

ANÁLISE SUPERFICIAL DE PEÇAS TORNEADAS E ACABADAS POR DEFORMAÇÃO PLÁSTICA

Giselle Silva Macedo

Carlos Eiji Hirata Ventura

Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de São Carlos, Rod. Washington Luis km 235, 13565-905, São Carlos/SP

gisellemacedo@estudante.ufscar.br, ventura@ufscar.br

Resumo: Conhecido na literatura como *complementary machining*, o acabamento de peças torneadas por deformação plástica com uso do inserto utilizado para usinagem tem como principais objetivos a redução da rugosidade da peça e a alteração das características microestruturais na subsuperfície, o que é realizado a partir da inversão dos movimentos de rotação e avanço, que gera movimento relativo entre a superfície de folga do inserto e a superfície já torneada, sem que haja remoção de material. A fim de se investigar os efeitos de diferentes parâmetros, como velocidade tangencial, avanço e profundidade de penetração, no acabamento superficial da peça após a realização do processo mencionado, assim como a influência da superfície previamente usinada, ensaios de torneamento e acabamento por deformação plástica com inserto de corte de metal duro sem revestimento e em diferentes condições foram realizados em corpos de prova do aço inoxidável 304, os quais tiveram sua superfície analisada em microscópio e os parâmetros de rugosidade medidos. De maneira a se verificar o desgaste da ferramenta após ambas as operações, os insertos foram analisados qualitativamente. A partir dos resultados obtidos, verificou-se a possibilidade de se reduzir a rugosidade máxima da peça em até oito vezes após o torneamento.

Palavras-chave: Torneamento; Acabamento por deformação plástica; Rugosidade.

1. INTRODUÇÃO

As características superficiais de peças que em sua aplicação são solicitadas por cargas mecânicas, térmicas ou químicas têm sido investigadas de forma intensa, com o objetivo de se aumentar a eficiência e o ciclo de vida dos produtos. Tais características são fortemente influenciadas pelas operações de acabamento, que definem a textura superficial da peça e suas propriedades subsuperficiais, resultantes das cargas aplicadas durante a remoção de material. Cargas mecânicas provocam deformações plásticas, arrancamento, trincas e tensões residuais (Grzesik *et al.*, 2010), enquanto cargas térmicas, além também de tensões residuais, podem levar a alterações no tamanho de grão, zonas termicamente afetadas, queima, entre outros (Field *et al.*, 1989).

A fim de tornar os componentes fabricados mais resistentes, processos de acabamento ou tratamento superficial são utilizados para, por exemplo, reduzir a rugosidade, sendo que altos valores podem levar a uma redução da resistência à corrosão e à fadiga devido a concentrações de tensão e à maior facilidade de propagação de trincas (Hussain *et al.*, 2009; Chen *et al.*, 2013). De acordo com Schönbauer *et al.* (2017), materiais metálicos com elevada resistência costumam ser muito sensíveis a pequenos defeitos. Sob carregamentos cíclicos, vazios ou inclusões não-metálicas de poucos micrometros podem iniciar trincas na superfície.

Neste contexto, Gerstenmeyer *et al.* (2016) apresentaram os primeiros resultados sobre o desenvolvimento de uma estratégia denominada *complementary machining* (ou usinagem complementar, traduzindo literalmente), que consiste em uma combinação de corte e tratamento superficial por deformação plástica. Após o torneamento, a rotação da peça e o movimento de avanço do inserto de corte são revertidos e a peça é pressionada pela superfície de folga, gerando redução da rugosidade e possível encruamento. Tal estudo foi realizado no Ferro-Armco e no aço AISI 4140. No primeiro material, mais dúctil, uma redução na rugosidade média de aproximadamente 67% foi verificada, enquanto para o segundo material, a queda foi de 33%. Schwalm *et al.* (2020), no processamento do aço AISI 4140 com insertos de corte revestidos conseguiram reduções entre 10% e 70%, dependendo da rotação da peça. O acabamento deste material a partir do processo citado foi novamente investigado pelo grupo, mas, dessa vez, com a aplicação de insertos de corte com diferentes preparações de aresta e com foco nas características da subsuperfície gerada (Gerstenmeyer *et al.*, 2017; Zanger *et al.*, 2017). Com auxílio de simulações por elementos finitos, os autores concluíram que maiores fatores de forma causam maiores temperaturas, refinamento de grãos do material e maiores espessuras de camada afetada.

Assim, verificam-se as vantagens associadas ao processo de acabamento por deformação plástica com o uso da mesma ferramenta aplicada no corte, que permite a redução do tempo de operação e a melhora significativa da qualidade superficial, além do potencial aumento da resistência do material a partir da deformação plástica imposta. Destaca-se que os estudos têm sido focados em uma quantidade limitada de materiais e resultados ligados ao aço

inoxidável AISI 304 não foram encontrados. Sabendo-se que este corresponde a um aço metaestável, que possibilita transformação de fase induzida por plasticidade e consequente incremento das propriedades mecânicas (Fricke *et al.*, 2021), a investigação proposta corresponde a um primeiro passo e tem como foco a obtenção de uma maior compreensão do processo e das características superficiais da peça produzida, como a rugosidade, comumente utilizada na indústria para avaliação da qualidade.

2. METODOLOGIA

Eixos de aço inoxidável AISI 304, com diâmetro de 35 mm e comprimento de 200 mm, foram submetidos a processos de torneamento e deformação plástica superficial com insertos de corte de metal duro (WC-5%Co) sem revestimento, com geometria SNMN 120408 (quadrados, neutros e com raio de ponta de 0,8 mm), preparados em uma retificadora Agathon DOM Plus (potência máxima de 16 kW e rotação máxima de 3400 rpm), equipada com rebolo diamantado do tipo copo, com tamanho de grão D46, ligante resinoide e concentração C100. Para isso, foram utilizados parâmetros constantes: velocidade de avanço axial $v_{fa} = 4$ mm/min, velocidade de corte $v_c = 20$ m/s e velocidade de rotação do inserto para acabamento do raio de ponta $v_R = 20^\circ/s$. A fim de se evitar efeitos do desgaste da ferramenta abrasiva, antes da retificação de cada inserto o rebolo foi dressado por um rolo dressador de óxido de alumínio, também do tipo copo, com granulometria 180#, ajustado com velocidade de corte $v_{cd} = 10$ m/s e velocidade de avanço $v_{fad} = 5$ µm/s. Tendo sido retificados em laboratório, os oito insertos gerados foram caracterizados no microscópio para análise tridimensional de imagens Alicona InfiniteFocus SL (aumento máximo de 500x com as lentes disponíveis). Na região do raio de ponta, a partir do posicionamento de 200 perfis perpendiculares às marcas de retificação (em cada ponta), obteve-se uma rugosidade máxima $R_z = 3,41 \pm 0,17$ µm e um lascamento na aresta $\Delta r = 2,06 \pm 0,22$ µm.

Os eixos foram divididos em trechos de 30 mm, os quais foram totalmente torneados e tiveram metade do seu comprimento acabado por deformação plástica superficial. Os ensaios foram executados com aplicação de emulsão de forma abundante (concentração de 10%) em um torno CNC Romi Centur 30D (potência máxima de 9 kW e rotação máxima de 3000 rpm) com diferentes parâmetros (Tab. 1), que contemplam dois tipos de superfície prévia produzida por torneamento (a partir de variações do avanço por volta), três níveis de rotação, avanço e profundidade de penetração no processo de acabamento final por deformação plástica.

Tabela 1. Parâmetros de corte e deformação plástica utilizados nos experimentos

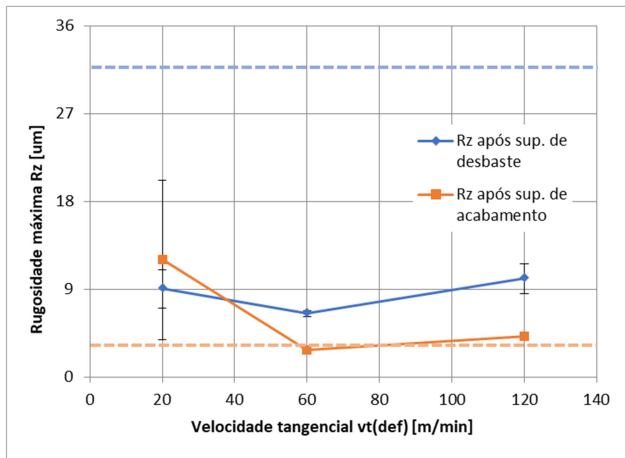
Superfície prévia	Velocidade tangencial $v_t(\text{def})$ [m/min]	Avanço $f(\text{def})$ [mm/rev]	Profundidade de penetração $a_p(\text{def})$ [µm]
<u>Desbaste:</u> $v_c = 100$ m/min, $a_p = 0,5$ mm, $f = 0,5$ mm/rev ou	20	0,10	25
	60	0,10	25
	120	0,10	25
	60	0,05	25
	60	0,50	25
	60	0,10	10
<u>Acabamento:</u> $v_c = 100$ m/min, $a_p = 0,5$ mm, $f = 0,1$ mm/rev	60	0,10	50
	60	0,10	50

Cada condição investigada foi executada em dois trechos distintos, de modo a se avaliar a repetibilidade do procedimento, e cada trecho foi obtido com o uso de uma ponta nova do inserto, de maneira a se evitar a influência do desgaste da ferramenta. Em seguida, as superfícies trabalhadas (usinadas e acabadas por deformação plástica) foram avaliadas no microscópio já mencionado. Para uma caracterização abrangente, foram escolhidos os seguintes parâmetros: rugosidade máxima R_z (média de cinco distâncias entre pico e vale no comprimento de amostragem), assimetria R_{sk} e achatamento R_{ku} da distribuição. A rugosidade foi obtida a partir do posicionamento de 200 perfis paralelos à direção de avanço da ferramenta em três diferentes regiões de cada trecho trabalhado. Assim, valores médios e desvios-padrão de seis medidas foram utilizados para análise. As pontas usadas dos insertos foram observadas no mesmo microscópio, a fim de se verificar se houve deterioração em função dos processos de corte e deformação.

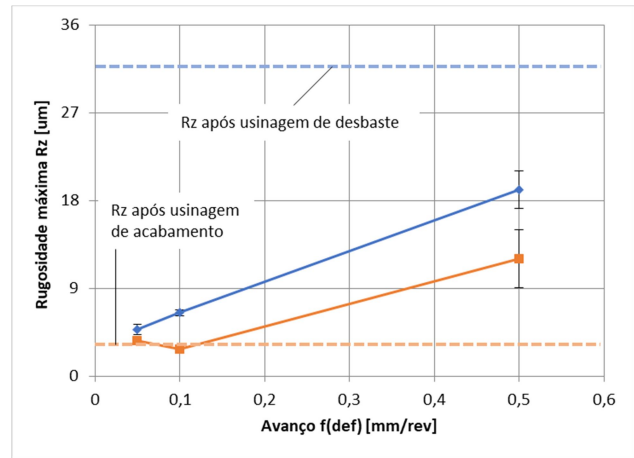
3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

As Fig. 1, 2 e 3 apresentam os resultados gerados a partir dos perfis de rugosidade para as diferentes condições de processo. Em todos os casos, as linhas contínuas tratam dos valores obtidos após a deformação plástica. Já as linhas horizontais tracejadas correspondem aos valores médios das medições realizadas nas superfícies apenas usinadas, sendo a linha azul relacionada à superfície torneada com parâmetros de desbaste e a linha laranja à superfície torneada com parâmetros de acabamento. Nos gráficos de rugosidade máxima R_z (Fig. 1), nota-se para esta última situação, como esperado, menor valor de rugosidade ($R_z = 3,72 \pm 0,62$ µm) em comparação à superfície desbastada ($R_z = 30,26 \pm 1,77$ µm). Em relação ao processo de deformação plástica, também se verifica uma forte tendência de crescimento de R_z com maiores valores de avanço $f(\text{def})$, mas variação irrelevante com alterações da velocidade tangencial $v_t(\text{def})$ e profundidade de penetração $a_p(\text{def})$. Observa-se ainda uma melhoria significativa da rugosidade a partir da superfície

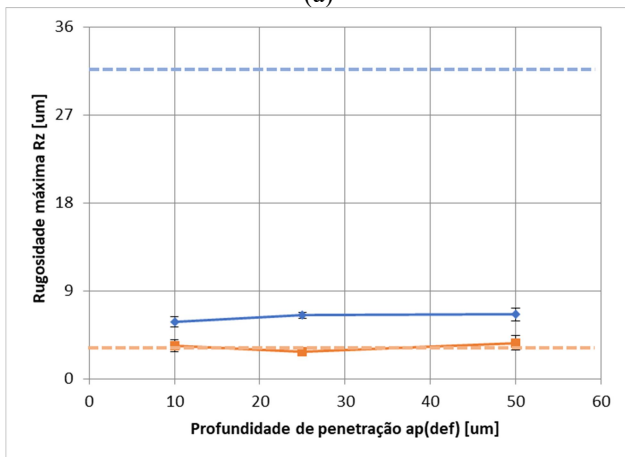
inicialmente desbastada, com redução possível de aproximadamente oito vezes, enquanto nenhuma melhoria relevante ou até uma piora são verificadas após a deformação plástica da superfície previamente torneada com parâmetros de acabamento, principalmente com baixo valor de velocidade tangencial e elevado valor de avanço.



(a)



(b)



(c)

Figura 1. Rugosidade máxima R_z em função da variação (a) da velocidade tangencial (com $f(def) = 0,1$ mm/rev e $ap(def) = 25$ μm), (b) do avanço (com $vt(def) = 60$ m/min e $ap(def) = 25$ μm), (c) da profundidade de penetração (com $vt(def) = 60$ m/min e $f(def) = 0,1$ mm/rev)

Conforme apresentado na Fig. 2, a assimetria da distribuição do perfil de rugosidade R_{sk} também é reduzida pelo processo de deformação plástica realizado na superfície torneada com parâmetros de desbaste ($R_{sk} = 0,86 \pm 0,08$), indicando uma redistribuição do material, principalmente com redução dos picos, e aumento da simetria do perfil considerando-se a largura de picos e vales. Levando-se em conta os desvios e oscilações, a superfície torneada com parâmetros de acabamento ($R_{sk} = 0,06 \pm 0,26$) não sofre mudança significativa em relação ao parâmetro R_{sk} após sua deformação plástica, mantendo um perfil aproximadamente simétrico.

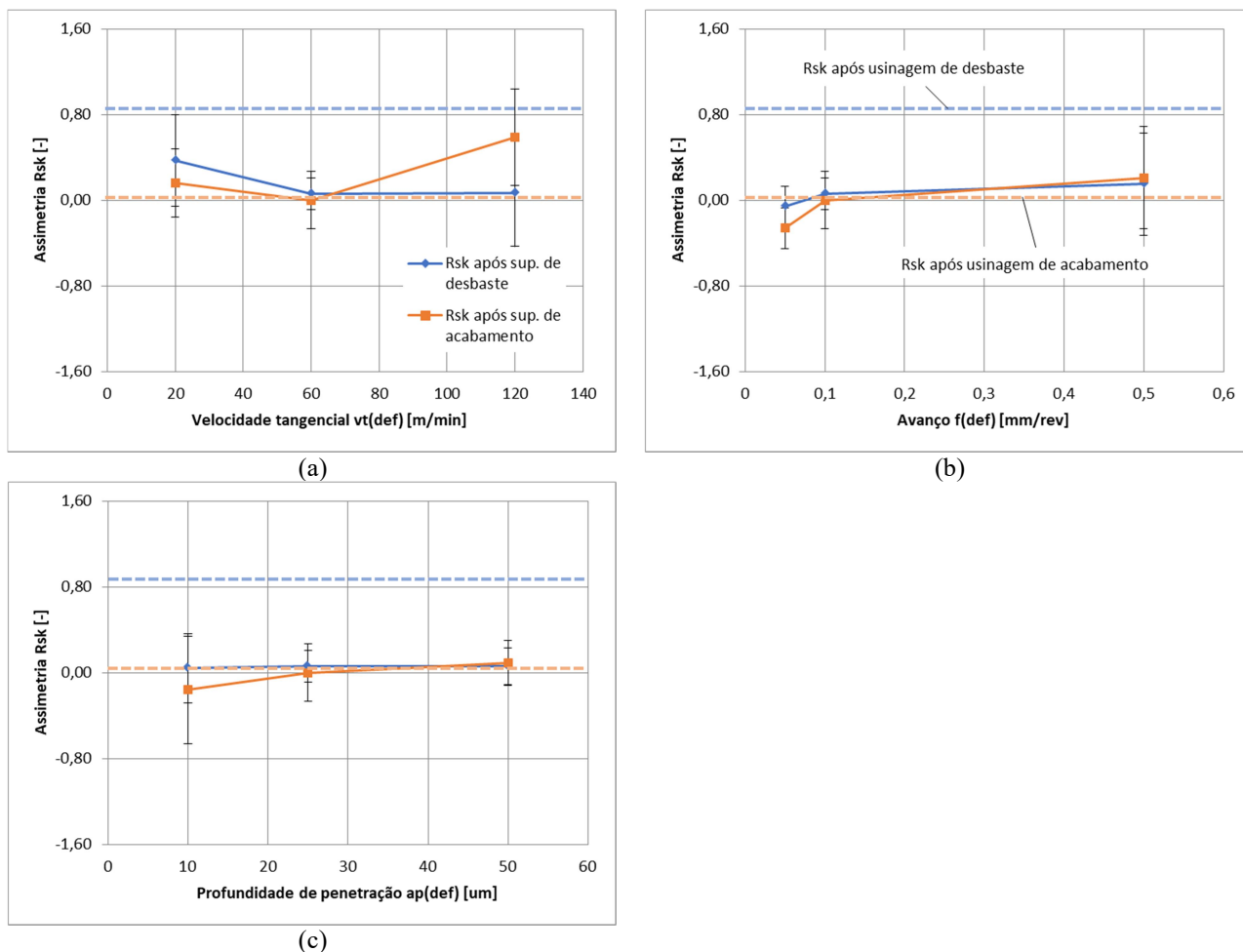
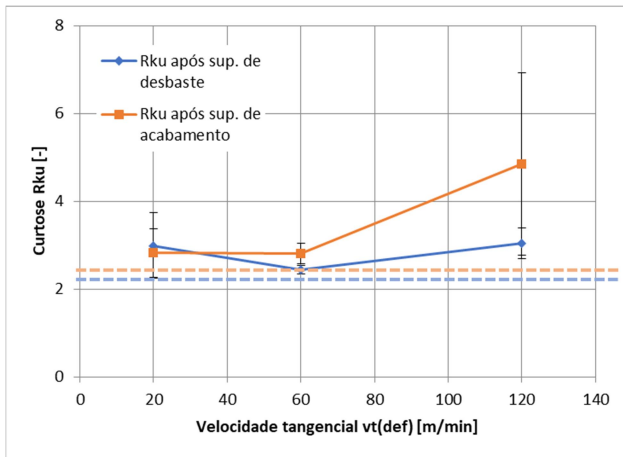
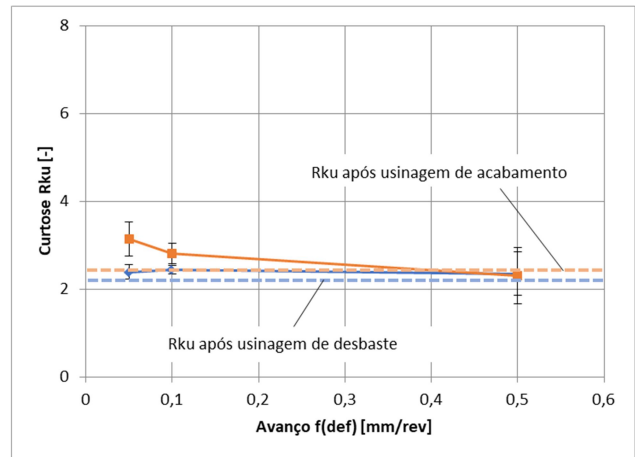


Figura 2. Assimetria do perfil de rugosidade R_{sk} em função da variação (a) da velocidade tangencial (com $f(def) = 0,1$ mm/rev e $a_p(def) = 25 \mu$ m), (b) do avanço (com $v_t(def) = 60$ m/min e $a_p(def) = 25 \mu$ m), (c) da profundidade de penetração (com $v_t(def) = 60$ m/min e $f(def) = 0,1$ mm/rev)

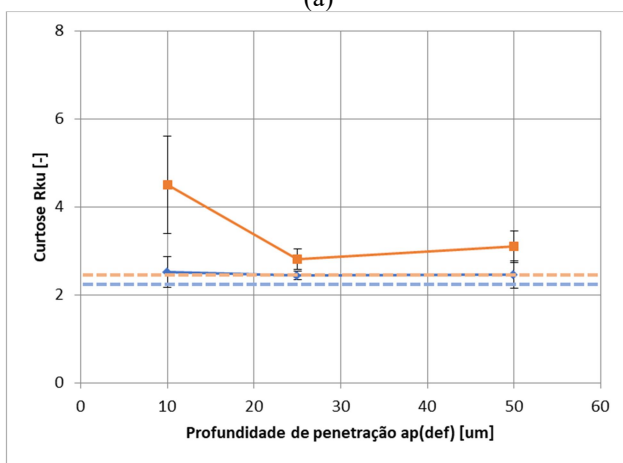
O achatamento da distribuição do perfil de rugosidade, representado pela curtose R_{ku} , é apresentado na Fig. 3. Nota-se em relação a este parâmetro que as superfícies usinadas com parâmetros de desbaste ($R_{ku} = 2,36 \pm 0,12$) e de acabamento ($R_{ku} = 2,60 \pm 0,25$) obtiveram valores similares e menores que três, indicando topos dos picos e fundos dos vales com formato arredondado. Neste caso, a primeira superfície não se alterou significativamente pelo processo de deformação plástica, enquanto a segunda apresentou valores de R_{ku} maiores que três com a maior velocidade tangencial, o menor avanço e a menor profundidade de penetração, sugerindo a formação de picos e vales mais aciculados.



(a)



(b)



(c)

Figura 3. Achatamento do perfil de rugosidade Rku em função da variação (a) da velocidade tangencial (com $f(\text{def}) = 0,1$ mm/rev e $a_p(\text{def}) = 25$ μm), (b) do avanço (com $v_t(\text{def}) = 60$ m/min e $a_p(\text{def}) = 25$ μm), (c) da profundidade de penetração (com $v_t(\text{def}) = 60$ m/min e $f(\text{def}) = 0,1$ mm/rev)

Com base nos resultados, verifica-se que, de maneira geral, a operação de acabamento por deformação plástica em peças cilíndricas traz benefícios apenas após processo de torneamento com parâmetros de desbaste. Já tendo rugosidade reduzida, superfícies torneadas com condições de acabamento são prejudicadas e a redistribuição do material pode levar à formação de picos maiores e aciculados. A Fig. 4 mostra exemplos de superfícies torneadas em desbaste e acabamento e deformadas plasticamente com diferentes valores de avanço. Uma análise visual mostra que as irregularidades e marcas de vibração ocasionadas pelo processo de torneamento são eliminadas a partir da redistribuição do material. No entanto, nota-se que o maior avanço no processo de deformação plástica utilizado para finalizar tanto a superfície obtida com parâmetros de acabamento quanto a gerada com parâmetros de desbaste acaba causando sobreposição de material ao invés de espalhamento, o que reduz os picos de rugosidade, mas danifica a superfície.

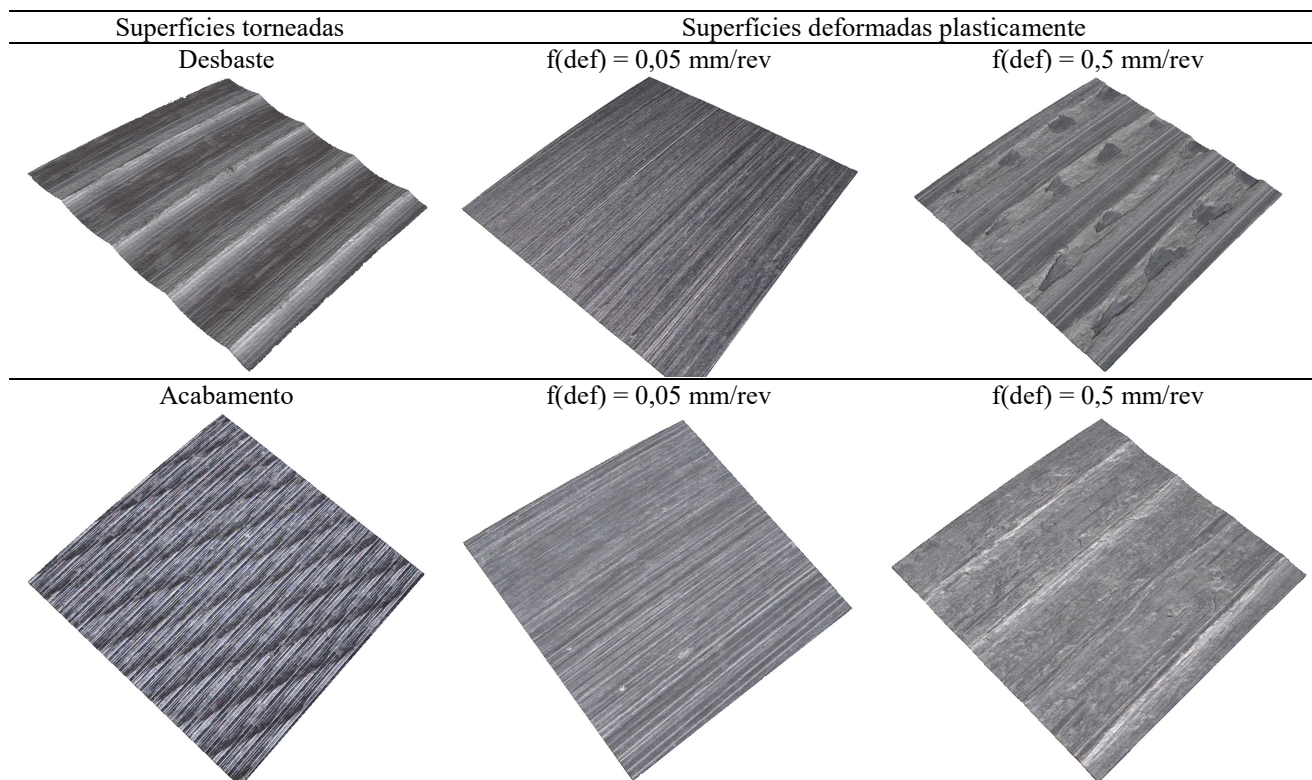


Figura 4. Imagens das superfícies obtidas após os processos de torneamento e acabamento por deformação plástica, com $vt(\text{def}) = 60 \text{ m/min}$ e $ap(\text{def}) = 25 \mu\text{m}$ (aumento de 100x)

Por fim, a Fig. 5 traz imagens de alguns dos inserts após sua aplicação tanto no torneamento quanto no acabamento dos corpos de prova por deformação plástica. Em relação ao desgaste da parte do inserto utilizada para o torneamento, verifica-se para os testes com condições de desbaste formação de cratera na superfície de saída, adesão na aresta e desgaste abrasivo pouco acentuado na superfície de folga. Com a aplicação de condições de acabamento, ou seja, menor avanço, nota-se principalmente a ocorrência de adesão do material da peça, devido à sua maior deformação, associada à menor espessura de cavaco. Já a deterioração da ferramenta devido ao processo de deformação plástica da peça ocorre em função de adesão e remoção irregular de material da ferramenta na região mais central da superfície de folga e se torna mais intensa apenas com maiores valores de velocidade tangencial. Alterações do avanço e da profundidade de penetração não causaram mudanças significativas.

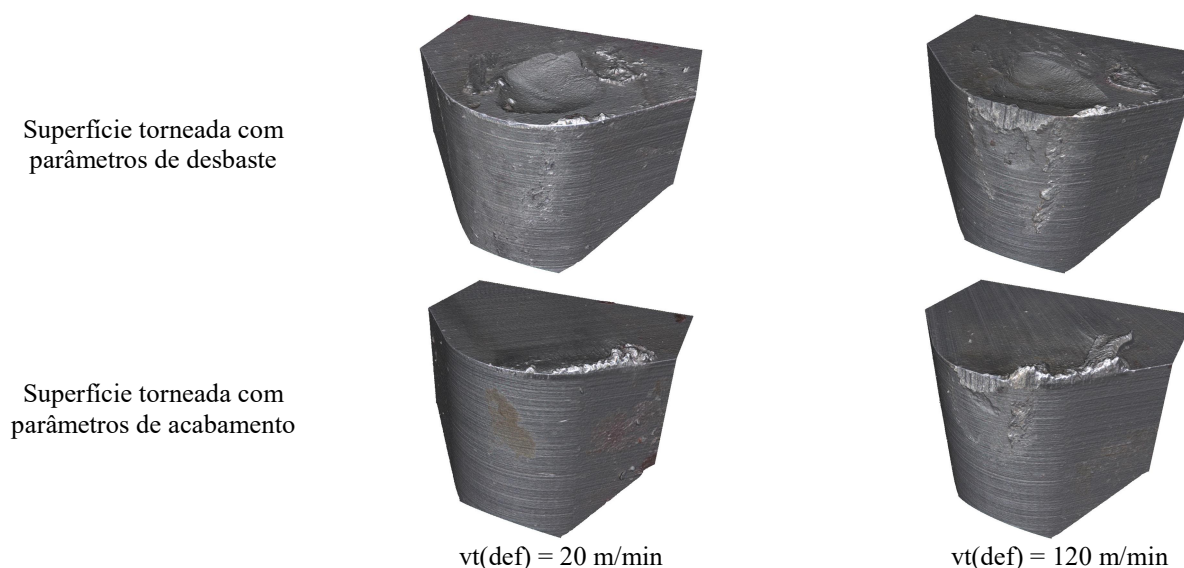


Figura 5. Imagens dos inserts de metal duro após os processos de torneamento e acabamento por deformação plástica, com $f(\text{def}) = 0,1 \text{ mm/rev}$ e $ap(\text{def}) = 25 \mu\text{m}$ (aumento de 100x)

4. CONCLUSÕES

A partir dos resultados obtidos, pode-se concluir que:

- Uma redução da rugosidade máxima Rz de aproximadamente oito vezes pode ser obtida pelo processo de acabamento por deformação plástica a partir de uma superfície previamente usinada com parâmetros de desbaste. Além disso, uma maior simetria do perfil de rugosidade também pode ser alcançada.
- A realização da operação de deformação plástica em uma superfície com rugosidade previamente baixa leva à formação de picos de rugosidade aciculados e de maior amplitude, prejudicando a superfície.
- Menores valores de avanço contribuem para redução da rugosidade máxima Rz, enquanto a velocidade tangencial e a profundidade de penetração não apresentam influência significativa.
- A partir da análise das superfícies geradas, verifica-se que as irregularidades e marcas de vibração ocasionadas pelo processo de torneamento são eliminadas a partir da redistribuição do material, mas elevados avanços no processo de deformação plástica, embora reduzam os picos de rugosidade, acabam causando sobreposição do material ao invés do seu espalhamento.
- O aumento do avanço no processo de torneamento do aço inoxidável AISI 304 com ferramenta de metal duro sem revestimento leva à formação de desgaste de cratera, enquanto a deterioração da superfície de folga devido à operação de deformação plástica ocorre apenas a maiores velocidades tangenciais, não havendo mudança relevante com alterações do avanço e da profundidade de penetração.

5. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP, Processos nº 2015/15622-2, 2017/12304-5, 2017/12309-7 e 2018/24614-1) e ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq, Bolsa PIBIC).

6. REFERÊNCIAS

- Chen, T., John, H., Xu, J., Lu, Q., Hawk, J. e Liu, X., 2013. Influence of surface modifications on pitting corrosion behavior of nickel-base alloy 718. Part 1: Effect of machine hammer peening. *Corrosion Science*, Vol. 77, p. 230-245.
- Field, M., Khales, J.F. e Koster, W.P., 1989. Surface Finish and Surface Integrity. In: *ASM. Machining*. Vol. 16. p. 43-84.
- Fricke, L.V., Gerstein, G., Breidenstein, B., Nguyen, H.N., Dittrich, M.-A., Maier, H.J. e Zaremba, D., 2021. Deformation-induced martensitic transformation in AISI304 by cryogenic machining. *Materials Letters*, Vol. 285, p. 129090.
- Gerstenmeyer, M., Ort, B.-L., Zanger, F. e Schulze, V., 2017. Influence of the cutting edge microgeometry on the surface integrity during mechanical surface modification by complementary machining. *Procedia CIRP*, Vol. 58, p. 55-60.
- Gerstenmeyer, M., Zanger, F. e Schulze, V., 2016. Complementary machining – machining strategy for surface modification. *Procedia CIRP*, Vol. 45, p. 2470250.
- Grzesik, W., Kruszynski, B. e Ruszaj, A., 2010. Surface integrity of machined surfaces. In: Davim, J.P. (Ed.) *Surface Integrity in Machining*. Springer-Verlag, Londres, p. 144-179.
- Hussain, K., Wilkinson, D.S. e Embury, J.D., 2009. Effect of surface finish on high temperature fatigue resistance of a nickel based super alloy. *International Journal of Fatigue*, Vol. 31, p. 743-750.
- Schönbauer, B. M., Yanase, K. e Endo, M., 2017. The influence of various types of small defects on the fatigue limit of precipitation-hardened 17-4PH stainless steel. *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, Vol. 87, p. 35-49.
- Schwalm, J., Gerstenmeyer, M., Zanger, F. e Schulze, V., 2020. Complementary machining: effect of tool types on tool wear and surface integrity of AISI 4140. *Procedia CIRP*, Vol. 87, p. 89-94.
- Zanger, F., Gerstenmeyer, M. e Weule, H., 2017. Identification of an optimal cutting edge microgeometry for complementary machining. *CIRP Annals – Manufacturing Technology*, Vol. 66, p. 81-84.

7. RESPONSABILIDADE PELAS INFORMAÇÕES

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

SURFACE ANALYSIS OF PARTS TURNED AND FINISHED BY PLASTIC DEFORMATION

Giselle Silva Macedo

Carlos Eiji Hirata Ventura

Department of Mechanical Engineering, Federal University of São Carlos, Rod. Washington Luis km 235, 13565-905, São Carlos/SP, Brazil

gisellemacedo@estudante.ufscar.br, ventura@ufscar.br

Abstract. *Known in the literature as complementary machining, the finishing of turned parts by plastic deformation with the same insert used for machining has as main goals the reduction of surface roughness and the alteration of subsurface characteristics. The referred process is carried out through the inversion of the rotation and feed movements, which generates relative movement between the insert clearance face and the already turned surface, without material removal. In order to investigate the effects of different parameters, such as tangential speed, feed and penetration depth, on the surface finish of the part after plastic deformation, as well as the influence of the previously machined surface, experiments of turning and finishing by plastic deformation with uncoated cemented tungsten carbide cutting inserts and under different conditions were performed on 304 stainless steel workpieces, which had their surface analyzed and their roughness parameters measured in a confocal microscope. In order to verify the tool wear after both operations, the inserts were qualitatively analyzed. From the results obtained, it was possible to reduce the maximum roughness of the part by up to eight times after turning.*

Keywords: *Turning; Complementary machining; Roughness.*

RESPONSIBILITY NOTICE

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