

INFLUÊNCIA DO CENTRO DA FRESA DE TOPO ESFÉRICO NA GERAÇÃO DE SUPERFÍCIES COMPLEXAS

Igor Basso

Escola de Engenharia de São Carlos – Universidade de São Paulo, Avenida Trabalhador São-Carlense 400, São Carlos/SP 13.566-590, Brasil
igorbasso@usp.br

Rodrigo Voigt

Universidade Federal de Santa Catarina – Campus Joinville, Rua dona Francisca 8300, Joinville/SC 89.219-600, Brasil
rodrigo.voigt@ufsc.br

Felipe Marin

Universidad del País Vasco (UPV/EHU) – Centro de Fabricación Avanzada Aeronáutica, Parque Tecnológico de Bizkaia 202, Zamudio/Bizkaia 48170, Espanha
flpmarin@gmail.com

Alessandro Roger Rodrigues

Escola de Engenharia de São Carlos – Universidade de São Paulo, Avenida Trabalhador São-Carlense 400, São Carlos/SP 13.566-590, Brasil
roger@sc.usp.br

Adriano Fagali de Souza

Universidade Federal de Santa Catarina – Campus Joinville, Rua dona Francisca 8300, Joinville/SC 89.219-600, Brasil
adriano.fagali@ufsc.br

Resumo. Alguns trabalhos sobre fresamento de formas complexas utilizando fresas de ponta esférica podem ser encontrados na literatura, documentando as influências das alterações do contato ferramenta-peça no processo de usinagem. Contudo, estas influências ainda não foram correlacionadas com as propriedades do material usinado. Assim, esse artigo determina o efeito do centro de uma fresa de topo esférico nos mecanismos de remoção de material, rugosidade e topografia de superfícies de diferentes materiais em usinagem de acabamento, o cobre eletrolítico (utilizado em eletrodos para eletroerosão) e o aço AISI H13 em estado normalizado e endurecido (utilizado em moldes e matrizes). Foram usinadas superfícies inclinadas em 0°, 1°, 5° e 85° com relação à direção de avanço da ferramenta para representar as alterações de contato ferramenta-peça. Os experimentos foram realizados com uma fresa de topo esférico de 6 mm de diâmetro, sem lubrificarrefrigerante e sentido de corte concordante e discordante. Foram avaliadas a rugosidade máximas (S_z) e a topografia das superfícies. Os resultados mostraram que o centro da fresa afeta negativamente a superfície aumentando o S_z devido a danos que ocorrem nesta condição. Materiais mais resistentes tendem a apresentar superfícies de melhor qualidade mesmo com a atuação do centro, ao passo que, materiais mais dúcteis têm a superfície totalmente deteriorada nessas condições. Quando o centro deixa de interagir na superfície usinada, mesmo atuando no corte, observou-se uma melhora expressiva da qualidade da superfície. Nessas condições a rugosidade atingiu níveis encontrados na usinagem com a velocidade de corte efetiva da superfície com inclinação de 85°.

Palavras-chave: Fresamento. Integridade superficial. Superfícies complexas. Rugosidade.

1. INTRODUÇÃO

O processo de fabricação de moldes e matrizes envolve o fresamento de superfícies complexas com fresa de topo esférico. Esse processo de fresamento é complexo, pois ocorrem constantes variações no contato peça/ferramenta e da velocidade efetiva de corte. Isso pode trazer uma série de dificuldades para avaliação e previsão dos esforços de corte, topografia e erros de forma (ALTAN *et al.*, 2001; MALI *et al.*, 2021). Além desses efeitos, as propriedades mecânicas da peça, principalmente a dureza, também afeta a qualidade da superfície. Wang e Zheng (2003) compararam os efeitos da atuação do centro da fresa em corpos de prova de aço AISI H13 com diferentes tratamentos térmicos, entretanto os experimentos foram realizados com a ferramenta sempre perpendicular em relação a peça, com o centro participando da geração da superfície.

Cheng *et al.* (2015) investigaram o contato peça/ferramenta e a variação da velocidade efetiva de corte ao inclinar individualmente os ângulos da ferramenta, *tilt* (inclinação da ferramenta na direção da largura de corte) e *lead* (inclinação

da ferramenta na direção do avanço). O material utilizado também foi o aço AISI H13, porém, os autores não exploram a fundo as condições de contato peça/ferramenta em que o centro atua no corte. Souza *et al.* (2014) realizaram a usinagem do aço AISI P20 e demonstraram que a interação do centro da ferramenta na região de corte promove um aumento não proporcional dos esforços de corte e um aumento na rugosidade média da superfície. Aumento atribuído à remoção de material predominantemente por *ploughing*. Nas regiões de contato próximas ao centro da fresa, a velocidade de corte efetiva tende a zero, e espessuras de corte muito pequenas podem promover esse mecanismo de corte bastante discutido em microusinagem mecânica. Batista *et al.* (2017) utilizaram aço AISI H10 tratado (52 HRC) demonstraram um aumento da energia específica de corte com a diminuição do raio efetivo da ferramenta, além da identificação de um dano na superfície induzido pela dificuldade de cisalhamento nas regiões próximas ao centro da fresa, o que corrobora as pesquisas apresentadas acima. Tsai e Liao (2008) e Tuysuz *et al.* (2013) consideraram que o centro da fresa exerce um efeito de endentação no material de trabalho que é somado em seus modelos mecanísticos para previsão das componentes da força de usinagem. Contudo, esses autores não investigam o efeito da endentação na qualidade superficial resultante.

Portanto, é visto que o centro da ferramenta afeta negativamente o processo de remoção de material, mas esse efeito não tem sido levado em conta nos modelos para previsão da topografia da superfície. Os modelos atuais para previsão da superfície consideram apenas a interação cinemática entre a ferramenta e a superfície que está sendo gerada (CORRAL *et al.*, 2012; ZHANG *et al.*, 2020). Porém, a principal fonte de erros desses modelos são os defeitos que surgem na superfície real, decorrentes do efeito de endentação do centro das fresas e/ou as baixas velocidades de corte que ocorrem nas vizinhanças do centro da fresa. Para adicionar o efeito do centro da ferramenta nesses modelos, deve-se entender melhor como se dá o processo de remoção de material, os mecanismos geradores dos danos e sua correlação com as propriedades mecânicas de superfície do material que está sendo usinado.

O objetivo desse artigo é determinar a influência do centro de fresas de topo esférico na geração de superfícies complexas em usinagem de acabamento. São discutidos os mecanismos de corte e a morfologia dos danos em materiais de diferentes propriedades mecânicas com aplicação na indústria de moldes e matrizes. Para tanto, foram usinadas superfícies planas inclinadas, que representam o fresamento de superfícies complexas, com posterior análise da rugosidade e da topografia das superfícies. A seguir é discutido como se dá o contato peça/ferramenta teórico do centro da fresa no corte e sua interação com a superfície. Posteriormente são apresentados e justificados os detalhes experimentais. No capítulo 3, são apresentados e discutido o resultado das superfícies em função do material e do contato peça/ferramenta. E finalmente no capítulo 4 são apresentadas as considerações finais e recomendações futuras.

2. METODOLOGIA

2.1 Influência do centro da fresa no contato peça/ferramenta em fresamento 3-eixos

Souza *et al.* (2014) e Cheng *et al.* (2015) investigaram o contato peça/ferramenta teórico ao se inclinar a ferramenta (ou a superfície) no sentido do avanço (*lead angle*) (ver Fig. 1a). Ambos os grupos demonstraram que a ponta da fresa pode ou não atuar na região do corte dependendo do sentido de avanço (descendente ou ascendente) e do sobremetal que está sendo removido. Portanto, para superfícies planas inclinadas, com trajetória da ferramenta em sentido descendente o ângulo de inclinação crítico (θ_C) no qual o centro da fresa deixa de atuar na região de corte é dado pela Eq. (1) (SOUZA *et al.*, 2014; CHENG *et al.*, 2015):

$$\theta_C = \cos^{-1}[(R_N - a_p)/R_N] \quad (1)$$

no qual R_N é o raio nominal da fresa e a_p é a profundidade de usinagem.

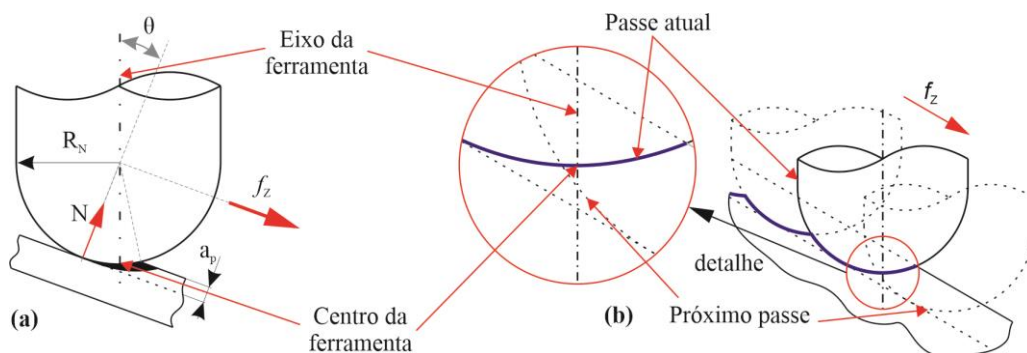


Figura 1. Atuação do centro da fresa teórico em superfícies inclinadas.

Contudo, o centro de corte não interage com a superfície usinada até esse limite, uma vez que a superfície final gerada sempre será tangente a esfera da fresa para um centro de usinagem de 3-eixos. Então, baseando-se no avanço por dente e

na inclinação da superfície (Fig. 1b), o ângulo de inclinação limite em que o centro da fresa deixa de interagir com a superfície usinada (θ_s) é calculado teoricamente pela Eq. (2):

$$\theta_s = \sin^{-1}[(f_z/(2R_N))] \quad (2)$$

no qual f_z é o avanço por dente.

2.2 Detalhes experimentais

Para avaliação dos mecanismos de remoção de material em condições de contato peça/ferramenta em que o centro da fresa de topo esférico atua no corte, foram usinadas superfícies planas inclinadas na direção do avanço da ferramenta (*lead angle*) em um centro de usinagem 3-eixos. O objetivo do ensaio é gerar 3 tipos de superfícies: i) superfícies em que o centro da fresa atue na região de corte e na superfície usinada, ii) superfícies em que o centro atue na região de corte, mas não interaja com a superfície usinada e iii) superfícies em que o centro não atue no corte.

Os ensaios de fresamento foram executados em um centro de usinagem Romi D600, com rotação máxima de 10.000 rpm e potência do eixo árvore de 20 CV, de acordo com o delineamento experimental apresentado na Tab. 1. A ferramenta utilizada foi a fresa de topo esférico de metal duro, com cobertura de TiAlN, de 6 mm de diâmetro, duas arestas, 30° de ângulo de hélice, fabricada pela Mitsubishi (código MP2SBR0300). As demais condições de corte foram mantidas constantes: rotação 9.549 rpm, profundidade de usinagem 0,5 mm, largura de corte 0,1 mm, avanço por dente 0,1 mm/Z. A trajetória de avanço da ferramenta foi em sentido descendente. Os ensaios foram realizados sem uso de fluido lubrificante. Aplicando as condições de corte utilizadas nos experimentos à Eq. (1), o ângulo de inclinação limite teórico em que o centro deixa de atuar no corte (θ_c) é de 33,5°. Aplicando as condições de corte à Eq. (2), obtém-se que o ângulo limite de inclinação em que o centro da fresa deixa de interagir com a superfície usinada (θ_s) é de 0,95°.

Tabela 1. Delineamento experimental.

Variável de Controle	Nível	Valores
Inclinação da superfície, θ	4	0°, 1°, 5° e 85°
Material da peça	3	Cobre eletrolítico (CE), AISI H13 normalizado (HN) e AISI H13 endurecido (HT)
Sentido de corte	2	Concordante e discordante

Como apresentado na Fig. 2 e na Tab. 1, os ângulos de inclinação da superfície (θ) foram de 0°, 1°, 5° e 85°. Nas condições de corte utilizadas no ensaio, descritas abaixo, o contato peça/ferramenta, principalmente com relação a atuação do centro da fresa, em cada inclinação se dá na seguinte forma: i) 0° (< θ_s), o centro da fresa atua no corte e interage com a superfície usinada final; ii) 1° ($\approx \theta_s$) é o limiar da interação do centro da fresa com a superfície usinada; iii) 5° (> θ_s ; e < θ_c) o centro da fresa atua no corte, mas não interage com a superfície usinada; e iv) 85° (> θ_c) é a condição de referência, onde não há interação do centro da fresa na região do corte ou com a superfície usinada, além disso a velocidade efetiva de corte é próxima a nominal e a região cilíndrica da ferramenta não há influência na superfície usinada. Como em usinagem 3-eixos a direção do eixo da fresa é constante, inevitavelmente a direção do avanço foi alterada, porém, esse fato é intrínseco ao processo de fresamento com fresa de topo esférica. A Tab. 2 apresenta a variação dos raios efetivos, a variação das velocidades efetivas e a velocidade efetiva que gerou a superfície, tomadas no ponto de tangência entre a calota esférica da fresa e a superfície. Nos ângulos de 1° e 5°, a notação (0) na variação do raio efetivo e da velocidade de corte efetiva indica a atuação do centro da fresa no corte (Fig. 2).

Foram testados materiais de três diferentes propriedades mecânicas a fim de investigar a influência do comportamento mecânico do metal nos mecanismos de remoção de material. Aço AISI H13 em estado normalizado (HN) e endurecido (HT) com durezas de 227 HV e 497 HV, respectivamente, foram selecionados por serem aços amplamente utilizados na indústria de moldes e matrizes. O cobre eletrolítico (CE), com dureza de 95 HV, com aplicação em insertos metálicos para injeção de plásticos, foi selecionado devido sua alta plasticidade e capacidade de encruamento. Também se avaliou a influência do sentido de corte (concordante e discordante) nos mecanismos de corte e na superfície usinada, especialmente nas condições de contato peça/ferramenta em que o centro da fresa interage com a superfície usinada.

As superfícies foram avaliadas no perfilômetro óptico Veeco, modelo WYKO NT1100, e software Vision 4.20®. A rugosidade máxima de área (S_z) foi obtida pela média de três imagens geradas em regiões aleatórias das superfícies de cada condição. As imagens foram geradas com ampliação de 10x resultando em uma área de 462 x 608 μm^2 . No tratamento das imagens foi corrigido a inclinação da superfície e foi ajustado uma máscara no histograma nos dados de altura “Z” da superfície para evitar que ruídos digitais que não pertencem a superfície interferisse nas medições. Então, a rugosidade S_z foi calculada pela média da soma dos cinco maiores picos com os cinco menores vales, obtidos em toda a área de da imagem (462 x 608 μm^2), sem a aplicação de filtro *cut-off*. Foi realizada análise de variância (ANOVA), utilizando-se o software Minitab v19.1®, considerando um o índice de confiabilidade de 95% (α de 0,05). Para tanto, efetuou-se a avaliação dos resíduos a fim de garantir normalidade e independência.

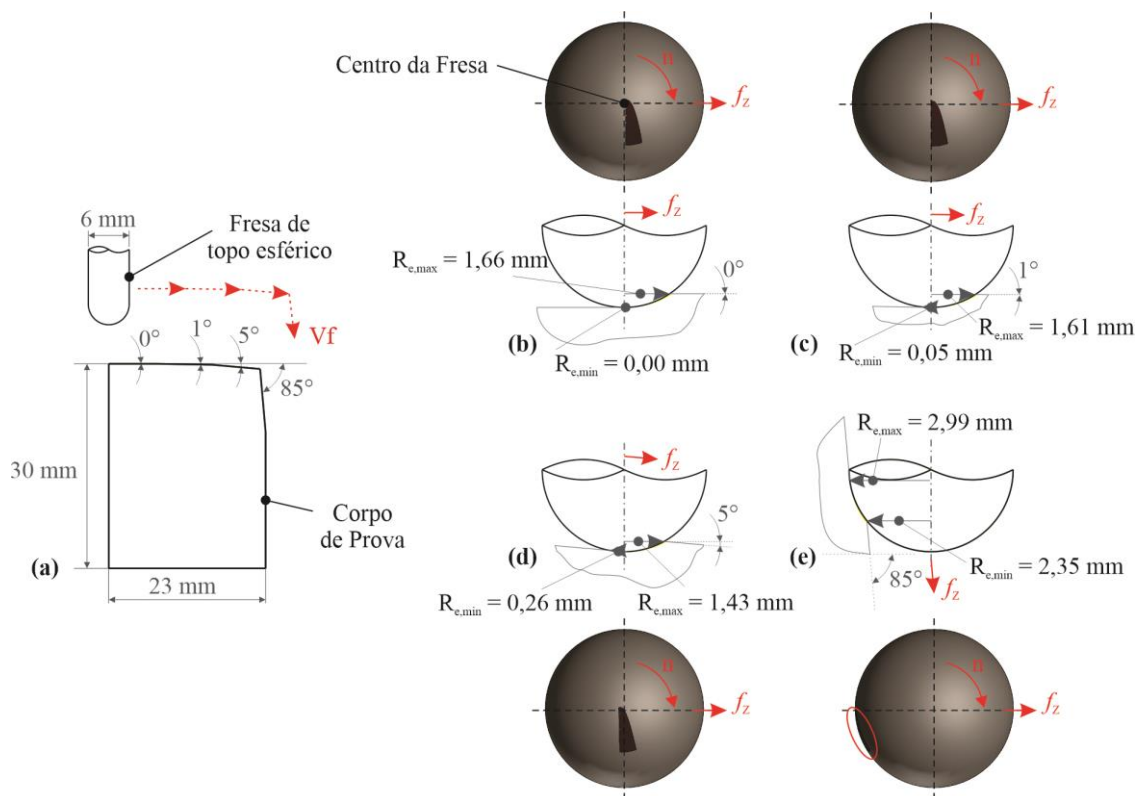


Figura 2. (a) Dimensões do corpo de prova e direção de avanço da ferramenta; Contato peça/ferramenta em sentido concordante, raios efetivos máximo e mínimo para inclinação da superfície de (b) 0°, (c) 1°, (d) 5° e (e) 85°.

Tabela 2. Raios e velocidades de corte efetivos em função do contato peça/ferramenta.

Ângulo de Inclinação da Superfície, θ (°)	Variação do raio efetivo, $R_{e,min} - R_{e,max}$ (mm)	Variação da velocidade de corte efetiva $V_{Ce,min} - V_{Ce,max}$ (m/min)	Velocidade de corte efetiva de geração da superfície, $V_{C,s}$ (m/min)
0	0,00 – 1,66	0,0 – 97,8	$\approx 0,0$
1	0,05 – (0) – 1,61	3,0 – (0) – 96,6	$\approx 3,0$
5	0,26 – (0) – 1,43	15,6 – (0) – 85,8	$\approx 15,6$
85	2,35 – 2,99	141,0 – 179,4	$\approx 179,4$

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A análise de variância (ANOVA) apresentada na Tab. 3 e Fig. 3 e 4 demonstra que o material da peça (Valor-P = 0,000 < 0,05; contribuição = 34,35%), a inclinação da superfície (Valor-P = 0,000 < 0,05; contribuição = 32,09%) e sua interação (Valor-P = 0,000 < 0,05; contribuição = 18,34%) são os parâmetros significativos que mais contribuem para a variação da rugosidade máxima (S_z). O sentido de corte (Valor-P = 0,040 < 0,05; contribuição = 1,61%) e sua interação com a inclinação da superfície (Valor-P = 0,048 < 0,05; contribuição = 3,10%), embora significantes, possuem uma contribuição desprezível na variação de S_z . Por fim, a interação entre o material da peça e o sentido de corte (Valor-P = 0,903 > 0,05) foi não significativa para a variação de S_z .

De forma geral, a rugosidade S_z diminui com o aumento do ângulo da inclinação da superfície para todos os materiais da peça testados (Fig. 3 e 4a). O aumento do ângulo de inclinação da superfície implica no aumento do raio efetivo máximo e, conseqüentemente, no aumento da velocidade de corte efetiva em que a superfície é gerada, como apresentado na Fig. 2 e Tab. 2. A diminuição da rugosidade S_z ocorre principalmente devido a diminuição de danos na superfície, como observado na Fig. 5. Nas superfícies com inclinação de 0° e 1°, são observadas marcas deixadas pelo centro da fresa e cavidades, especialmente nos aços, o que contribui para o aumento de S_z . Essas cavidades são defeitos característicos devido à baixa velocidade de corte em que a superfície é gerada nessa condição, como discutido por Gillibrand (1979) em corte ortogonal e Biondani *et al.* (2020) em fresamento com fresa de topo esférica. A partir de 5° de inclinação, não há mais marcas do centro da ferramenta na superfície, e a rugosidade diminui consideravelmente em relação às condições em que o centro atuava na superfície. Também há um aumento considerável na velocidade de corte efetiva em que a superfície foi gerada (de 3,0 para 15,6 m/min, Tab. 2), o que proporciona uma maior facilidade para o

cisalhamento do material. Porém, não é observada uma mudança expressiva na variação da média de S_z quando se varia o ângulo de inclinação de 5° para 85°, mesmo, aparentemente havendo uma ligeira melhora na topografia observada nas superfícies de 85° em comparação às de 5° (Fig. 5).

Tabela 3. ANOVA para S_z . ($R_{ajst}^2 = 0,836$).

Fator	Graus de liberdade	Soma dos Quadrados	Quadrado médio	Valor-F	Valor-P	Contribuição
Inclinação da superfície	3	232,632	77,544	30,75	0,000	32,09%
Material da peça	2	249,069	124,534	49,38	0,000	34,35%
Sentido de corte	1	11,662	11,662	4,62	0,040	1,61%
Inclinação da superfície Vs. Material da peça	6	132,988	22,165	8,79	0,000	18,34%
Inclinação da superfície Vs. Sentido de corte	3	22,466	7,489	2,97	0,048	3,10%
Material da peça Vs. Sentido de corte	2	0,514	0,257	0,10	0,903	0,07%
Erro	30	75,655	2,522			10,44%
Total	47					100,00%

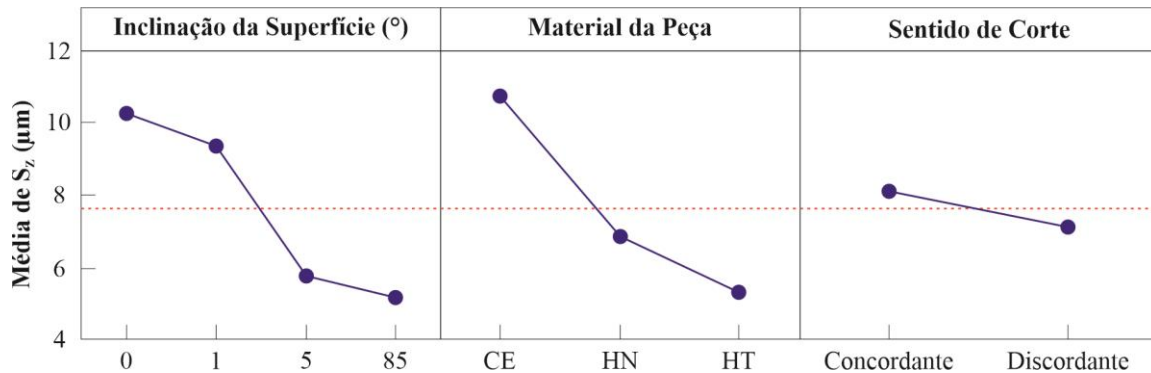


Figura 3. Gráfico de efeitos principais para S_z .

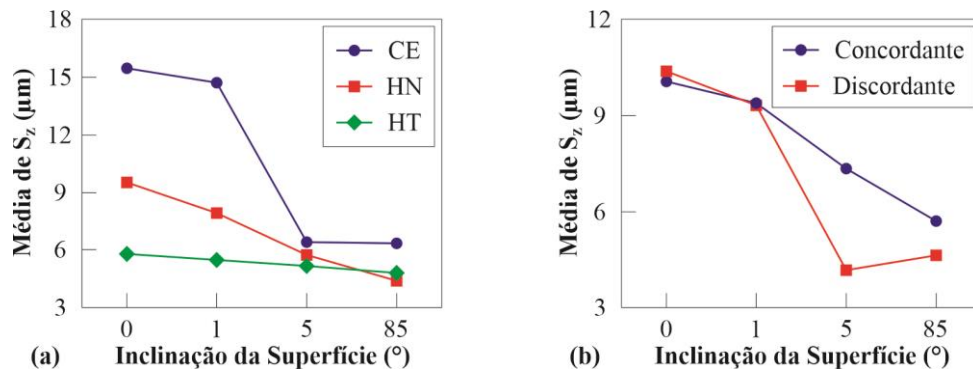


Figura 4. Gráfico da interação da (a) inclinação da superfície Vs. material da peça e da (b) inclinação da superfície Vs. sentido de corte para S_z .

A rugosidade S_z também diminui drasticamente com o aumento da resistência mecânica do material que está sendo usinado, principalmente nas condições nas quais o centro da fresa interage com a superfície usinada. Nessas condições, o cobre eletrolítico (CE) é o material testado que apresenta o pior resultado. Sua superfície usinada final apresenta uma topografia irregular, sem marcas de usinagem e aspecto de deformação plástica (Fig. 5a e 5e). Porém, ao aumentar a velocidade de corte efetiva e eliminar a interação do centro com a superfície usinada (5° e 85°), há uma melhora considerável na qualidade da superfície, diminuindo o S_z para o mesmo nível dos aços (4 – 5 µm). Entre os aços, o endurecido apresentou superfícies com maior qualidade e menor S_z , devido a estrutura martensítica do material que favorece o cisalhamento do material. Essa observação corrobora com os resultados de Wang e Zheng (2003), que compararam o desempenho de usinabilidade entre dois estados metalúrgicos (endurecido e normalizado) do aço AISI H13 em superfície plana horizontal (0°). Esses autores demonstraram que o aço normalizado exige uma maior pressão específica de cisalhamento, isso devido à sua maior plasticidade em relação ao material endurecido. Nesta pesquisa atual, é nítido que esse comportamento ocorre para demais inclinações de superfície, sobretudo, quando a velocidade efetiva

em que a superfície foi gerada é baixa. Por fim, quando o centro deixa de interagir com a superfície usinada, o material da peça demonstrou menor influência sobre a rugosidade e topografia da superfície final (Fig. 4a e Fig. 5h à 5m).

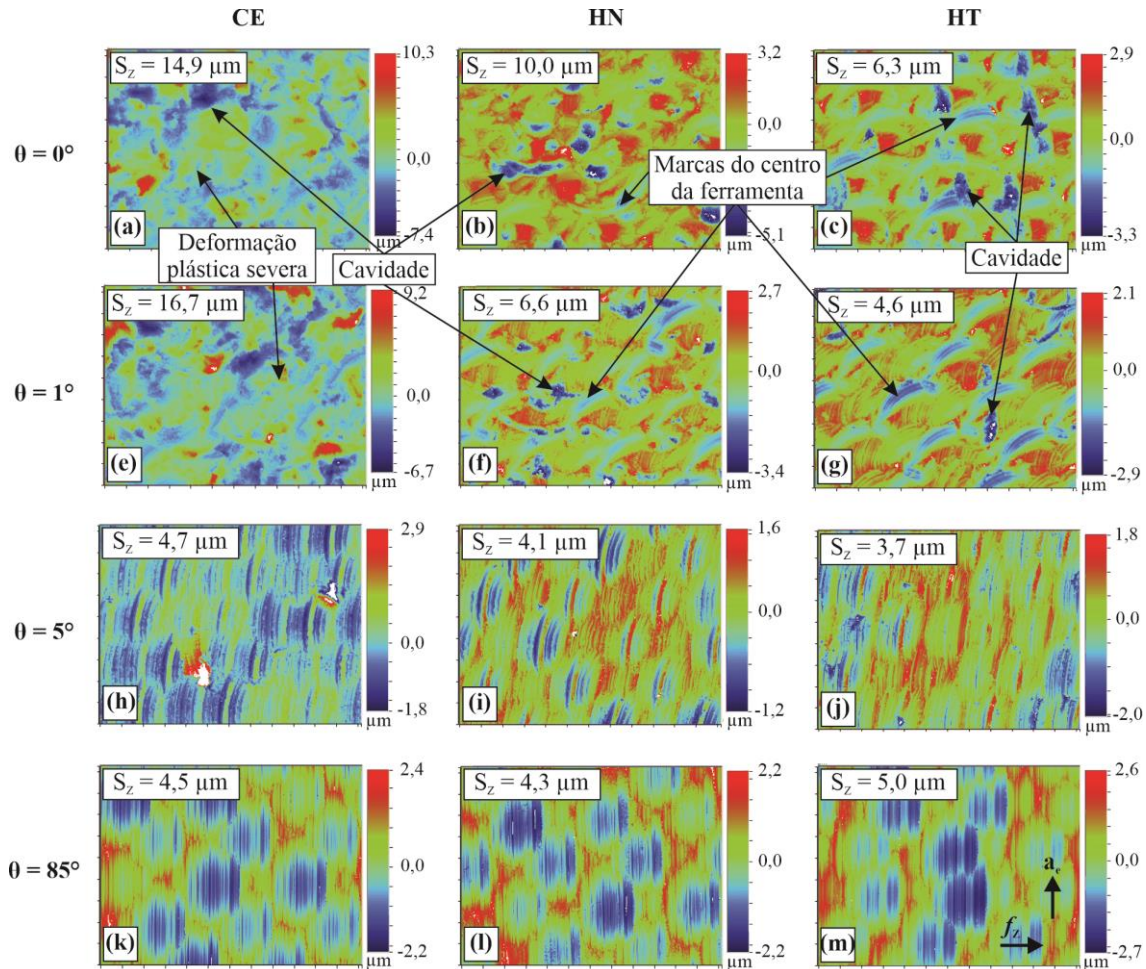


Figura 5. Superfícies usinadas em função do ângulo de inclinação da superfície (θ) e do material da peça, para o sentido de corte discordante. Valores de S_z médios. Imagens obtidas com área de 462 μm x 608 μm .

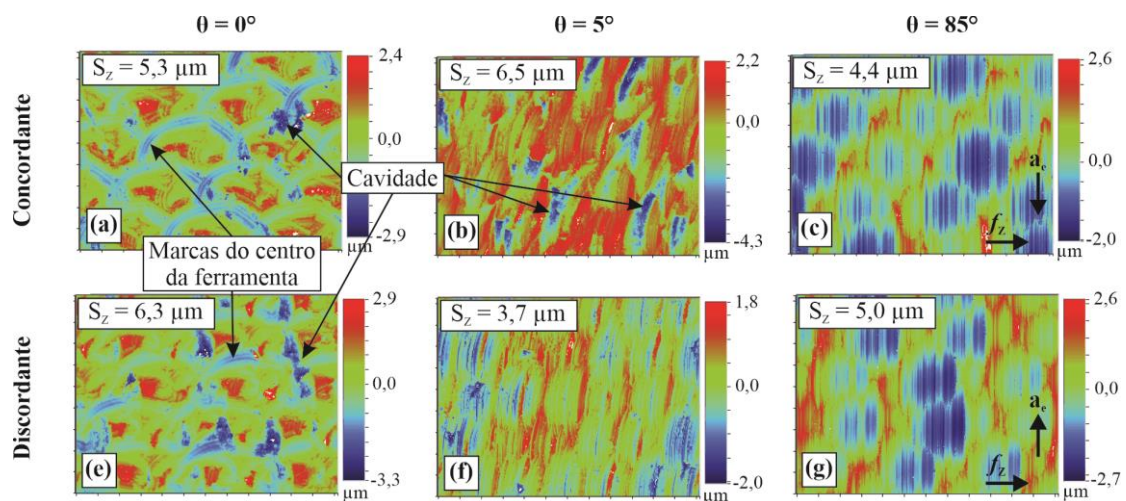


Figura 6. Superfícies usinadas em função do sentido de corte e do ângulo de inclinação da superfície (θ), para o aço AISI H13 endurecido (HT). Valores de S_z médios. Imagens obtidas com área de 462 μm x 608 μm .

O sentido de corte afeta consideravelmente a topografia e a rugosidade da superfície (Fig. 6), sobretudo quando o centro não interage com a superfície usinada. De acordo com a Fig. 4b, na média não há diferenças significativas na

rugosidade das superfícies para os ângulos de 0° e 1° entre o sentido concordante e discordante. Porém, para as superfícies com ângulo de inclinação de 5° e 85°, o sentido discordante promove uma diminuição de S_z . Isso se deve ao aumento nos danos da superfície quando gerada pelo corte concordante, sobretudo em 5°, como apresentado na Fig. 6 para o aço endurecido. No sentido discordante, a porção removida do material é empurrada para fora da peça e a superfície é gerada no início da formação do cavaco. Como a aresta engaja na menor espessura de corte, há a tendência de alisar a superfície. Por outro lado, no corte concordante, o material removido é empurrado contra a superfície usinada e a superfície é gerada quando o cavaco é removido da peça. Como há um grande volume de material em movimento, pode facilitar a ocorrência de danos como cavidades na superfície final, principalmente em baixas velocidades de corte.

4. CONCLUSÕES

Este artigo determinou a influência do centro da fresa de topo esférico sobre superfícies planas usinadas em condições de acabamento, com distintas inclinações em relação à direção de avanço da fresa. Foram testadas quatro condições de contato peça/ferramenta, materiais com três diferentes propriedades mecânicas / estados metalúrgicos e sentidos de corte concordante e discordante. Como resposta, foram avaliadas a rugosidade máxima S_z e a topografia das superfícies. As principais conclusões são:

- os resultados mostraram, de forma geral, que a rugosidade é afetada mais significativamente pelo centro da ferramenta de corte nos materiais da peça de maior ductilidade e menor dureza. Quando a ferramenta realiza o corte tangencial (diâmetro efetivo tende ao diâmetro nominal da ferramenta) as propriedades dos materiais usinados passam a ter menor influência na rugosidade;
- o centro da fresa afeta negativamente a superfície da peça quando há interação entre ambos. Nos materiais mais resistentes, há formação de vales devido a deformação induzida pelo centro não cortante da fresa. Por outro lado, um material mais dúctil pode apresentar deformações plásticas severas devido as baixas velocidades de corte que geram a superfície nessas condições;
- um pequeno ângulo de inclinação (neste caso 5°) já é o suficiente para diminuir consideravelmente a rugosidade máxima (S_z), principalmente no sentido discordante de corte. Isso ocorre porque nessas condições o centro da fresa deixa de interagir com a superfície usinada, e a velocidade de corte aumenta consideravelmente (de 0 para 15,6 m/min) favorecendo o cisalhamento do material;
- o aumento do ângulo de inclinação da superfície de 5° para 85° e, consequentemente, da velocidade de corte efetiva de 15,6 m/min para 179,4 m/min, não promoveu uma alteração significativa da rugosidade máxima S_z , embora tenha havido uma leve melhora aparente na topografia para a superfície de 85°;
- para pequenos ângulos de inclinação da superfície (neste caso 5°), o sentido de corte discordante resultou em superfícies de melhor qualidade para todos os materiais da peça testados. Isso ocorre porque nesse sentido de corte a aresta da ferramenta promove uma espécie de alisamento da superfície, e o material removido é empurrado para fora da peça evitando a ocorrência de danos na superfície.

5. REFERÊNCIAS

- Altan, T., Lilly, B., Yen, Y.C., 2001. "Manufacturing of dies and molds". *CIRP Annals*, Vol. 50, p. 404-422.
- Batista, M.F., Rodrigues, A.R., Coelho, R.T., 2017. "Modelling and characterization of roughness of moulds produced by high-speed machining with ball-nose end mill". *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, Vol. 231, p. 933-944.
- Biondani, F., Bissacco, G., Hansen, H.N., 2020. "Surface topography analysis of ball end milled tool steel surfaces". *Procedia CIRP*, Vol. 87, p. 153-158.
- Chen, X., Zhao, J., Zhang, W., 2015, "Influence of milling modes and tool postures on the milled surface for multi-axis finish ball-end milling". *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 77, p. 2035-2050.
- Corral, I.B., Calvet, J.V., Fernández, A.D., 2012. "Surface topography in ball-end milling processes as a function of feed per tooth and radial depth of cut". *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, Vol. 53, p. 151-159.
- Gillibrand, D., 1979. "Micro-defects on machined carbon steels surfaces". *Precision Engineering*, Vol. 1, p. 89-94.
- Mali, R.A., Gupta, T.V.K., Ramkumar, J., 2021. "A comprehensive review of free-form surface milling—Advances over a decade". *Journal of Manufacturing Processes*, Vol. 62, p. 132-167.
- Souza, A.F., Diniz, A.E., Rodrigues, A.R., Coelho, R.T., 2014. "Investigating the cutting phenomena in free-form milling using a ball-end cutting tool for die and mold manufacturing". *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 71, p. 1565-1577.
- Tsai, C.L., Liao, Y.S., 2008. "Prediction of cutting forces in ball-end milling by means of geometric analysis". *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 205, p. 24-33.
- Tuysuz, O., Altintas, Y., Feng, H.Y., 2013. "Prediction of cutting forces in three and five-axis ball-end milling with tool indentation effect". *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Vol. 66, p. 66-81.

Zhang, J., Zhang, S., Jiang, D., Wang, J., Lu, S., 2020, "Surface topography model with considering corner radius and diameter of ball-nose end miller". *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 106, p. 3975-3984.

Wang, J.J.J., Zheng, M.Y., 2003, "On the machining characteristics of H13 tool steel in different hardness states in ball end milling". *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 22, p. 855-863.

6. RESPONSABILIDADE PELAS INFORMAÇÕES

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

Effect of the ball-end mill tip on complex surfaces generation

Igor Basso

University of São Paulo (USP) at São Carlos School of Engineering (EESC), 400 Trabalhador São-Carlense Avenur, São Carlos SP 16.566-590, Brazil
igorbasso@usp.br

Rodrigo Voigt

Federal University of Santa Catarina – Campus Joinville, 8300 Dona Francisca Street, Joinville SC 89219-600, Brazil
rodrigo.voigt@ufsc.br

Felipe Marin

Universidad del País Vasco (UPV/EHU) – Centro de Fabricación Avanzada Aeronáutica, Parque Tecnológico de Bizkaia 202, Zamudio/Bizkaia 48170, Espanha
flpmarin@gmail.com

Alessandro Roger Rodrigues

University of São Paulo (USP) at São Carlos School of Engineering (EESC), 400 Trabalhador São-Carlense Avenur, São Carlos SP 16.566-590, Brazil
roger@sc.usp.br

Adriano Fagali de Souza

Federal University of Santa Catarina – Campus Joinville, 8300 Dona Francisca Street, Joinville SC 89219-600, Brazil
adriano.fagali@ufsc.br

Abstract. *This paper determined the effect of the ball-nose end mill tip on cutting mechanism, roughness, and topography of different part materials. Surfaces with lead angles of 0°, 1°, 5° and 85° in electrolytic copper, AISI H13 annealed and hardening were machined. The tests were conducted with a ball-nose end mill with 6 mm diameter without coolant in down- and up-milling. Maximum roughness (S_z) and surface topography were evaluated by optical profilometry. More fragile part materials tend to show higher quality surfaces even with tool tip interaction, whereas more ductile materials tend to show deteriorated surface under the same cutting conditions. An expressive increase in surface quality was observed when tool tip does not interact with the surface machined. Under these conditions the maximum roughness reaches values found on surfaces generated with 85° lead angle.*

Keywords: *Complex surfaces, Milling, Surface integrity, Roughness*

RESPONSIBILITY NOTICE

The authors are the only responsible for the printed material included in this paper.