



III Semana Acadêmica de Engenharia Mecânica e de Produção

## “ENGENHARIA ALÉM DO TRADICIONAL E O IMPACTO DA INDÚSTRIA 4.0”

24 a 26 de setembro de 2018 no campus Viçosa da UFV  
Departamento de Engenharia de Produção e Mecânica – DEP  
Universidade Federal de Viçosa – UFV

### CONCEITOS BÁSICOS DE MICROUSINAGEM: UMA REVISÃO

**Ainá Winnie Carlos Riomar, Esther Samila Santana Barbosa, Lucas Benini**

Universidade Federal de Viçosa, Departamento de Engenharia Mecânica e de Produção  
Avenida Peter Henry Rolfs, s/n – 36570-000 – Viçosa – Minas Gerais  
aina.winnie@gmail.com, estherssbarbosa@gmail.com, lucas.benini@ufv.br

**Resumo:** A usinagem engloba os principais processos de fabricação utilizados na indústria atualmente. A microusinagem vem como um desenvolvimento destes processos, visando a produção de microcomponentes. Este trabalho objetiva apresentar uma revisão bibliográfica sobre os principais processos de microusinagem mecânica, bem como os conceitos de microferramentas e micromáquinas-ferramentas. Os estudos realizados demonstram que a usinagem em microescala representa um grande avanço tecnológico, trazendo benefícios que ainda não foram alcançados por outros processos. Porém a grande estabilidade alcançada pelas técnicas convencionais ainda são um empecilho para a consolidação e difusão da microusinagem na indústria.

Palavras-chave: microusinagem, microtorneamento, microfresamento, microfuração.

## 1. INTRODUÇÃO

Usinagem foi definida por Ferraresi (1990) como processos que conferem forma, dimensão ou acabamento à uma peça removendo material sob a forma de cavaco (porção de material que não possui geometria definida). A mecânica, termodinâmica e as propriedades dos materiais são a base para o estudo da usinagem.

Com o desenvolvimento humano surgiram necessidades de modernização e adequação dos bens de consumo às exigências da vida moderna. Para garantir essa evolução a indústria manufatureira precisou investir no aprimoramento das técnicas de usinagem até então existentes. Estima-se que 80% dos furos, 70% das engrenagens e 100% dos pinos médico-odontológicos advém desta operação (Krelling, 2013; Stoeterau, 2006).

Uma dessas necessidades está ligada às solicitações do mercado por produtos de tamanho cada vez mais reduzido e de alta complexidade, como nos casos dos aparelhos ortopédicos, ortodônticos, microcomputadores e celulares (Masuzawa, 2000). Os motivos que fomentam a busca pela miniaturização de componentes são: novas aplicações, melhores desempenhos, menores custos e alta qualidade (Dornfeld *et al.*, 2006).

Um dos processos utilizados na fabricação de microcomponentes é a microusinagem, definida como um processo que remove cavaco com espessura inferior a 999  $\mu\text{m}$ , definição esta que não considera o tamanho da peça e da ferramenta. Segundo Masuzawa (2000) este conceito irá variar em função da época, método e material de fabricação.

Outro importante fator a ser considerado é a manutenção das propriedades mecânicas dos materiais, já que existe um aumento substancial na energia específica de corte quando se reduz a

espessura do cavaco (Jackson, 2008, *apud* Oliveira, 2012). Este aumento de energia é a base para o conceito do efeito de escala, fenômeno comum e de extrema importância nas operações de microusinagem (Liu *et al.*, 2004). Portanto, o estudo contínuo dos materiais utilizados e dos parâmetros de usinagem é fundamental para o desenvolvimento e consolidação da técnica.

Devido a todas as peculiaridades envolvidas, os processos de microusinagem se enquadram nos processos não tradicionais de usinagem. Eles estão divididos em três grandes grupos: aditivos, *near net shape* e subtrativos (Rajurkar e Madou, 2005).

O grupo dos processos subtrativos engloba a fabricação de microcomponentes por meio de remoção de material e geração de cavaco, também intitulado como processos de microusinagem mecânica. No estudo comparativo realizado por Rajurkar *et al.* (2006), foram analisados todos os processos de microfabricação quanto a aspectos como qualidade superficial, acessibilidade, complexidade geométrica, dentre outros. Este estudo concluiu que os processos de microusinagem mecânica são os que trazem o melhor custo/benefício, quando comparados com as técnicas químicas e eletrofísicas. A microusinagem mecânica está subdividida em três processos principais, são eles: fresamento, torneamento e furação.

O presente trabalho visa apresentar os principais conceitos dos processos de microusinagem, de micromáquinas-ferramentas e de microferramentas, abordando o efeito das variáveis e parâmetros de corte no resultado de trabalho.

## **2. PROCESSOS DE MICROUSINAGEM**

### **2.1 Microtorneamento**

O torneamento é um processo de usinagem que se baseia no movimento rotativo de uma peça cilíndrica em torno do eixo principal de rotação da máquina, visando a obtenção de superfícies de revolução (Ferraresi, 1990). O microtorneamento consiste no processo de torneamento convencional miniaturizado. Assim, a partir deste processo é possível obter estruturas tridimensionais em microescala (Rahman *et al.*, 2005).

#### **2.1.1 Efeito dos Parâmetros de Usinagem**

No processo de microtorneamento as forças de usinagem têm grande influência na exatidão do processo, o que acaba limitando o tamanho usinável, sendo este o maior empecilho do processo. Assim, manter as forças atuantes abaixo daquelas que ocasionam deformação plástica no material usinado é de extrema importância (Rahman *et al.*, 2005).

Rahman *et al.* (2005) realizaram seu experimento com peças de latão, liga de alumínio e aço inoxidável AISI 316L em uma máquina ferramenta, de três eixos, produzida para microusinagem de precisão. Concluiu-se que o parâmetro que exerce maior influência é a profundidade de corte. Quando são empregados pequenos valores para este parâmetro, a força de impulso é o componente de força dominante. Agora, quando se determina um valor elevado para a profundidade de corte a parcela tangencial da força passa a ter um módulo maior.

O estudo de Prasad (2007) foi realizado em uma máquina-ferramenta similar à de Rahman *et al.* (2005), e teve como base para análise uma peça de latão. Obteve-se, como principal conclusão, que a força de impulso é influenciada principalmente pela profundidade de corte e pelo avanço, ao passo que a força de corte é fortemente impactada pela profundidade de corte e pela velocidade de rotação. Pequenas profundidades de corte resultaram em maior influência da força de impulso em comparação à força de corte. Os resultados obtidos neste estudo corroboram aqueles encontrados por Rahman *et al.* (2005). Maranhão *et al.* (2012) realizaram um estudo envolvendo simulação numérica e experimental de microtorneamento de peças de aço AISI 4140. Notou-se que o aumento do avanço implica em um aumento das forças de corte e de avanço.

Silva (2010) realizou experimentos de microtorneamento em um torno comandado numericamente (CNC) empregando peças de aço 1045 e alumínio EN AW-2011. As conclusões

obtidas neste trabalho indicam que, assim como no macrotorneamento, a seleção de um conjunto ótimo de parâmetros de corte irá depender do material a ser usinado.

### 2.1.2 Ferramenta de Corte

No trabalho realizado por Silva (2010) percebeu-se que o afiamento da ferramenta de corte resulta em uma redução da qualidade da superfície usinada quando analisada a precisão dimensional e o acabamento como parâmetros de qualidade. Para a usinagem de um micro eixo escalonado de alumínio, a melhor opção de ferramenta foi uma geometria destinada ao sangramento, utilizada em corte longitudinal. A Fig. 1 ilustra o perfil produzido através deste microtorneamento. Ainda segundo Silva (2010) esse processo possibilitou obter peças de até 0,75 mm de diâmetro e 5 mm de comprimento.

O flanco em uma ferramenta de cermet na usinagem de latão, de liga de alumínio e de aço inoxidável AISI 316L sofre um fino desgaste abrasivo. Já na ferramenta de PCD (diamante policristalino), atuando sobre as mesmas condições, nota-se a formação de sulcos (Rahman *et al.*, 2005).

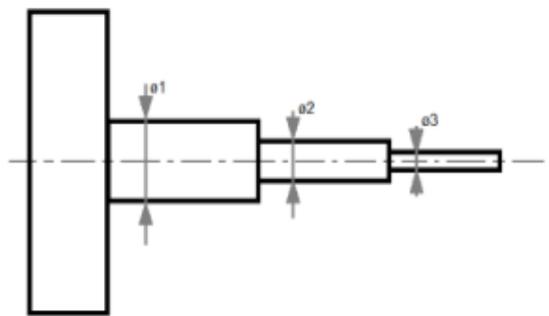


Figura 1 – Perfil produzido pelo microtorneamento (Adaptado de Silva, 2010).

### 2.1.3 Fluido de corte

Em seu experimento Silva (2010) aponta que a utilização de fluidos de corte não traz vantagens em processos de microtorneamento. De forma geral a rugosidade e precisão de forma foram melhores quando a usinagem foi realizada sem a presença de fluidos, apesar de uma certa adesão ser notada entre a ferramenta e o material da peça.

## 2.2 Microfresamento

O fresamento é um processo de usinagem caracterizado pelos movimentos realizados pela ferramenta, que gira, e pela peça, que se desloca seguindo uma trajetória qualquer (Ferraresi, 1990). O microfresamento possui muitas características que o aproximam do macrofresamento. Porém, a redução das dimensões envolvidas faz com que alguns fatores, principalmente em relação ao tamanho e escala das operações, que não são tão relevantes no processo tradicional passem a ter efeito significativo sobre os resultados obtidos (Picarelli, 2015).

### 2.2.1 Ferramenta de Corte

A concepção das microfresas tem base no princípio de que os processos envolvidos no microfresamento são análogos àqueles do processo convencional. Portanto, tradicionalmente, têm sua geometria baseada nas fresas de tamanho convencional, apenas com tamanho reduzido (Fleischer *et al.*, 2008), como pode ser observado na Fig. 2. No entanto estes autores afirmam que as tolerâncias dimensionais tanto no diâmetro, como no raio de aresta da microfresa não permitem manter constantes as condições de corte para avanços na ordem de microns. Assim, não é possível estabelecer uma relação direta entre os parâmetros do fresamento convencional e aqueles utilizados no processo em microescala.

O valor da razão entre o avanço por dente e o raio de ponta da ferramenta é muito maior, quando comparado ao valor do fresamento em macroescala. Assim, a seleção dos parâmetros adequados adquire uma importância ainda maior na conservação da ferramenta já que a ocorrência de fraturas é facilitada (Kang *et al.*, 2007; Moreira, 2012).

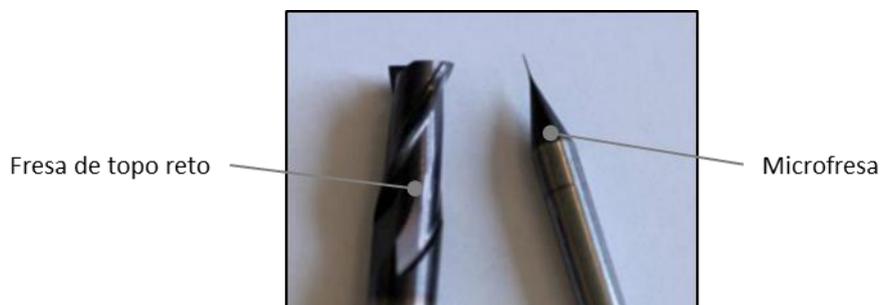


Figura 2 – Fresa de topo reto de 6 mm de diâmetro e microfresa de 200  $\mu\text{m}$  (Li e Chous, 2010).

O estudo conduzido por Baldo (2013) mostra que o aumento no desgaste da ferramenta reduziu a rugosidade da superfície usinada. Por outro lado, o trabalho de Denkena *et al.* (2006) indicou que na microfresagem de alumínio o desgaste da ferramenta não refletia na rugosidade final.

### 2.2.2 Fluido de corte

Li e Chous (2010) analisaram o efeito que a lubrificação tinha sobre a ferramenta e a superfície usinada a partir do método de Mínima Quantidade de Lubrificante (MQL). Para as condições utilizadas foi possível concluir que, para a MQL, o desgaste de flanco foi menor. A redução é de cerca de 60% em relação ao corte seco. Assim, espera-se um aumento na vida da ferramenta.

A lubrificação também é benéfica quando se trata da rugosidade da superfície obtida. Os valores de rugosidade encontrados para superfícies lubrificadas são menores do que aqueles resultantes do corte a seco, mesmo com variações na velocidade de corte (Li e Chous, 2010).

### 2.2.3 Efeito dos Parâmetros de Usinagem

Kiswanto *et al.* (2014) estudam a relação que os parâmetros velocidade de rotação, avanço e tempo de corte exercem, quando usinando uma peça de alumínio liga 1100, sobre a rugosidade da superfície, a formação de rebarbas e o desgaste da ferramenta. Foi notada uma melhora na rugosidade quando o tempo de usinagem foi mantido e a velocidade de avanço foi aumentada. Essa configuração implicou em uma maior produtividade, com redução da rugosidade, sem prejuízo significativo na vida da ferramenta. Quanto à formação de rebarbas verificou-se que o parâmetro que mais tem influência é o tempo de corte.

O estudo realizado por Mian *et al.* (2011) em peças de liga de níquel conclui que a variável que mais tem impacto em diferentes mecanismos ligados à microusinagem é a velocidade de corte. Outro resultado encontrado é que, junto com a velocidade de corte, a razão entre espessura do cavaco e raio da aresta de corte influencia significativamente na rugosidade da superfície microfresada.

Baldo (2013) efetuou um estudo sobre a influência dos parâmetros de microfresagem para a liga de titânio Ti-6Al-4V. O primeiro fator analisado foi a influência do aumento da velocidade de avanço nas rugosidades Ra e Rz. Aumentar essa velocidade implicou em elevação nos valores encontrados para as rugosidades. Este efeito é atribuído ao fato de que maiores flexões ocorrem sobre a ferramenta, gerando maiores vibrações.

## 2.3 Microfuração

A furação está amplamente presente na indústria manufatureira e é um dos processos de usinagem mais importantes na indústria metal mecânica. De acordo com a norma alemã DIN 8589-2, a furação é definida como um processo de usinagem com movimento de corte circular, ou seja,

com movimento rotativo principal, em que a ferramenta apresenta movimento de avanço apenas na direção do seu eixo de rotação, o qual mantém sua posição em relação à ferramenta e à peça.

Visando transpor os obstáculos do processo convencional em termos de dimensões de furo, criou-se a microfuração, em que a razão de aspecto para os furos que podem ser feitos é da ordem dos 10:1, para furos cujo diâmetro mínimo é de 0,1 mm (Hinds e Treanor, 2000).

### 2.3.1 Ferramenta de Corte

As microbrocas são as ferramentas mais utilizadas no processo de microfuração. A montagem é composta através da fixação da microbroca em uma pinça de precisão, com a necessária pré-vistoria do maquinário através de microscópio, evitando assim discordâncias (Selada *et al.*, 2010).

O ciclo de vida da ferramenta é contingente, segundo pesquisas de Kudla (2005) as microbrocas submetidas a parâmetros de corte relativamente diferentes dos pré-definidos e a cargas superiores resultam em quebra antes de apresentar o desgaste total esperado. Através de seus estudos, Zhuang (2012) concluiu que o bloqueio de aparas e a adesão de cavacos são dois dos principais motivos para a quebra de microbrocas. A Fig. 3 mostra a geometria de uma microbroca.

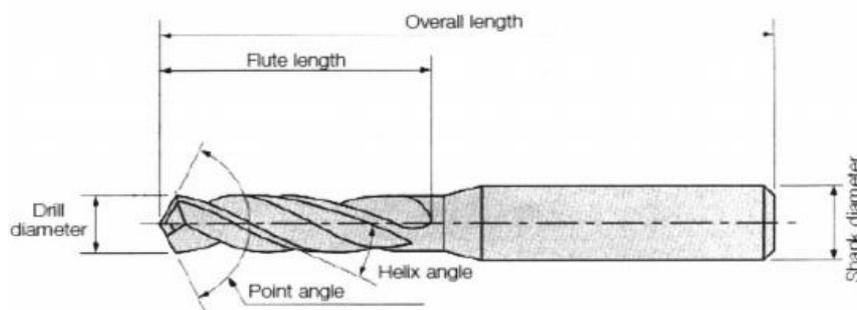


Figura 3 – Geometria da minibroca (Zhuang, 2012).

A relação entre comprimento e diâmetro da microbroca interfere diretamente em sua resistência mecânica, ajustando-a ao tipo de processo requerido (Selada *et al.*, 2010). Essa relação não deve ultrapassar muito o valor da razão preestabelecida para o processo, em virtude da fragilidade estrutural da ferramenta (Vasco e Correia, 2006). A forma e a geometria também influenciam substancialmente o modo com o qual a microbroca se comporta durante o processo de furação.

### 2.3.2 Efeito dos Parâmetros de Usinagem

Segundo Selada *et al.* (2010) na microfuração o aumento da velocidade de corte tem como efeito uma redução do binário e da componente tangencial da força de corte. O desgaste maior se dá na aresta de corte, não na face, e o atrito entre microbroca e a peça é superior por conta da dificuldade de remoção do cavaco gerado. Esses são os fatores que diferenciam a furação convencional da microfuração.

Hasan *et al.* (2017) estudaram a taxa de remoção de material, que pode ser calculada através da multiplicação entre a velocidade de rotação, a taxa de avanço e a área transversal da broca. A conclusão, através de suas análises, foi que uma maior taxa de remoção de material resulta em menor tempo de perfuração, por conseguinte, uma perfuração mais rápida acaba gerando carga extra na broca e risco de fratura da ferramenta. A Fig. 4 ilustra o padrão alcançado até o momento para a fabricação de microbrocas, de acordo com Hasan *et al.* (2017), as pesquisas no setor de manufatura dessas ferramentas miniaturizadas têm avaliado concomitantemente o aumento da performance e a redução do tamanho.

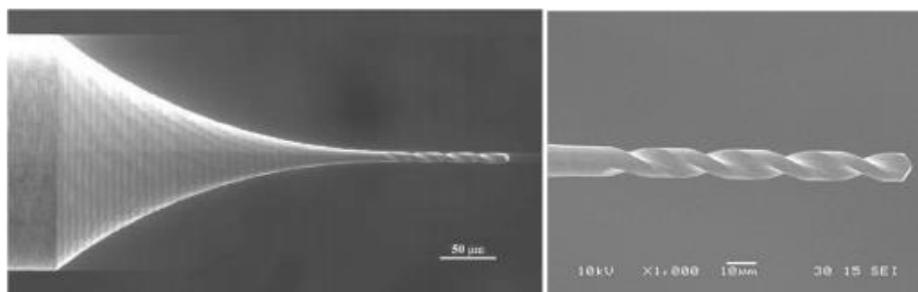


Figura 4 – Microbroca com diâmetro de 10  $\mu\text{m}$  (Hasan *et al.*, 2017).

Segundo Zhuang (2012), a velocidade de rotação recomendada por manuais de vários fabricantes de ferramentas para o aço inoxidável 316 SST está entre 25.000 rpm e 35.000 rpm. Porém, em virtude das restrições de eficiência das máquinas, a velocidade de rotação máxima atingida é inferior aos valores de referência. As máquinas devem funcionar o mais próximo da velocidade de rotação máxima (24.000 rpm) com o intuito de obter melhor desempenho.

Também com relação às análises feitas por Zhuang (2012), outro parâmetro essencial é a taxa de avanço, que possui influência direta no acabamento superficial da peça e no tempo de vida da ferramenta. Uma menor taxa de avanço implica em uma superfície com menor rugosidade. Não obstante, diminuir a taxa de avanço resulta em uma produção mais lenta e reduz ainda mais o ciclo de vida da ferramenta.

### 2.3.3 Fluido de corte

O fluido de corte, ou fluido refrigerante tem papel importante no arrefecimento, lubrificação e remoção do cavaco gerado no processo. Porém, segundo estudos realizados por Zhuang (2012), o tamanho extremamente reduzido do orifício gerado dificulta o escoamento do fluido pelo microfuro.

Os fatores fundamentais para a melhor performance durante o processo de microfuração avaliaram o tipo de refrigerante, a taxa de fluxo e ângulo do bico. A conjuntura para um desempenho ideal requer um fluido refrigerante com menor viscosidade, alta difusividade térmica e boa lubricidade (Oberg *et al.*, 2004).

## 2.4 Efeito Escala

Câmara (2014) afirma que o efeito escala caracteriza-se por uma relação não linear entre o crescimento da energia específica de corte e a redução da espessura e do material não deformado. Em processos micrométricos a resistência ao cisalhamento do material se eleva, como indicado na Fig. 5. Esta elevação se deve ao fato de que, ao reduzir as dimensões, tem-se apenas defeitos pontuais para realizar a quebra da ligação atômica da estrutura (Taniguchi, 2003 *apud* Câmara, 2014).

Subbiah e Melkote (2013) explicam que existem diferentes explicações para este efeito, como indicado na Fig. 6. Estas podem ser divididas entre as que estão relacionadas às propriedades do material e às que independem das características dos materiais envolvidos.

Mian *et al.* (2011) estudaram os fatores que mais influenciam no efeito escala na microusinagem, a partir de um experimento baseado em peça microfresada de Inconel 718. Estes autores concluíram que se pode usar a energia específica, a espessura da base da rebarba e a rugosidade da superfície como fatores relevantes no efeito. O estudo sugere ainda que a razão entre avanço por dente e raio de ponta da ferramenta, como também a velocidade de corte são fatores que podem influenciar de maneira significativa o efeito.

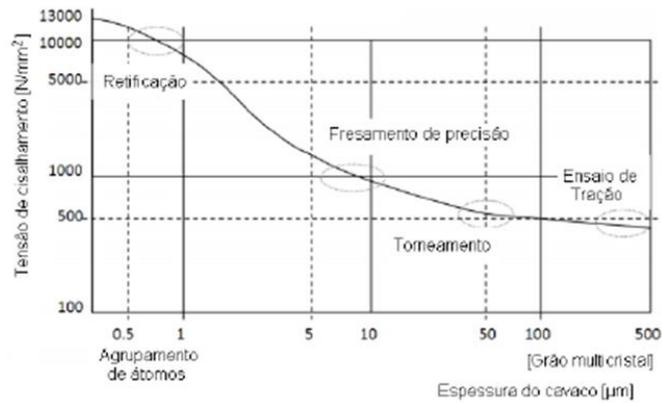


Figura 5 – Tensão de cisalhamento versus espessura do cavaco (Câmara, 2014).

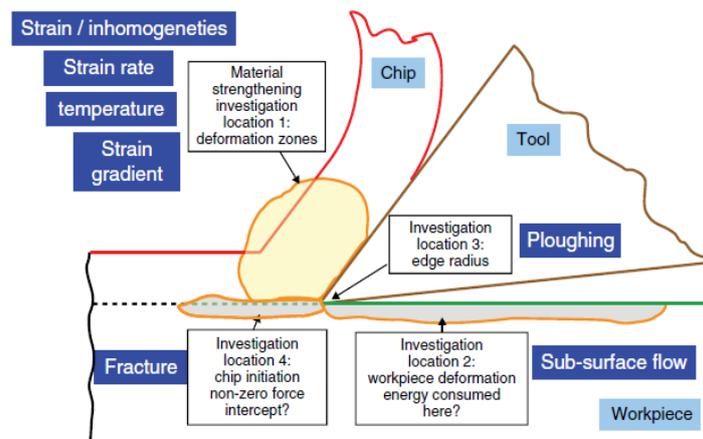


Figura 6 – Explicações diversas para o efeito escala (Subbiah e Melkote, 2013).

Klocke *et al.* (2009) estudaram o efeito escala em operações de micro furação de aço AISI 1045. Foi descoberto que, diferentemente da macrousinagem, altas velocidades favorecem a formação de gumes postiços, causando um aumento da força de avanço. Outro interessante ponto abordado é a indicação de que a ferramenta de corte pode ser da mesma dimensão do tamanho de grão. Porém, nestes casos, deve-se tomar o cuidado de não se analisar o material como isotrópico e homogêneo. Este efeito de escala deve ser considerado ao realizar análise numérica da microusinagem, a partir do método de elementos finitos.

## 2.5 Formação do cavaco

A formação do cavaco é um processo dinâmico não linear de extrema importância para se compreender e prever a ação das forças de corte atuantes. É relevante, também, a determinação da espessura mínima do cavaco, pois uma profundidade de corte menor que essa não resultará na remoção de material. Na usinagem em dimensões convencionais esse fator não costuma receber muita atenção visto que a profundidade de corte (torneamento) e o avanço por dente (fresamento) normalmente são maiores que o raio de ponta (Vinayagamoorthy e Xavier, 2011). Ainda, segundo estes autores, conhecer a espessura mínima é importante, porém obter este dado durante a execução do processo é uma tarefa difícil. Para contornar esta situação pesquisadores se dedicam a realizar simulações e experimentos para entender melhor o funcionamento do processo.

A redução do avanço por dente produz valores de rugosidade maiores, no microfresamento do aço ABNT 1045. Quando este valor de avanço é da mesma ordem da espessura mínima do cavaco nota-se redução da rugosidade da superfície, isto pode ser explicado pelo fato de a espessura do cavaco estar próximo daquela considerada crítica (Rodrigues, 2013).

Os mapas de simulação para deformação plástica (Maranhão, 2012) indicam que o cavaco, de um aço AISI 4140 microtorneado, aparenta sofrer mais impactos do que a peça produzida, como

indicado na Fig. 7. Isso pode ser comprovado analisando o cavaco e notando que a região inferior tem um valor de deformação maior que a superfície superior. Já os mapas da velocidade de deformação plástica (Fig. 8) indicam que os maiores valores destas estão localizados no plano de cisalhamento primário.

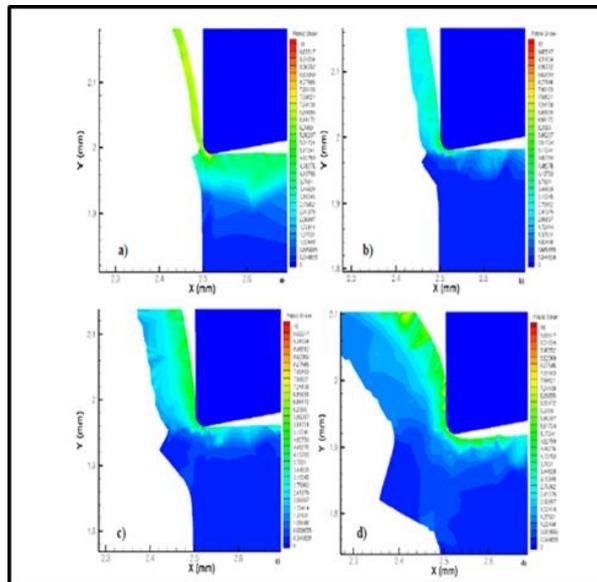


Figura 7 – Distribuição da deformação plástica no final do comprimento de corte para diferentes velocidades de avanço (a) Avanço de 10  $\mu\text{m}/\text{rot}$ ; (b) Avanço de 20  $\mu\text{m}/\text{rot}$ ; (c) Avanço de 40  $\mu\text{m}/\text{rot}$ ; (d) Avanço de 80  $\mu\text{m}/\text{rot}$  (Maranhão, 2012).

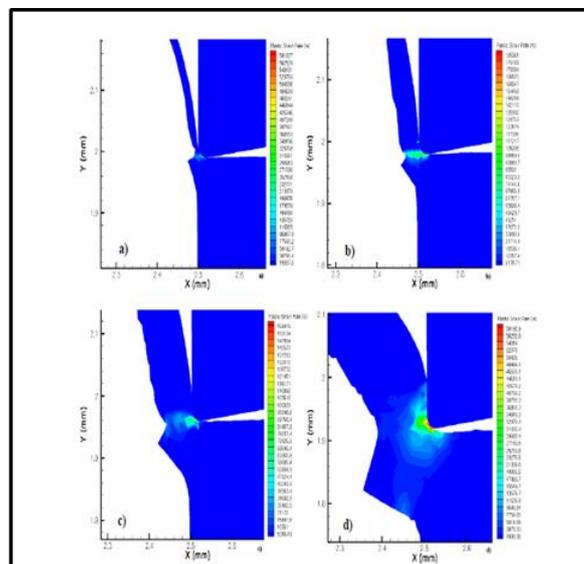


Figura 8 – Distribuição da velocidade de deformação no final do comprimento de corte para diferentes velocidades de avanço (a) Avanço de 10  $\mu\text{m}/\text{rot}$ ; (b) Avanço de 20  $\mu\text{m}/\text{rot}$ ; (c) Avanço de 40  $\mu\text{m}/\text{rot}$ ; (d) Avanço de 80  $\mu\text{m}/\text{rot}$  (Maranhão, 2012).

A remoção dos cavacos produzidos durante o processo de furação é um fator de grande importância, devendo ser levado em consideração no momento de definição dos parâmetros do processo. Quando se trata do processo de micro furação a remoção desta apra torna-se um fator ainda mais crítico, visto que o acúmulo destes nos furos gera aquecimento e tensão adicionais que, podem, culminar na quebra da microbroca (Hasan *et al.*, 2017).

## 2.6 Produtos da microusinagem

No passado os únicos microprodutos utilizados eram as peças que compunham o mecanismo de um relógio. Com a modernização novas necessidades surgiram e para isso os processos discutidos nos itens 2.1, 2.2 e 2.3 foram desenvolvidos (Masuzawa, 2000). A Fig. 9 mostra algumas aplicações de microusinados.

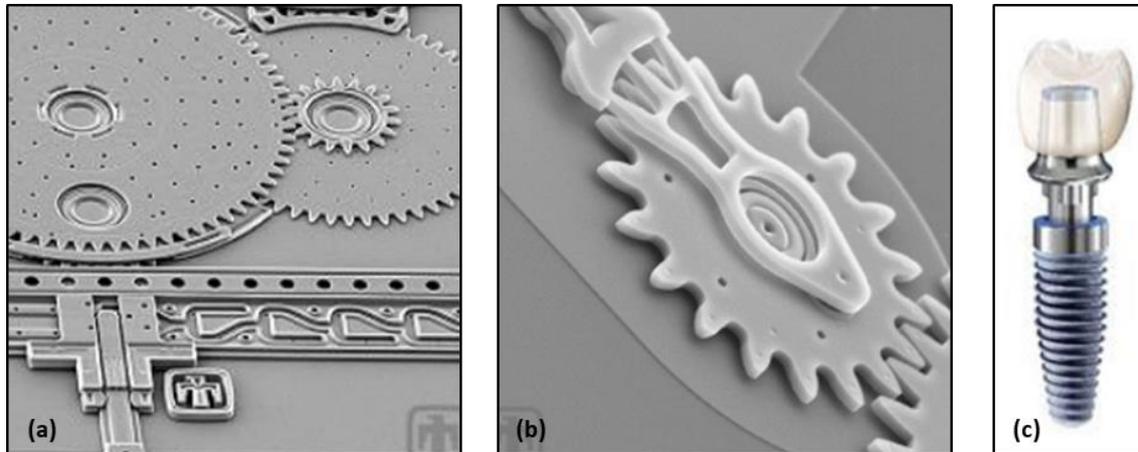


Figura 9 – Exemplos de produtos microusinados (a) microengrenagens (Sandia, 2018); (b) micromotores (Sandia, 2018); (c) Pino utilizado em implantes odontológicos (Adentis, 2018).

## 3. MICROMÁQUINAS-FERRAMENTAS

A produção das micromáquinas-ferramentas é o grande desafio em que esbarra a microusinagem na atualidade. Segundo Rahman *et al.* (2010) é indispensável que as micromáquinas de usinagem sejam providas de um sistema CNC (Controle Numérico Computadorizado) que proporcione a elas o monitoramento adequado dos movimentos e parâmetros envolvidos no processo.

De acordo com estudos realizados por Baldo (2013) as micromáquinas-ferramentas demandam um inflexível processo de fabricação, já que as propriedades requeridas devem ser superiores às do processo convencional, que por sua vez, costumeiramente aponta falhas em seus comandos e controles. Esses desvios no âmbito da macroescala podem não causar consequências preocupantes, no entanto, em microusinagem, o mesmo desvio pode resultar em defeito na peça final.

Chae *et al.* (2005) discorrem sobre os inúmeros benefícios associados à utilização de micromáquinas nos processos de usinagem, que incluem a diminuição no gasto de energia e de matéria prima, redução do espaço e menor custo para a produção. Outro benefício é devido às micromáquinas-ferramentas apresentarem frequências naturais mais altas quando comparadas às máquinas convencionais, isso é explicado pela massa ser muito menor. O resultado positivo disso é a possibilidade de utilização de um grande intervalo de velocidades de rotação com reduzida instabilidade. A Fig. 10 traz alguns exemplos de máquinas de baixo custo para operações de microfresamento.

### 3.1 Microferramentas de corte

Os componentes em miniatura são demanda de vários ramos da indústria e sua produção requer métodos de elevada precisão e garantia da repetitividade. As ferramentas convencionais não têm aplicabilidade na microusinagem (Chae *et al.*, 2005), e poucos estudos foram feitos em termos de experimentação e manipulação das microferramentas. Ainda é um desafio avaliar as reais interações possíveis entre a ferramenta e a peça trabalhada. De acordo com Rahman *et al.* (2010), as deformações mecânica e térmica, o ajuste da ferramenta, a precisão dimensional e o controle das vibrações são os principais fatores que podem afetar a manufatura de ferramentas em microescala.



Figura 10 – Micromáquina-ferramentas para aplicações diversas (Adaptado de Zariatin, *et al.*, 2016).

Também de acordo com Chae *et al.* (2005), as microferramentas podem ser extremamente frágeis e de minuciosa manipulação, porém há um grande estímulo para seu desenvolvimento derivado da busca pelo aumento da flexibilidade de criação de geometrias, redução do tamanho das peças de trabalho e minimização dos custos de produção.

Os parâmetros mais relevantes das microferramentas nas operações de microusinagem são a geometria e o tipo de material. São utilizadas ferramentas de tungstênio para uma gama grande de materiais Chae *et al.* (2005).

### 3.1.1 Fabricação de microferramentas por pulverização de feixe de íons focalizados- FIB

A evolução tecnológica e científica na área de materiais e processos de fabricação propiciou a produção de micro ferramentas, seguindo assim o padrão de desenvolvimento das máquinas de microusinagem, afinal, são interdependentes. Para tal, o método utilizado é denominado feixe de íons focalizados ou, em inglês, *Focused Ion Beam* (FIB) (Baldo, 2013).

De acordo com os estudos de Picard *et al.* (2002) o método utilizado para moldar as micro ferramentas consiste em um aparelho à vácuo que acelera íons de argônio e os direciona à peça que se deseja dar forma. Material é removido assim por pulverização. O padrão físico buscado para a ferramenta é gerado computacionalmente, proporcionando flexibilidade de forma e uma ferramenta com ângulos exatos e arestas de corte afiadas. Os materiais primários para a fabricação de microferramentas são fornecidos geralmente em formato de cilindro conectado a um mandril, com um comprimento total de aproximadamente 2,5 cm e com até 3,175 mm de diâmetro.

Segundo Chae *et al.* (2006), microferramentas comercialmente disponíveis atualmente podem alcançar até 50  $\mu\text{m}$  de diâmetro e têm seu ângulo de hélice fabricado por esmerilhamento. A Fig. 11 mostra uma microfresa de 100  $\mu\text{m}$  de diâmetro, é possível avaliar sua dimensão super reduzida observando o diâmetro da parte superior da própria microferramenta, que é 4 mm.

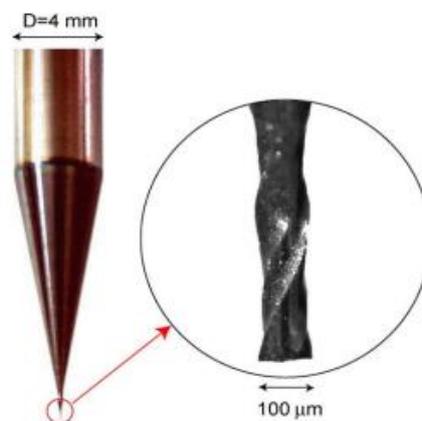


Figura 11 – Microfresa de carbeto de Tungstênio (Chae *et al.*, 2006).

#### 4. CONCLUSÕES

Este trabalho abordou os aspectos principais processos de microusinagem mecânica. Com esta revisão bibliográfica, conclui-se que:

- O processo de microusinagem é visto como um avanço tecnológico, uma promessa de fomento à economia, progressão nos equipamentos ligados a saúde e uma alavanca para inovações. Porém, a estabilidade já alcançada e conhecimentos já estabelecidos no processo em macroescala convencional tornam-se uma barreira a ser vencida para o seu desenvolvimento;
- A microestrutura da peça resultante dos processos de microusinagem é um fator que ainda requer estudos, pois sem esse conhecimento torna-se limitada a determinação das propriedades do material;
- Outro ponto importante é a adequação dos parâmetros, já consolidados em macroescala, aos processos de microusinagem que dependem da análise cuidadosa do efeito de escala;
- Por fim, acredita-se que o investimento em estudos para o entendimento e desenvolvimento dos processos de microusinagem é de grande importância para a contínua evolução técnico-científica. Vale ressaltar que este crescimento traz impactos, diretos e indiretos, para a sociedade como um todo.

Após o estudo de diversas fontes percebe-se que alguns temas ainda necessitam de um estudo mais detalhado. Dentre estes podem-se destacar: os efeitos do fluido de corte sobre a peça e a ferramenta ainda não foram bem documentados; a influência do material da ferramenta de corte sobre as forças de corte e qualidade da superfície usinada; a validação da precisão com a qual os estudos numéricos reproduzem a realidade e aplicação destas ferramentas e, por fim, a realização de estudos sobre a atuação da metrologia de ultra precisão na medição e avaliação dimensional de componentes.

#### REFERÊNCIAS

- ADENTIS, “Korony na implantach”. Disponível em: <<https://adentis.pl/uslugi-i-ceny/ortodoncja-bez-ekstrakcji/protetyka/korony-na-implantach>> Acesso em 27 de agosto de 2018.
- 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. 163 f.
- CÂMARA, M. A. “Influência do efeito escala sobre a operação de microfresamento”. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, MG, 2014. 177 f.
- 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, mar. 2006.
- DIN 8589-2: “*Fertigungsverfahren SpanenTeil 2: Bohren - Einordnung, Unterteilung, Begriffe*”. Berlin, Alemanha: BeuthVerlagGmbH, 12p, 2003
- DORNFELD, D.; MIN, S.; TAKEUCHI, Y. “Recent advances in mechanical micromachining. Cirp Annals - Manufacturing Technology”. v.55, n.2, p.745-768. 2006.
- FERRARESI, D. Fundamentos da Usinagem dos Metais. São Paulo: Edgard Blücher Ltda, 1990.
- FLEISCHER, J. *et al.* “Design and manufacturing of micro milling tools. Microsystem Technologies”. Besançon, França, v.14, n. 9-11, p.1771-1775, ago. 2008.
- HASAN, M.; ZHAO, J.; JIANG, Z. “A review of modern advancements in micro drilling techniques. Journal of Manufacturing Processes”. v.29, p.343-375, oct. 2017.
- KANG, I. S. *et al.* “A mechanistic model of cutting force in the micro end milling process”. Journal of Materials Processing Technology. v.187-188, p.250-255, jun. 2007.
- KRELLING, A. “Usinagem”. [2013?]. 37 slides. Disponível em: <<http://joinville.ifsc.edu.br/~anael.krelling/Tecnologia%20em%20Mecatr%C3%B4nica/PFB64/10%20-%20Usinagem.pdf>>. Acesso em 27 de agosto de 2018.
- KISWANTO, G.; ZARIATIN, D. K.; KO, T. J. “The effect of spindle speed, feed-rate and machining time to the surface roughness and burr formation of Aluminum Alloy 1100 in micro-milling operation. Journal of Manufacturing Processes”. v.16, n.4, p. 435-450, out. 2014.

- KLOCKE, F.; GERSCHWILER, K.; ABOURIDOUANE, M. "Size effects of micro drilling in steel. Production Engineering: Research and Development". v.3, n.1, p. 69-72, mar. 2009.
- KUDLA, L.A. "Deformations and strength of miniature drills. Journal of Engineering Manufacture".
- LI, K.M.; CHOU, S. Y. "Experimental evaluation of minimum quantity lubrication in near micro-milling. Journal of Materials Processing Technology". v. 210, n. 15, p.2163-2170, nov. 2010.
- MARANHÃO, C.; SILVA, L. R.; DAVIM, J. P. "Comportamento termomecânico na microusinagem do aço aisi 4140: Simulação numérica com validação experimental". Ciência & Engenharia, v.21, n.2, p.18-28, jul/dez.2012.
- MASUZAWA, T. "State of the art of micromachining". Cirp Annals - Manufacturing Technology. v. 49, n.2, p. 473-488. 2000.
- MIAN, A. J.; DRIVER, N.; MATIVENGA, P. T. "Identification of factors that dominate size effect in micro-machining". International Journal of Machine Tools & Manufacture. v. 51, n. 5, p. 383-394, may. 2011.
- MOREIRA, S. R. S. "Energia específica de corte e integridade superficial no microfresamento do aço ABNT 1045". Dissertação (Mestrado de Engenharia Mecânica) - Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, SP, 2012. 90 f.
- BERG, *et al.* "Machinery's Handbook". 27. ed. Nova Iorque: Industrial Press Inc., 2004.
- OLIVEIRA, F. B. "Estudos dos mecanismos governantes do efeito de escala na microusinagem". Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) -Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, SP, 2012. 92 f.
- PICARD, Y. N. *et al.* "Focused ion beam-shaped microtools for ultra-precision machining of cylindrical components". Precision Engineering. v.27, n.1, p. 59-69, jan. 2003.
- PICARELLI, T. C. "Microfresamento: Estudo e aplicação do processo". 2015. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Universidade Metodista de Piracicaba, Santa Bárbara d'Oeste, SP, 2015.
- PRASAD, J. H. "Experimental studies on microturning".. Tese (Mestrado em Engenharia Mecânica)- National Institute of Technology Calicut, Calicut, Kerala, 2007. 62 f.
- RAHMAN, M. A. *et al.* "CNC microturning: an application to miniaturization". International Journal of Machine Tools & Manufacture. v.45, n.6, p.631-639, nov. 2005.
- 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.
- RAJURKAR, K.; MADOU, M. "International assessment of research and development in micromanufacturing". In: EHMANN, K.F. *et al.* Processes. Marylan: WTEC, 2005. cap. 4, p.39-64.
- RAJURKAR, K. P. *et al.* "Micro and Nano Machining by Electro-Physical and Chemical Processes". CIRP Annals - Manufacturing Technology. v. 55, n.2, p. 643- 666. 2006.
- RODRIGUES, A. R. *et al.* "Integridade superficial no microfresamento". In: Congresso Brasileiro de Engenharia de Fabricação, 7., 2013, Penedo.
- SELADA, A.; FIDELIS, N.; SOARES, R. "Estudo sobre tecnologias nucleares do sector de engineering and tooling com potencial de aplicação noutros sectores". Centro Tecnológico da Indústria de Moldes, Ferramentas Especiais e Plásticas, Marinha Grande, Portugal, 2010. 102 f.
- SILVA, I. F. P. "Avaliação da qualidade de micropeças torneadas". Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Universidade de Aveiro, Aveiro, Portugal, 2010. 72 f.
- STOETERAU, R. L. "Usinagem com ferramentas de geometria definida" [2006?].99 slides. Disponível em:< <http://sites.poli.usp.br/d/pmr2202/arquivos/aulas/PMR2202-AULA%20RS2.pdf>>. Acesso em 27 de agosto de 2018.
- SUBBIAH, S.; MELKOTE, S. N. "Engineering materials for micro cutting". In: CHENG, K.; DEHONG, H. "Micro-Cutting: Fundamentals and applications". Reino Unido: Wiley, 2013. cap. 5, p.87-114.
- VINAYAGAMOORTHY, R.; XAVIOR, M. A. "A Review on Micro Turning Process". International Journal of Current Research. v.3, n.11, p.174-179, out. 2011.

- ZARIATIN, D.L.; KISWANTO, G.; KO, T.J. "Prototype development of micro-milling machine for micro-product". ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences. v.11, n.16, p.10004-10008, ago. 2016.
- ZHUANG, Y. "Optimizing the Economic Efficiency by Micro-drill Life Improvement during Deep-hole Drilling in the 212-Valve Manufacturing Process". Dissertação (Mestrado em Engenharia de Manufatura) - Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, Massachusetts, 2013. 67 f.