

INFLUÊNCIA DA VARIAÇÃO DO ÂNGULO DA DIREÇÃO DE AVANÇO NA RUGOSIDADE EM OPERAÇÕES DE FRESAMENTO DE MATRIZES E MOLDES

Innocenzo Scandiffio, innocenzo@globo.com¹

Anselmo Eduardo Diniz, anselmo@fem.unicamp.br¹

Adriano Fagali de Souza, adriano.fagali@ufsc.br²

¹Universidade Estadual de Campinas – UNICAMP – Rua Mendeleiev, s/n - Cidade Universitária “Zeferino Vaz” Barão Geraldo – Campinas, SP – CEP 13083-970

²Universidade Federal de Santa Catarina – UFSC – Grupo de Pesquisa em Sistemas Avançados de Manufatura – GPSAM - Rua Presidente Prudente de Moraes, 406 – Joinville – SC – CEP 89218-000

Resumo: O fresamento é um dos processos mais utilizados para a fabricação de moldes e matrizes. Mesmo utilizando modernas técnicas de fresamento em altas velocidades, que conferem menor rugosidade à superfície usinada, o polimento manual ainda é necessário, gerando maiores custos e erros geométricos ao produto. Portanto, o processo de fresamento de perfis complexos de moldes e matrizes ainda tem muito a ser estudado e melhorado a fim de se reduzir o tempo gasto com o processo de polimento. O ângulo de contato entre ferramenta/peça e as direções de avanço ascendente/descendente tem forte influência na vida da ferramenta e na rugosidade dos moldes e matrizes. Foram realizados ensaios de fresamento em superfícies semi-cilíndricas com inclinações de 5°, 45° e 85° da peça em relação ao eixo da ferramenta. O material utilizado nos experimentos foi o aço AISI D6 (60HRC) usinado com ferramenta de ponta esférica, com o objetivo de analisar a influência do ângulo da direção de avanço na rugosidade da peça. A principal conclusão é que quando o ângulo da direção de avanço é pequeno e o centro da ferramenta está envolvido no corte, a rugosidade apresenta menores valores e maior vida da ferramenta, embora nesta condição ocorra maior deformação plástica da superfície usinada.

Palavras-chave: Estratégias de usinagem; Fresamento de moldes; Fresamento de aço endurecido

1. INTRODUÇÃO

A forma geométrica dos produtos finais tem uma forte influência na atração do consumidor. Portanto, formas geométricas complexas têm sido usadas cada vez mais com esse objetivo. Para atender a essa demanda, o processo de fresamento de matrizes e moldes (integrados com sistemas CAD/CAM) é uma tecnologia muito utilizada para esse fim.

Conforme Altan et al. (2001) e Coldwell et al. (2003) os maiores desafios das indústrias de fabricação de moldes são: redução de custos e, conseqüentemente, do preço final, redução dos tempos de fabricação, falta de mão de obra qualificada para projeto e produção, concorrência internacional e interna.

A usinagem de alta velocidade (HSM - *High Speed Machining*) tem atraído bastante atenção como uma tecnologia de fabricação de moldes e matrizes avançada devido a inúmeras vantagens, tais como altas taxas de remoção, custo mais baixo, excelente precisão dimensional e qualidade superficial, baixa força de corte e a capacidade da máquina usinar materiais endurecidos. A tecnologia HSM tem sido amplamente aplicada em áreas como automotiva, aeroespacial, fabricação de moldes e indústrias de defesa (Wang, et al., 2013).

O fresamento em cópia para fabricação de moldes e matrizes pode ser ascendente ou descendente de acordo com a direção de avanço da ferramenta. Toh (2004) realizou em seu trabalho testes com estratégias de usinagem ascendente e descendente, com o objetivo de verificar qual estratégia apresentava melhor resultado com relação à qualidade superficial. Esses testes foram realizados em um centro de usinagem vertical com alta velocidade de corte. Para retirar o cavaco da região de corte, foi utilizado um jato de ar de alta pressão dirigido diretamente na região de corte. Para a realização dos ensaios, os corpos de prova foram preparados com aço AISI H13, que é um aço-ferramenta para trabalho a quente, com dureza de 52 HRC. As ferramentas utilizadas para esse experimento foram fresas com ponta esférica de metal duro com grão ultrafino com uma camada de cobertura (Al,Ti)N. O diâmetro das ferramentas utilizado nos experimentos foi 10 mm e o balanço da ferramenta foi de 60 mm. Todas as ferramentas tinham 6 arestas cortantes. Para realização desses experimentos, os corpos de prova foram inclinados a 75° e utilizado diferentes estratégias de usinagem, nas direções ascendente e descendente. A velocidade de corte utilizada foi 400 m/min e avanço por dente de 0,1 mm. Esses testes comprovaram que a operação de fresamento em cópia descendente apresentou pior acabamento da peça. Outro ponto observado é que a rugosidade da peça aumenta quando se emprega um caminho de ferramenta em contorno descendente devido ao fluxo lateral do material. Portanto, esses experimentos comprovam que, independentemente das condições da ferramenta de corte, a usinagem em cópia em simples direção ascendente

apresentou melhor textura da superfície quando comparado com as orientações de contorno. Segundo o autor, o melhor resultado na condição em cópia ascendente aconteceu devido à menor ângulo de contato da ferramenta com a peça.

Souza et al. (2014) testaram cinco diferentes estratégias de acabamento em fresamento de superfícies convexas circulares. Para os experimentos, os autores fabricaram cinco cavidades com sobremetal de 0,2 mm para a operação de acabamento. Os principais objetivos deste trabalho eram avaliar a qualidade da superfície após o processo de fresamento, qualidade da superfície após o polimento manual, tempo real de usinagem e uma simples análise do custo de fabricação de cada cavidade. Para todos os experimentos, os parâmetros de corte foram mantidos, com exceção do caminho da ferramenta e a penetração de trabalho (a_p). As ferramentas utilizadas foram fresas de metal duro com ponta esférica com 6 mm de diâmetro com cobertura de Nitreto de Titânio/Alumínio (TiAlN) e rotação de 18000 rpm. O centro de usinagem utilizado foi um Deckel Maho DMU60 com alta velocidade de corte. Todos os corpos de provas foram usinados com estratégias 3 eixos, sem a utilização de fluido de corte. O material utilizado como corpo de prova foi um aço-ferramenta AISI P20 com, aproximadamente 30 HRC, fixado diretamente sobre a mesa do centro de usinagem. Os autores comprovaram neste trabalho que a rugosidade não é somente afetada pelos parâmetros de corte, tais como velocidade de corte e avanço por dente, mas também é fortemente influenciado pela estratégia de usinagem e trajetória da ferramenta.

2. REVISÃO DE LITERATURA

2.1. Rugosidade

O acabamento superficial é um fator importante na avaliação da qualidade dos produtos e principalmente em matrizes e moldes. A rugosidade é considerada um erro microgeométrico e pode ser definida como um conjunto de saliências e reentrâncias que caracterizam a superfície da peça. A rugosidade média em R_a é o parâmetro mais utilizado para determinar a rugosidade. Várias características são influenciadas pela rugosidade, incluindo a resistência ao desgaste por atrito, transmissão de calor, capacidade de distribuição e retenção de lubrificante, capacidade de aderir a camadas protetoras e a resistência à fadiga. Com isso, pode-se afirmar que a rugosidade afeta vários atributos funcionais do produto e é afetada por vários fatores ligados ao processo de usinagem como: avanço da ferramenta, forma geométrica da peça, rigidez da máquina entre outros (Çolak et al., 2007).

A rugosidade teórica da peça após a usinagem, que é um parâmetro geométrico dependente do avanço e da forma da ponta da fresa, pode ser calculada em função do perfil e movimento efetuado pela ferramenta. No entanto, os valores reais de rugosidade apresentam diferenças consideráveis quando comparado com o teórico. Os fatores que causam essas diferenças estão relacionados a erros de deslocamento da ferramenta (vibração) e mudança no perfil da ferramenta em função do desgaste (Vivancos et al., 2004).

Na usinagem de superfícies com ferramenta de ponta esférica, conhecendo-se o incremento por passada ($incr$), a profundidade de usinagem (a_p), o raio da ferramenta (R_ε), o raio efetivo de corte da ferramenta (R_{EF}) e avanço por dente da fresa (f_z), a rugosidade teórica pode ser calculada em duas direções, perpendicular a direção de avanço ($R_{t_{perp}}$), como mostrado na Eq. (1) e paralela a direção de avanço ($R_{t_{par}}$), como mostrado na Eq. (2).

$$R_{t_{perp}} = \frac{\left[\frac{incr \cdot (a_p)}{\sin(\alpha)} \right]^2}{8 * R_\varepsilon} \quad (1)$$

$$R_{t_{par}} = \frac{[f_z]^2}{8 * R_{EF}} \quad (2)$$

2.2. Ferramenta

A vida da ferramenta é o tempo que a mesma trabalha efetivamente no material, até que não tenha mais capacidade de corte. Quando a ferramenta atinge essa condição, a mesma deve ser afiada ou substituída. As ferramentas devem ser substituídas quando atingem desgaste em proporções elevadas, quando não permitem mais a obtenção de tolerâncias apertadas, quando causam aumento das forças de usinagem de tal maneira a gerar vibrações excessivas no processo e quando, devido ao valor do desgaste, receia-se a quebra da aresta.

Diniz et al. (2004) analisaram o desempenho de insertos redondos de metal duro e cermet em operações de fresamento em semi-acabamento de aço SAE H13 com dureza de 50 HRC. Neste trabalho foi avaliada a influência da penetração de trabalho (a_e), velocidade de corte (v_c) e avanço por aresta de corte da ferramenta (f_z) em relação à vida

do inserto. Os materiais para ferramentas utilizados foram o cermet sem cobertura classe H10 e duas classes de metal duro ISO P40, com tamanho de grão de $5\mu\text{m}$ e H15 com tamanho de grão menor que $1\mu\text{m}$. As coberturas para ferramentas de metal duro foram para o inserto ISO P40 - TiN + TiCN + Al₂O₃ e para o inserto ISO H15 cobertura de TiCN. As ferramentas de cermet apresentaram vida mais longa entre todas as ferramentas testadas. O desgaste de flanco apresentado por esse material para ferramentas foi mais regular, enquanto as ferramentas de metal duro apresentaram microlascamentos e desgaste de flanco na aresta de corte. Entre os parâmetros de corte experimentados, a velocidade de corte foi o parâmetro que mais influenciou na vida da ferramenta, seguido pela penetração de trabalho, e por último pelo avanço por dente. Os valores de rugosidade média ficaram próximos a $0,8\ \mu\text{m}$ (Ra) o que pode ser considerado um valor de rugosidade aceitável para operações de semi-acabamento.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

3.1. Corpo de prova

Para atingir os objetivos propostos neste estudo, foram realizados experimentos de fresamento empregando uma ferramenta de ponta esférica. O corpo de prova possui forma semi-circular de raio 27 mm e as trajetórias da ferramenta ocorreram transversalmente a seção circular, como ilustra a Figura 1. Estas condições de usinagem representam o fresamento de formas complexas, comumente encontrado na fabricação de moldes e matrizes. O material dos corpos de prova utilizados nos ensaios foi um aço AISI D6 temperado, que é um aço para trabalho a frio com elevada temperabilidade. Embora, após a têmpera, a dureza desse material pode chegar a 62 HRC, a dureza superficial do material usado nos ensaios foi de 60 HRC.

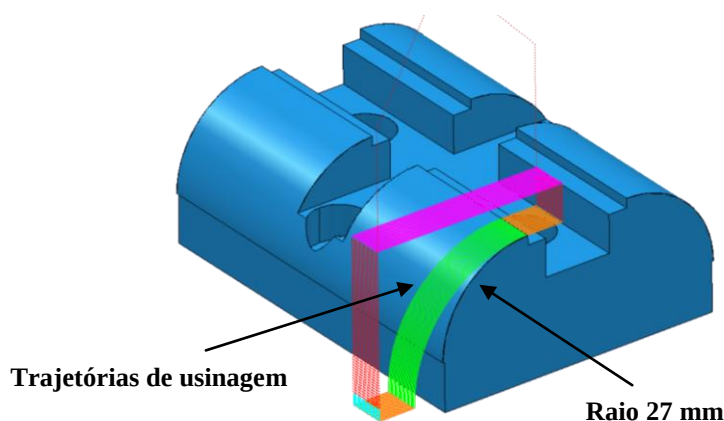


Figura 1. Corpo de prova e trajetórias da ferramenta

Foram empregadas as condições de corte concordante nos sentidos descendente e ascendente. As condições de contato ferramenta/peça foram: cópia do perfil circular, ângulo da direção de avanço de 5° (simulando a ferramenta na região 1), ângulo da direção de avanço de 45° (simulando a ferramenta na região 2) e ângulo da direção de avanço de 85° (simulando a ferramenta na região 3), conforme mostra a figura 2.



Figura 2. Corpo de prova e ângulo da direção de avanço

3.2. Processo de usinagem

Os experimentos de usinagem foram elaborados com uma fresa de topo com ponta esférica de 16 mm de diâmetro (R216F-16A16S-063) com insertos de metal duro da classe ISO H10 (R216F-16 40 E-L) e cobertura de (Ti,Al)N. A velocidade de corte utilizada, para os experimentos com ângulo da direção de avanço de 5° , 45° e 85° , foi de 160

m/min, portanto, as rotações variaram de 3183 a 23362 rpm. Para a usinagem em cópia, a velocidade de corte variou devido a variação do diâmetro efetivo de corte da ferramenta. O avanço por aresta foi de 0,1 mm, profundidade de corte de 0,2 mm e penetração de trabalho de 0,3 mm.

Para determinar o diâmetro efetivo da ferramenta foi utilizada a equação 3 apresentada por Souza e Bodziak, 2012.

$$R_{ef} = \sqrt{R^2 - (R - a_p)^2} \quad (3)$$

3.3. Obtenção da rugosidade

Para a avaliação da rugosidade, foram determinadas algumas regiões no corpo de prova. As regiões foram classificadas como região 1, região 2 e região 3 conforme mostra a figura 3. A rugosidade foi avaliada a cada 25 milímetros de penetração de trabalho da ferramenta. Todas as medições de rugosidade foram avaliadas no sentido perpendicular a trajetória da ferramenta.

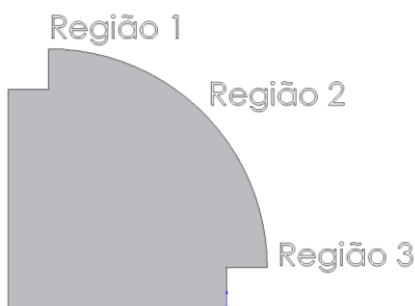


Figura 3. Regiões de medição de rugosidade

3.4. Vida da ferramenta

Para o final de vida da ferramenta, foi determinado que quando o desgaste de flanco da ferramenta (V_B) atingisse 0,2 mm ou quando ocorresse falha catastrófica da ferramenta o experimento seria interrompido. Todas as estratégias de usinagem foram executadas a seco, ou seja, não foi utilizado fluido de corte. Em todos os experimentos foram realizados réplicas. Se os resultados de vida da ferramenta entre um experimento e sua réplica fossem mais de 20% diferentes entre si, um novo experimento era realizado.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1. Ferramenta

Entre todas as estratégias utilizadas nos experimentos, a única estratégia que o centro da ferramenta esteve em contato com a peça durante todo o percurso da usinagem foi a estratégia com ângulo da direção de avanço de 5° descendente. Quando o centro da ferramenta esta envolvido no corte, a velocidade de corte é zero, ou seja, a ferramenta remove o material da peça por conformação. A figura 4 mostra a aresta de corte da ferramenta utilizada na usinagem com ângulo da direção de avanço de 5° nas condições descendente e ascendente. Pode-se notar na figura que o desgaste da ferramenta na condição ascendente ocorreu deslocado do centro da ferramenta.

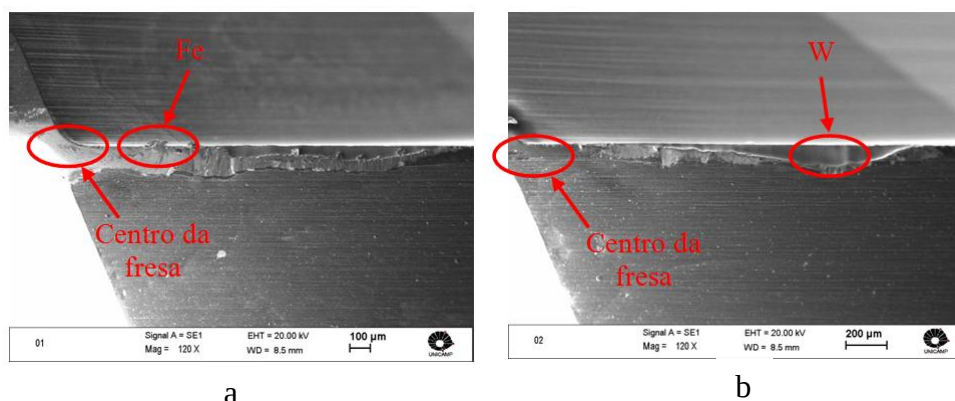


Figura 4. Superfície de folga da ferramenta: a) 5° descendente b) 5° ascendente

Nota-se também na figura 4 que o tipo do desgaste da ferramenta foi semelhante, mas ocorreram em regiões distintas da ferramenta. O tipo de desgaste predominante para as estratégias 5° descendente e 5° ascendente foi o desgaste de flanco, microlascamentos e alguma aderência de material (*attrition*). Na usinagem com ângulo da direção de avanço de 5° em algumas regiões da ferramenta ocorrem baixas velocidades de corte, com isso a deformação plástica é incentivada, facilitando assim fenômenos do tipo “fluxo lateral de cavaco”.

A figura 5 mostra a superfície de saída das ferramentas nas estratégias com ângulo da direção de avanço de 5°, 45° e 85°, tanto na condição descendente quanto ascendente. Pode-se notar na figura que nas estratégias com menor ângulo da direção de avanço ocorreram microlascamentos e adesão de material da peça. Já nas estratégias com maior ângulo da direção de avanço o mecanismo predominante foram os microlascamentos, principalmente nas condições ascendentes. Provavelmente as condições de usinagem onde o diâmetro efetivo é menor, a maior força de usinagem ocorre no eixo mais rígido da máquina (eixo z) fazendo com que o processo seja mais estável e consequentemente ocorra maior vida da ferramenta.

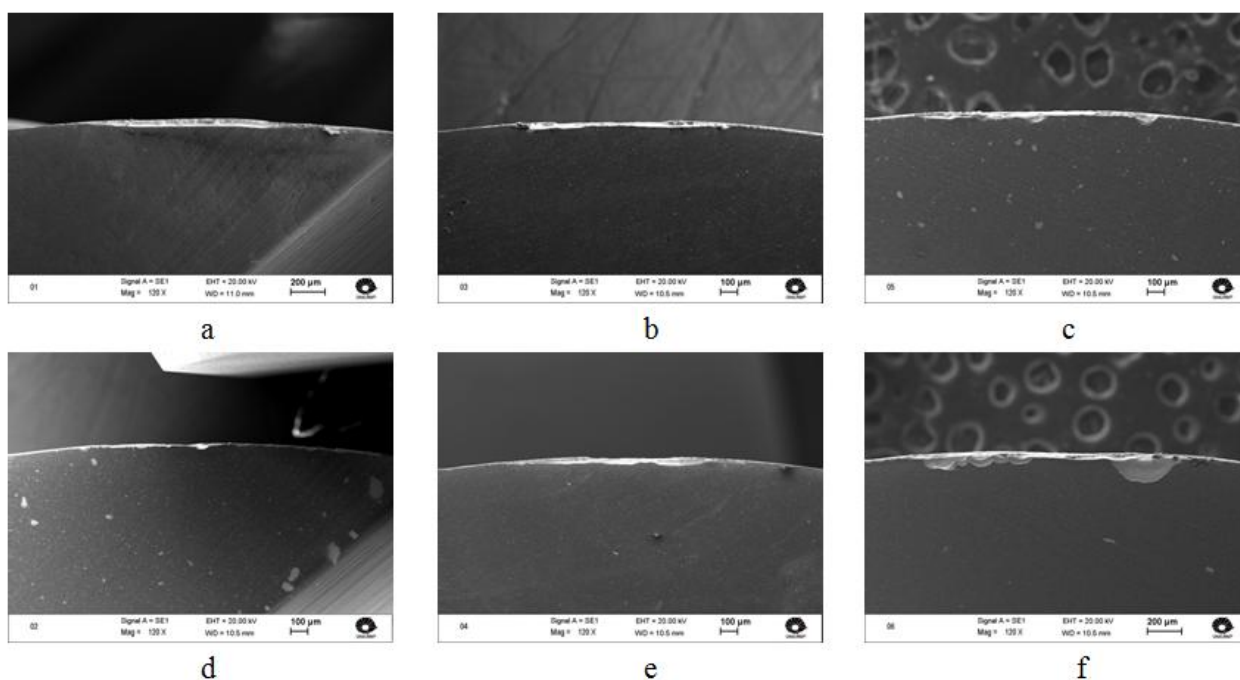


Figura 5. Superfície de saída da ferramenta: a) 5° descendente, b) 45° descendente, c) 85° descendente, d) 5° ascendente, e) 45° ascendente, f) 85° ascendente.

4.2. Vida da ferramenta

A figura 6 mostra a vida da ferramenta em todas as estratégias testadas. Pode-se notar na figura que a estratégia que apresentou maior vida foi a 3 eixos descendente. Nesta estratégia o desgaste da ferramenta é distribuído por toda a aresta. A estratégia de usinagem 3 eixos descendente apresentou o dobro da vida da estratégia 3 eixos ascendente. Este resultado deve-se a estabilidade da ferramenta apresentada na condição descendente. Na estratégia com 3 eixos descendente a ferramenta inicia o corte com o centro atuando diretamente na peça, essa condição resulta em velocidade de corte zero, mas fez com que o processo se tornasse mais estável, minimizando vibrações que incentivam microlascamentos na aresta de corte. Entre as estratégias testadas com a variação do ângulo da direção de avanço, a estratégia que apresentou maior vida foi a 5° descendente que é a única estratégia que o centro da ferramenta está diretamente envolvido no corte. Outro fato que pode ser notado é que quando se varia o ângulo da direção de avanço para distribuir o desgaste na aresta de corte da ferramenta, em termos de vida não apresenta diferença, quando se compara as estratégias descendentes e ascendentes. Portanto, em termos de vida da ferramenta, a melhor estratégia é a 3 eixos descendente ou se possível iniciar o corte com o centro da ferramenta atuando diretamente no corte.

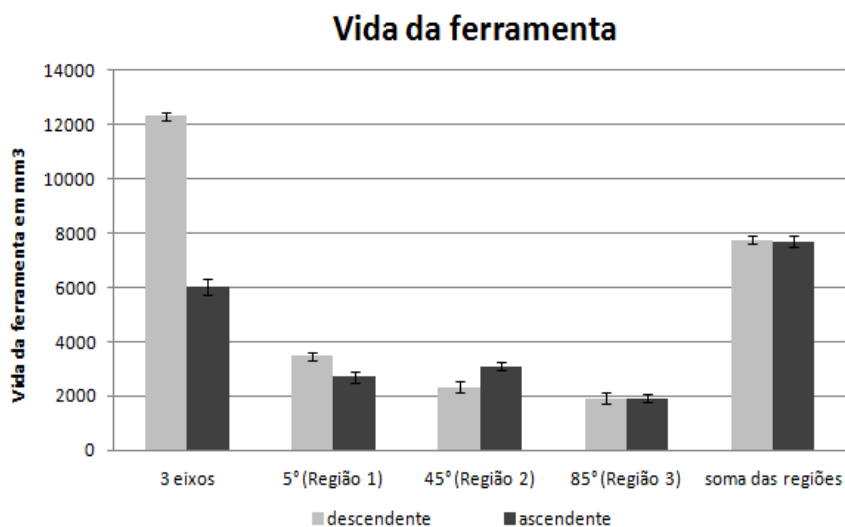


Figura 6. Vida da ferramenta

4.3. Rugosidade

A figura 7 mostra a rugosidade avaliada nas três regiões do corpo de prova. Nota-se na figura 7 que todas as estratégias ascendentes apresentaram valores de rugosidade iguais ou maiores, quando comparado com as usinagens descendentes. Provavelmente esse resultado se deve à menor força axial apresentada nas usinagens ascendentes. Como mostrado anteriormente, quando a ferramenta inicia a usinagem com o centro atuando no corte, portanto maior força axial, o processo fica mais estável e apresenta valores de rugosidade menor e maior vida da ferramenta. As regiões 1 e 2 no sentido descendente apresentaram menores valores de rugosidade devido a estabilidade gerada no início do corte, mas com o aumento do ângulo da direção de avanço (região 3) esta estabilidade não permanece e os valores de rugosidade aumentam.

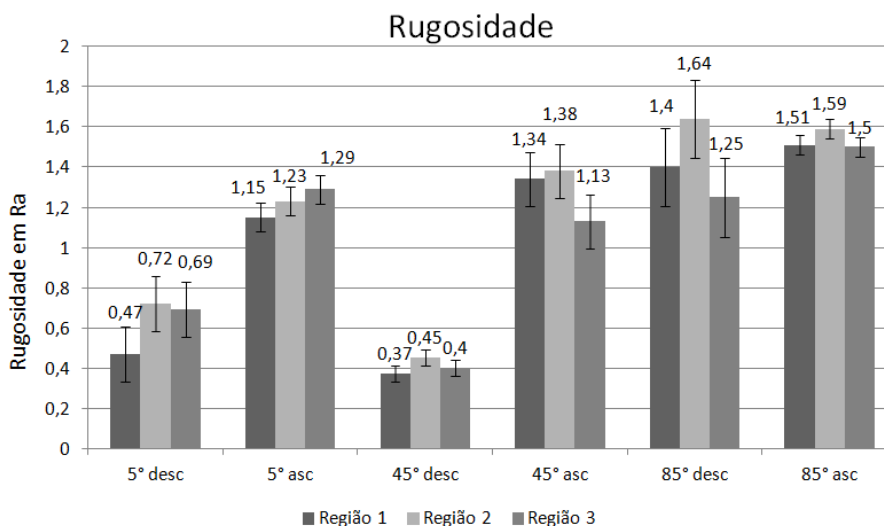


Figura 7. Rugosidade

A figura 8 mostra o perfil de rugosidade nas estratégias descendentes. Nota-se na figura que o perfil é bastante irregular. Provavelmente, nas estratégias descendentes as forças de corte apresentaram comportamento com maiores irregularidades, quando comparado com o corte ascendente, provavelmente devido ao fenômeno de sulcamento (*ploughing*) que ocorre no corte descendente. As irregularidades do perfil obtido com o corte descendente,

provavelmente podem ser atribuídas devido à variação das componentes da força F_y , que foi causada pela variação da posição da ferramenta cada vez que uma aresta tocava a peça.

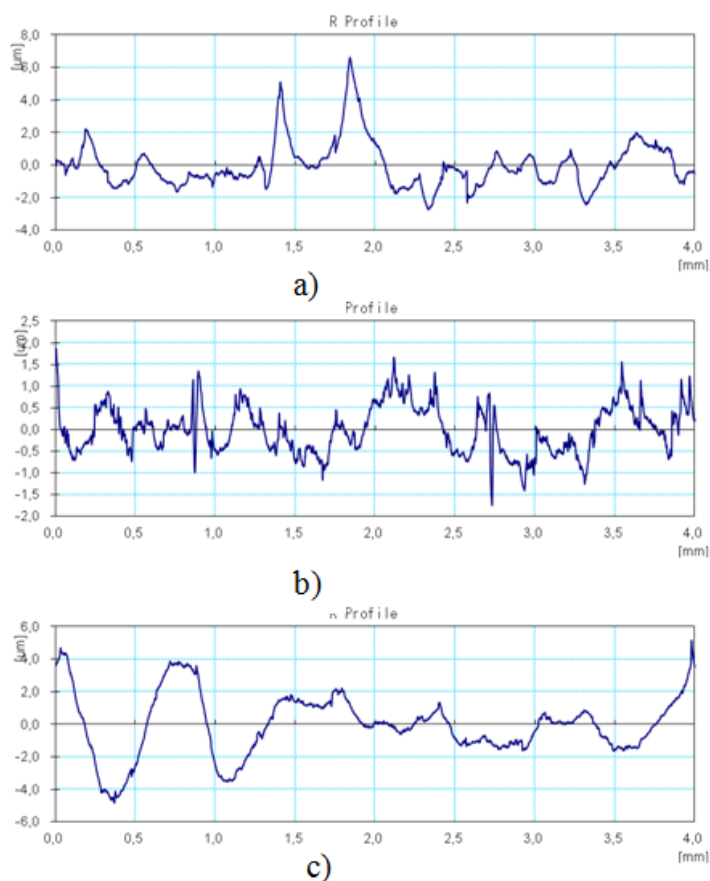


Figura 8. Perfil de rugosidade estratégias descendentes: a) 5°; b) 45°; c) 85°

A figura 9 mostra o perfil de rugosidade nas estratégias ascendentes. Pode-se observar na figura que a distância entre picos de rugosidade na estratégia ascendente foi exatamente o valor da penetração de trabalho ($a_e=0,3\text{mm}$), uma vez que a rugosidade foi avaliada perpendicularmente à direção de avanço. Quando se compara o perfil de rugosidade dos cortes descendentes (figura 8) com os perfis dos cortes ascendentes (figura 9) nota-se que o perfil do corte descendente é mais irregular, mas com valores menores quando comparado com o corte ascendente. O corte ascendente apresentou maiores valores de rugosidade provavelmente devido a ferramenta trabalhar mais fletida penetrando no material, causando um perfil de rugosidade mais profundo, e consequentemente, gerando alto valor de rugosidade na superfície. A figura 9 mostra que as maiores diferenças entre picos e vales aconteceram na estratégia ascendente com ângulo da direção de avanço de 85°. Provavelmente a rugosidade superficial elevada obtida nos experimentos com este ângulo da direção de avanço é devido ao baixo valor da componente axial da força. Provavelmente, quando o componente axial da força é elevado (como deve ter ocorrido com o corte com 5° de ângulo da direção de avanço) é mais difícil fletir a ferramenta em um plano perpendicular ao eixo da ferramenta.

Portanto pode-se concluir que para obtenção de baixos valores de rugosidade em operações de fresamento de superfícies complexas, mantendo constante o diâmetro de contato da ferramenta com a peça e também a velocidade de corte, é recomendado que a direção do corte seja descendente e com ângulo da direção de avanço no máximo de 45°.

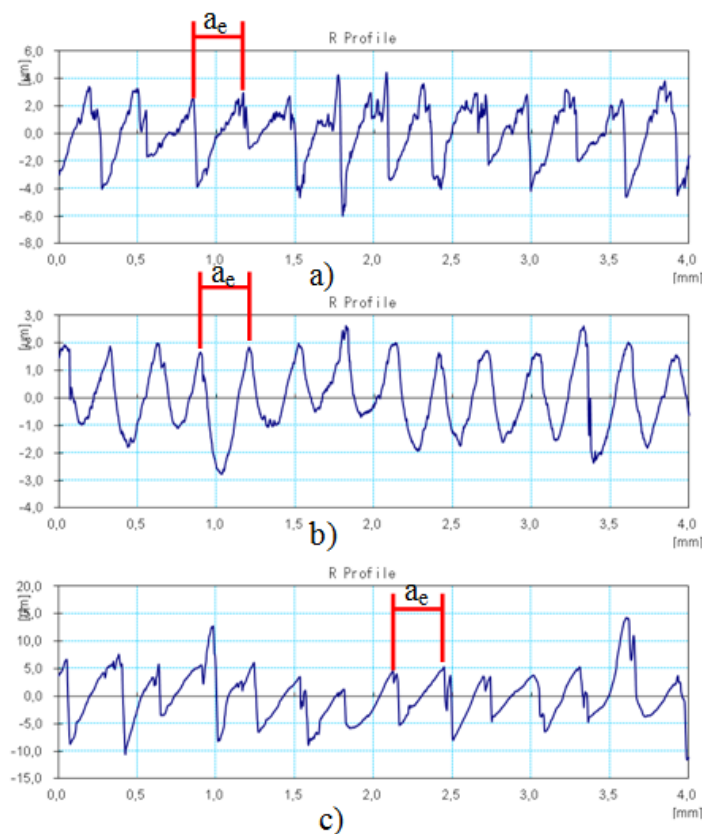


Figura 9. Perfil de rugosidade estratégias ascendentes: a) 5°; b) 45°; c) 85°

5. CONCLUSÕES

As principais conclusões deste trabalho são:

- A maioria das estratégias descendentes apresentou maior vida da ferramenta devido à ferramenta iniciar o corte em uma condição com maior rigidez.
- A trajetória que apresentou maior vida foi a estratégia com três eixos descendente.
- Os resultados deste trabalho mostram que na usinagem de material endurecido com fresa de ponta esférica, o centro da ferramenta em contato com a peça aumenta a vida da ferramenta e melhora a rugosidade da superfície usinada.
- Em usinagens de superfícies cilíndricas, sempre que possível, pode-se utilizar uma estratégia com variação de ângulo da direção de avanço, pois esta variação distribui o desgaste ao longo da aresta de corte.
- As rugosidades tiveram comportamento aleatório devido à vibrações no início de corte da ferramenta, mas geralmente as estratégias de usinagem descendentes apresentaram menores valores de rugosidade.
- As regiões 1 e 2 no sentido descendente apresentaram menores valores de rugosidade devido a estabilidade gerada no início do corte, mas com o aumento do ângulo da direção de avanço (região 3) esta estabilidade não permanece e os valores de rugosidade aumentam.

6. REFERÊNCIAS

- Altan T.; Lilly B.; Yen Y.C. (2001). Manufacturing of Dies and Molds. V. 50 , p. 404 - 422. Annals of CIRP - Manufacturing Technology.
- Coldwell, H.; Woods, R.; Paul, M.; Koshy, P.; Dewes, R.; Aspinwall, D. K. (2003). Rapid machining of hardened AISI H13 and D2 moulds, dies and press tools. Volume 135 , Pag. 301 - 311. Journal of Materials Processing Technology.
- Çolak, O.; kurbanoglu, C.; Kayacan, M. C. (2007). Milling surface roughness prediction using evolutionary programming methods. *Materials and Design*, vol. 28 p. 657-666. Elsevier.
- Diniz, A. E.; Ferreira, J. R.; Silveira, J. F. (2004). Toroidal Milling of Hardened SAE H13 Steel. Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering Vol. XXVI, No. 1 / 17.
- Souza, A. F.; Bodziak, S. (2012). Advanced free form manufacturing by computer aided systems – Cax. In: Murat Gokcek. (Org.). Mechanical Engineering: Nigde University, 2011. ISBN: 9799533076262. DOI 10.5772/36324. INTECH, v. , p. 555-586.
- Souza, A. F.; Machado, A.; Diniz, A. E. (2014). Evaluating the roughness according to the tool path strategy when milling free form surfaces for mold application. CIRP 14 (2014) , 188 – 193. 6th CIRP International Conference on High Performance Cutting, HPC2014.
- Toh, C. K. (2004). Surface topography analysis in high speed finish milling inclined hardened steel. Vol 28 , Pag 386-398. Precision Engineering.
- Wang, B.; Liu, Z.; Yang, Q. (2013). Investigations of yield stress, fracture toughness, and energy distribution in high speed orthogonal cutting. International Journal of Machine Tools & Manufacture. V73 p.1-8
- Vivancos, J.; Luis, C. J.; Costa, L.; Ortíz, J. A. (2004). Optimal machining parameters selection in high speed milling of hardened steels for injection moulds. *Journal of Materials Processing Technology*, v. 155/156 p. 1505 - 1512. Elsevier.

7. DIREITOS AUTORAIS

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo do material impresso incluído no seu trabalho.

INFLUENCE OF LEAD ANGLE VARIATION IN ROUGHNESS IN MILLING OPERATION OF DIES AND MOLDS

Innocenzo Scandiffio, innocenzo@globo.com¹

Anselmo Eduardo Diniz, anselmo@fem.unicamp.br¹

Adriano Fagali de Souza, adriano.fagali@ufsc.br²

¹State University of Campinas (UNICAMP), Cidade Universitária Zeferino Vaz, Mendeleeiev Street s/n, Barão Geraldo, Campinas, SP 13083-970, Brazil

²Federal University of Santa Catarina (UFSC), 406 Presidente Prudente de Moraes Street, Joinville, SC 89218-000, Brazil

Abstract: Milling is one of the most used processes for the manufacture of molds and dies. Even using modern milling techniques at high speeds, which impart less roughness to the machined surface, manual polishing is still necessary, resulting in higher costs and geometric errors to the product. Therefore, the milling process of complex profiles of molds and dies still has much to be studied and improved in order to reduce the time spent with the polishing process. The contact angle too /piece and the ascending/descending direction have a strong influence on tool life and roughness of molds and dies. Milling tests were performed on semi-cylindrical surfaces with 5 °, 45 ° and 85 ° slopes of the workpiece relative to the tool axis. The material used in the experiments was the AISI D6 (60HRC) steel machined with ball end mill, with the objective of analyzing the influence of the lead angle on the roughness of the part. The main conclusion is that when the lead angle is small and the center of the tool is involved in the cutting, the roughness presents lower values and longer tool life, although in this condition there is greater plastic deformation of the machined surface.

Keywords: Machining strategies; Milling molds; Milling of hardened steel