial dos processos de microusinagem (Chae, Park e Freiheit, 2006).

2.1. Características e detalhes importantes

Com a redução da escala na microusinagem, a primeira diferença a ser percebida é a percepção do operador sobre as condições de corte. Questões simples na escala macro tornam-se um desafio na microusinagem, como por exemplo a aproximação da peça que necessita de ampliação ótica e sensores de contato, além de não se conseguir distinguir situações de instabilidade e esforços excessivos da ferramenta. De acordo com Bao e Tansel (2000), por causa do tamanho minúsculo, é muito difícil perceber as arestas de corte danificadas e até mesmo um eixo quebrado, o que pode levar a perda de muitas horas de usinagem se a falha da ferramenta não for detectada a tempo.

Neste contexto, as máquinas-ferramentas tem importância fundamental para o processo, visto que, um mal desempenho, baixa precisão e eventuais problemas (operacionais ou mecânicos) por menores que sejam, tem um impacto muito grande para a microusinagem por se tratar de um processo de extrema precisão. De acordo com Chae, Park e Freiheit (2006), a precisão e pequenas características dos microcomponentes são dependentes das máquinas-ferramentas que os produzem. Assim, o tamanho e a qualidade dos microcomponentes dependem das propriedades da máquina-ferramenta usada na produção, devendo a máquina-ferramenta ter capacidade e qualidade para atender as necessidades de produção, tais como: precisão, qualidade superficial e repetibilidade dimensional.

Para tanto, alguns elementos são necessários na composição de uma máquina-ferramenta de precisão. Huo e Cheng (2008) afirmam que uma máquina-ferramenta deve conter cinco subsistemas principais:

- Estrutura mecânica, composta pela base e coluna da máquina;
- Eixo-árvores e guias, responsáveis pela rotação e movimentação dos eixos;
- Ferramenta e sistema de fixação da mesma;
- Controle e monitoramento;
- Medição e inspeção.

Chae, Park e Freiheit (2006), reforçam este conceito destacando que as três principais partes de uma máquina-ferramenta são: o eixo-árvore com alta rotação, sistema de posicionamento preciso e um controlador.

De acordo com Câmara et al. (2012) as máquinas-ferramentas utilizadas no processo de microusinagem devem atender aos seguintes requisitos:

- Alta rigidez estática e dinâmica para evitar alto nível de vibração durante o funcionamento da máquina;
- Dispositivos de controle e alimentação com alta precisão;
- Estrutura fabricada de material com alta estabilidade térmica;
- Compensação de erros de posicionamento estáticos e dinâmicos;
- Os eixos responsáveis pelo avanço e profundidade de corte devem ser alimentados, preferencialmente, por motores lineares com precisão de $0,1 \mu\text{m}$;
- O desalinhamento do eixo principal (eixo Z) deve ser inferior a $1 \mu\text{m}$ para evitar o desalinhamento da ferramenta;
- Estabilidade térmica. (Dornfeld, Min e Takeuchi, 2006)

2.1.1 Alta rotação

Para que seja possível obter velocidades de corte na mesma ordem de grandeza do processo macro, a rotação da ferramenta deve ser muito mais alta na microusinagem. Segundo Câmara et al. (2012), afim de atingir as velocidades de

corte necessárias, utilizando fresas com diâmetros inferiores a 1 mm, altas velocidades de rotação são necessários. Isto pode ser conseguido através da adaptação da máquina-ferramenta para atingir velocidades de rotação tão elevadas como 80.000 rpm ou por máquinas dedicadas que podem atingir até 100.000 rpm. Jackson (2006) vai além deste conceito, afirmando que espera-se que a rotação da ferramenta de corte no microfresamento chegue a 1.000.000 rpm, porém a rotação vai depender do diâmetro e da velocidade de corte da ferramenta. Heshmat (2011) patenteou uma micromáquina que alimentada por um motor elétrico e/ou uma unidade de turbina a gás tem capacidade de rotação de 1.500.000 rpm. Assim, Jackson (2006) conclui que rodar a ferramenta à altas velocidades reduz rapidamente as forças de corte, o que produz uma maior qualidade do corte de modo que o pós-processamento não é necessário.

Se uma ferramenta com diâmetro de 10 mm utiliza uma rotação de cerca de 1.000 rpm com velocidade de 30 m/min, uma microfresa de 300 μm com a mesma velocidade de corte, necessita de mais de 30.000 rpm, portanto, a máquina-ferramenta precisa ser capaz de atingir altas rotações. Como a tendência é de se utilizar ferramentas com diâmetros cada vez menores, estudos em microusinagem utilizam normalmente velocidades de rotação superiores a 20.000 rpm (Câmara et al., 2012).

Independente da peça de trabalho e do material da ferramenta empregados, pode-se perceber que uma grande parte dos trabalhos de pesquisa são realizadas em velocidades abaixo da faixa recomendada de corte, conforme Fig. (4).

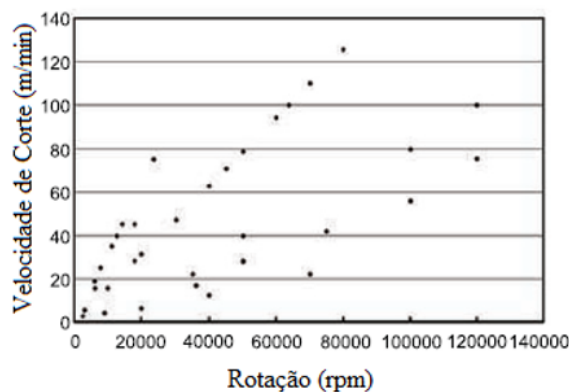


Figura 4: Rotação e velocidades de corte correspondentes, normalmente utilizadas no microfresamento. (Adaptado de Câmara et al., 2012)

Robinson (2007) desejava utilizar uma velocidade de corte de 105 m/min, afim de evitar a formação de rebarbas numa liga de alumínio, utilizando uma ferramenta de 50 μm . Tal velocidade de corte elevada necessitaria uma rotação de cerca de 670.000 rpm, o que foi impossível de realizar porque sua ferramenta estava propensa a quebrar utilizando esta velocidade.

Em relação ao avanço por dente, valores de 5 μm para baixo são mais utilizados em estudos, como apresentado na Fig. (5), ou seja, um grande número de trabalhos foram conduzidos utilizando avanço por dente menor que a dimensão do raio da aresta de corte, isto é, sob condições em que tem lugar o efeito ploughing. Segundo Bhushan (2001), o efeito ploughing (ou sulcamento) ocorre quando o material (peça de trabalho) é deslocado para os lados, ocorrendo sob cargas leves, não resultando perda de material elevada. Ou ainda, de acordo com Cheng e Huo (2013), é quando uma pequena quantidade de cavacos são formados, com a deformação elástica ainda ocorrendo.

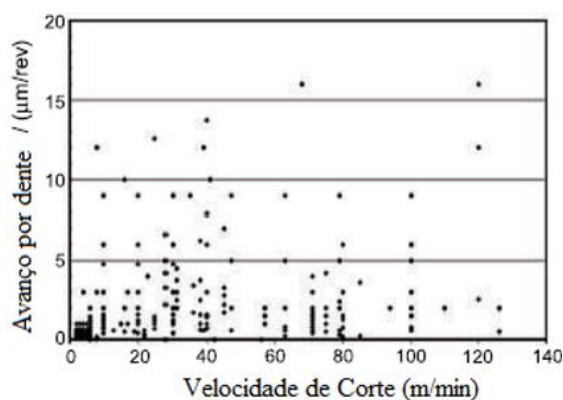


Figura 5: Velocidades de corte típicas e Avanço por dente utilizadas no microfresamento. (Adaptado de Câmara et al., 2012)

De acordo com Özel et al. (2007) apesar da rotação ser necessariamente maior no processo de microfresamento, todos os outros parâmetros como profundidade de corte, avanço e penetração de trabalho são muito menores. Estes parâmetros de usinagem e tamanho do grão de determinado material da peça de trabalho são análogos ao raio de corte

da ferramenta. Assim, não se pode comparar fenômenos da macrousinagem tradicional com os da microusinagem, simplesmente considerando uma redução de escala. Para cada fenômeno ou parâmetro (força de corte, potência de corte, temperatura durante a usinagem, formação de rebarbas, etc.) é necessário realizar uma análise individual e detalhada para conclusões sobre seu comportamento e a influência nas condições de corte.

2.2. Vibração (Chatter)

De acordo com Siddhpuraa e Pauroballya (2012), as vibrações (também chamadas de efeito Chatter) estão presentes em quase todas as operações de corte e são um grande obstáculo para se alcançar a produtividade desejada. Segundo Zhang (2015), a vibração é um fenômeno físico, naturalmente existente na microusinagem, sendo que a vibração relativa entre a ferramenta e peça de trabalho com uma pequena amplitude poderia causar a deterioração da superfície usinada. Ou ainda, de acordo com Chae, Park e Freihet (2006) a vibração excessiva pode levar a uma falha catastrófica.

Esta natureza catastrófica da vibração, cria inúmeros problemas, como um acabamento superficial deficiente, ruído excessivo, quebra de componentes da máquina-ferramenta, redução da vida útil da ferramenta e produtividade (Chae, Park e Freihet, 2006; Siddhpuraa e Pauroballya, 2012). As vibrações crescentes elevam as componentes da força de usinagem e podem provocar desgaste excessivo ou quebra da ferramenta, prejudicando a qualidade da superfície e precisão dimensional da peça (Chae, Park e Freihet, 2006).

O efeito Chatter foi identificado pela primeira vez como uma limitação da produtividade de usinagem por Frederick Winslow Taylor, que realizou estudos extensivos sobre os processos de corte de metal já em 1800. Através do livro “On the art of cutting metals” ele divulgou os resultados encontrados, afirmando também que a vibração é o “mais obscuro e delicado problema, entre todos enfrentados pelo mecânico”.

Siddhpuraa e Pauroballya (2012) afirmam que a propriedade característica mais importante da vibração é que ela não é induzida por forças periódicas externas, mas sim que as forças que a levam a existir e a mantê-la são geradas no próprio processo vibratório (processo de corte dinâmico).

De acordo com Tobias (1961), em um processo de usinagem, três tipos diferentes de vibrações mecânicas estão presentes devido à falta de rigidez do sistema de máquina-ferramenta (ferramenta, suporte de ferramenta e peça de trabalho), estas são: vibrações livres, vibrações forçadas e vibrações auto-excitadas. As vibrações livres são induzidas por choque e as vibrações forçadas são devidas a efeitos de desequilíbrio em conjuntos de máquinas-ferramenta como engrenagens, rolamentos, eixos.

Santos (2016) e Ziberov et al. (2016) utilizaram em seus experimentos uma microfresadora CNC de quatro eixos, com uma base de granito específica para evitar que as vibrações mecânicas interfiram na execução dos ensaios. Esta mesma máquina-ferramenta está sob uma mesa inercial especialmente projetada, que diminui a influência de vibrações de fontes externas, garantindo a rigidez do sistema.

Assim, as vibrações livres e forçadas podem ser facilmente identificadas e eliminadas, já as vibrações auto-excitadas ainda não são totalmente compreendidas devido à sua natureza complexa. De acordo com Tobias (1961), estas são as mais prejudiciais para qualquer processo de usinagem.

Segundo Wiercigroch e Budak (2001), as vibrações auto-excitadas são geralmente classificadas em vibrações primárias e vibração secundárias. A vibração primária é causada pelo atrito entre a peça e ferramenta, efeitos termomecânicos ou pelo modo de acoplamento. A vibração secundária é causada pela regeneração da superfície ondulada na peça de trabalho, sendo esta a mais destrutiva entre todas as outras vibrações. Portanto, a maior parte das pesquisas realizadas nesta área tentam evitar a ocorrência da vibração regenerativa, predizer sua ocorrência o mais cedo possível ou ainda detectá-la assim que ocorrer.

Venkatesh et al. (2016) afirmam que o grau de vibrações afeta expressivamente inclusive a forma e o tamanho dos cavacos formados no processo de microusinagem. Na Figura (6) é mostrada a formação de cavacos sob diferentes condições.

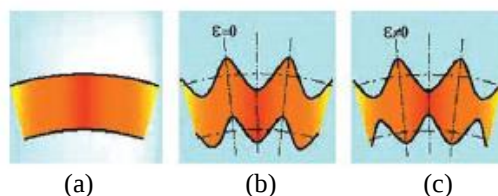


Figura 6: Formação de diferentes tipos de cavacos: (a) sem vibrações (b) durante vibrações forçadas (c) sob vibração regenerativa. (Venkatesh et al., 2016).

Por todas estas razões, uma previsão exata da dinâmica estrutural geral do sistema de máquina-ferramenta é fundamental para evitar a vibração. No entanto, a medição experimental da dinâmica da estrutura da máquina-ferramenta na ponta da ferramenta (conforme realizado na macro usinagem) não é viável para microferramentas devido à fragilidade das mesmas (Chae, Park e Freihet, 2006).

As altas velocidades necessárias à microusinagem, também apresentam novos desafios. A velocidades mais elevadas, a dinâmica das máquinas-ferramentas muda, com um eixo desequilibrado produzindo efeitos centrífugos e giroscópicos (Chae, Park e Freihet, 2006).

Teste de máquina com melhorias contínuas na estrutura para aumentar a rigidez dinâmica é atualmente a melhor maneira de combater a vibração. De acordo com Siddhpura e Pauroballya (2012) é melhor evitar a vibração antes que ela ocorra, interrompendo o efeito regenerativo, conforme discutido anteriormente. Se não puder ser evitada, ela deve ser suprimida passivamente, projetando/modificando cuidadosamente a estrutura da máquina-ferramenta, ou ainda implementando uma técnica efetiva de controle ativo, simultaneamente ao processo de corte.

2.3. Desbalanceamento

O sistema de fixação da ferramenta na máquina é um fator importante no processo de microfresamento. Pequenos erros de desalinhamento e de fabricação da ferramenta, conforme observado na Fig. (7), tipicamente da ordem de micrômetros, tem um efeito pequeno (frequentemente negligenciável) na precisão dimensional da característica usinada no processo em macroescala convencional, porém tornam-se expressivos na microusinagem quando comparados a escala do processo (Lee e Dornfeld, 2004).

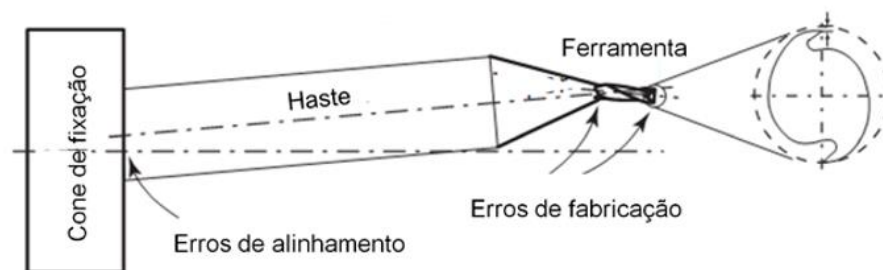


Figura 7: Principais erros de desbalanceamento no microfresamento. (Adaptado de Jun et al., 2007)

O desbalanceamento da ferramenta, geralmente causado pelo alinhamento imperfeito da ferramenta, incompatibilidade entre ferramenta e máquina-ferramenta, geometria assimétrica da ferramenta e vibração da ferramenta durante a usinagem, é um fator indesejado pois produz uma força de inércia (centrífuga) no suporte de fixação ferramenta-máquina durante o processo de corte, influenciando diretamente no acabamento superficial e na diminuição do tempo de vida dos rolamentos e do eixo árvore. A força centrífuga aumenta linearmente com o desbalanceamento e quadraticamente com a velocidade. Para compensar as forças centrífugas indesejáveis, a distribuição de massa deve ser simétrica na ferramenta e suporte (Lee e Dornfeld, 2004; Arai, 2008).

Outro erro proveniente do desbalanceamento é a obtenção de um corte maior que o desejado através da escolha do diâmetro da ferramenta, conforme ilustrado na Fig. (8). Além disso, em uma ferramenta de duas facas, uma aresta de corte pode remover mais material do que a outra, causando uma rugosidade maior e vibrações indesejadas.

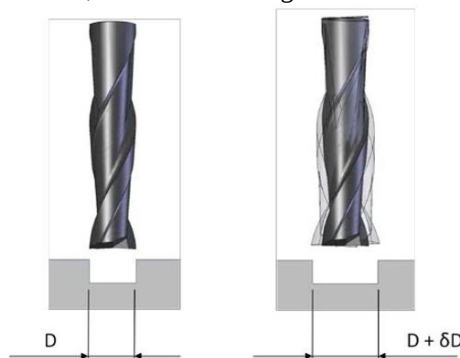


Figura 8: Comparação do fresamento de um canal ideal e um fresamento com desbalanceamento. (Adaptado de Lee e Dornfeld, 2004; Arai, 2008).

A deflexão proveniente da atuação da força de corte radial que desvia a ferramenta de corte, conforme Fig.(8), pode ser reduzida através da minimização do comprimento da ferramenta e do porta-ferramentas, uso de um suporte de ferramenta mais rígido, uso de um porta-ferramentas e ferramenta feitos de materiais com módulos de elasticidade mais elevados. Porém, infelizmente, o desbalanceamento é primeiramente uma responsabilidade do projeto da máquina-ferramenta e não pode ser extremamente melhorado mudando apenas os parâmetros de usinagem (Lee e Dornfeld, 2004).

3. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da UFU, ao CNPq, CAPES e FAPEMIG pelo apoio financeiro.

4. REFERÊNCIAS

- Arai, R. “Estudo teórico-experimental do efeito da flexão da ferramenta no processo de microfresamento”. Dissertação de Mestrado, USP, 2008.
- Bao, W., Tansel, I. “Modeling micro-end-milling operations. Part I: analytical cutting force model”, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, v. 40, n. 15, pp. 2155–2173, 2000.
- Bhushan, B. “Modern Tribology Handbook, Volume One: Principles of Tribology and Volume Two: Materials, Coatings, and Industrial Applications”, edited by Bharat Bhushan. 2000 N.W. Corporate Blvd., Boca Raton, USA, CRC Press LLC, Vol. 1, 765pp., Vol. 2, 1690pp, 2001. ISBN: 0-8493-8403-6
- Câmara, M. A., Rubio, J. C. C., Abrão, A. M.; Davim, J.P. “State of the art on micromilling of materials, a review”. *Journal of Materials Science & Technology*, 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 and Manufacture*, v. 46 (3-4), p. 313-332, 2006.
- Cheng, K., Huo, D. “Micro-Cutting – Fundamentals and Applications”. Ed. Wiley, United Kingdom, 2013. ISBN: 978-0-470-97287-8
- Dornfeld, D., Min, S., Takeuchi, Y. “Recent advances in mechanical micromachining”. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, v.55, n. 2, p.745-768, 2006.
- Huo, D., Cheng, K. “A dynamics-driven approach to precision machines design for micro-manufacturing and its implementation perspectives”. *Journal of Engineering Manufacture*, v.222, n. 1, pp. 1-13, 2008.
- Heshmat, H. US Patent WO2011044110 A3, de 13/10/2011, com International Publication Number PCT/US2010/051451, de 05/10/2010, sob o título “High speed machining center”.
- Jackson, M. J. “Microfabrication and Nanomanufacturing”, CRC Press, Boca Raton – FL, 2006, 388p, EUA.
- Jun, B. G., Bourne, K., Devor, R. E., Kapoor, S. G. “Estimation of effective error parameters in high-speed micro-endmilling”. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. V. 126, n. 9, p. 1447-1454, 2007.
- Lee, K., Dornfeld, D. A. “A Study of Surface Roughness in the Micro-End-Milling Process”. *Laboratory for Manufacturing and Sustainability. Consortium on Deburring and Edge Finishing*, 2004.
- Liu, X., Devor, R. E., Kapoor, S. G., Ehmann, K. F. “The Mechanics of Machining at the Microscale: Assessment of the Current State of the Science”. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, v.126, p. 666-678, 2004.
- Masuzawa, T. “State of the art of micromachining”. *CIRP Annals – Manufacturing Technology*, Amsterdam, v. 49, n. 2, p. 473-488, 2000.
- Özel T, Liu X and Dhanorker A. Modeling and Simulation of Micro-Milling Process. In: *Proc. of the 4th International Conference and Exhibition on Design and Production of Machines and Dies/Molds*, 2007, pp. 167-174.
- Robinson, G.M. “Wear of nanostructured coated cutting tools during mixed scale machining”. Ph.D. Thesis, Purdue University, USA, 2007.
- Santos, A.G. “Microfresamento de Aço Inoxidável Duplex UNS S32205 com Ferramentas de Metal Duro Revestidas com Nitreto de Titânio”. Dissertação de Mestrado, UFU, 2016.
- Siddhpuraa, M., Pauroballya, R. “A review of chatter vibration research in turning”. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, v. 61, p. 27-47, 2012.
- Takacs, M., Vero, B., Meszaros, I. “Micromilling of metallic materials.” *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 138, nº 1, pp. 152-155, 2003.
- Tobias, S. A. “Machine tool vibration research”. *International Journal of Machine Tool Design and Research*, v. 1, p. 1–14, 1961.
- Venkatesh, V., Swain, N., Srinivas, G., Kumar, P., Barshilia, H. C. “Review on the machining characteristics and research prospects of conventional microscale machining operations”. *Materials and Manufacturing Processes*, 2016.
- Wiercigroch, M., Budak, E. “Sources of nonlinearities, chatter generation and suppression in metal cutting”. *Philosophical Transactions of the Royal Society a Mathematical Physical and Engineering Sciences*. v. 359, p. 663-693, 2001.
- Zhang, S.J., To, S., Wang, S.J., Zhu, Z.W. “A review of surface roughness generation in ultra-precision machining”. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, v. 91, p. 76-95, 2015.
- Ziberov, M., Silva, M. B., Jackson, M. J., Hung, W. N. P. “Effect of Cutting Fluid on Micromilling of Ti-6Al-4V Titanium Alloy”. *Procedia Manufacturing*. v. 5, p. 332-347, 2016.

5. DIREITOS AUTORAIS

Os autores são os únicos responsáveis pelas informações incluídas neste trabalho.