

08 a 11 de Outubro de 2018
Instituto Federal Fluminense
Búzios - RJ

INFLUÊNCIA DOS PARÂMETROS DE CORTE NAS TENSÕES RESIDUAIS GERADAS NA USINAGEM DE AÇO INOXIDÁVEL DUPLEX 2205

Maria Cindra Fonseca¹ – mcindra@vm.uff.br

Henrique Pereira Magalhães¹ – henriquemagalhaes@id.uff.br

Tatiane de Campos Chuvas² - chuvas@vm.uff.br

Marcel Freitas de Souza¹ – marcelfreitas@id.uff.br

¹Universidade Federal Fluminense, Departamento de Engenharia Mecânica/PGMEC - Niterói, RJ, Brasil

²CEFET-RJ - Departamento de Engenharia Mecânica, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

Resumo. *O estudo das tensões residuais é de suma importância para projetos de peças industriais. Estas tensões são geradas no material após qualquer processo de fabricação, e sua natureza (tratativa ou compressiva) e magnitude são fatores de risco ou de segurança para estes componentes, como por exemplo, na vida em fadiga e na resistência à corrosão sob tensão. O presente trabalho tem como objetivo a análise das tensões residuais geradas no processo de usinagem por torneamento de acabamento em amostras de aço inoxidável duplex 2205, com diferentes velocidades de corte. As tensões residuais foram analisadas por difração de raios-X, usando o método do $\sin^2\psi$. A caracterização da integridade superficial do material foi feita com análises de microdureza Vickers, rugosidade média (R_a) e macrografia da superfície. Os resultados mostraram que o torneamento gerou tensões residuais tratativas em ambas as direções analisadas, sendo a influência da velocidade de corte mais significativa na direção transversal. Além disso, o aumento da velocidade de corte não teve efeito sobre a microdureza Vickers, contudo, a alteração deste parâmetro de corte mostrou-se ser estatisticamente significativo para a rugosidade média, principalmente devido ao pior acabamento superficial obtido ao ser utilizada a menor velocidade de corte.*

Palavras-chave: *Aço inoxidável duplex 2205, torneamento, tensões residuais, difração de raios-X, integridade superficial.*

1. INTRODUÇÃO

Os aços inoxidáveis duplex apresentam uma estrutura bifásica composta de 50% de ferrita e 50% de austenita, resultando em uma boa combinação de propriedades mecânicas (alta resistência mecânica e tenacidade) e resistência à corrosão (Krolczyk, 2017; Rajaguru e

Arunachalam, 2017). Suas propriedades propiciam sua utilização nos mais diversos segmentos produtivos, como na indústria naval, *offshore* e de alimentos. Dessa forma, cada vez mais busca-se melhorar a confiabilidade e qualidade dos diversos componentes utilizados nestas indústrias e, portanto, o estudo das propriedades geradas na fabricação de componentes de aço inoxidáveis duplex é de grande relevância (IMOA, 2014; Koyee *et al.*, 2014).

Em vista do atual foco no desenvolvimento sustentável e na segurança da sociedade, o estudo dos materiais recebe grande importância com o objetivo de evitar desperdícios ao promover maior vida útil aos componentes industriais. Além disso, a evolução das normas de utilização, projeto, fabricação e segurança destes componentes são essenciais na geração de valor para todas as camadas da sociedade que utilizam os serviços da indústria (Stoycheva *et al.*, 2018; Rossi, 2014).

Assim como as propriedades de tenacidade, de resistência mecânica e de resistência à corrosão, as tensões residuais têm grande influência no desempenho e na vida útil de um componente, visto que se somam aos carregamentos aos quais uma peça em serviço é submetida. Estas tensões estão presentes em qualquer material após os processos de fabricação, e para um componente podem ser um fator de risco em especial na vida em fadiga, pois tensões residuais trativas tendem a acelerar a nucleação de trincas, enquanto as tensões residuais compressivas diminuem esta propagação, aumentando a vida útil de uma peça (Weiya *et al.*, 2018).

A correta compreensão das tensões residuais geradas no torneamento é de grande importância, pois este processo de fabricação de usinagem pode ser realizado como uma operação de acabamento, sendo neste caso a última etapa da cadeia de produção de um componente. O uso de diferentes parâmetros de corte gera diferentes estados de tensões residuais, sendo o estudo do processo e suas variáveis o objetivo de diversos trabalhos científicos (Navas *et al.*, 2012).

Neste contexto, o presente trabalho tem como objetivo estudar o comportamento das tensões residuais geradas no processo de usinagem por torneamento de acabamento em amostras de aço inoxidável duplex 2205 com diferentes velocidades de corte e sem a utilização de fluidos de corte, assim como analisar a influência deste parâmetro de corte na microdureza Vickers e na rugosidade média.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

No presente trabalho foi estudado o aço duplex 2205, em barras cilíndricas, com diâmetro inicial de 20,3 mm. Um desenho esquemático da amostra é apresentado na Fig. 1 (a), onde é possível observar as diferentes amostras, de 20 mm de comprimento cada. As marcações das posições utilizadas nas medições em relação ao ângulo da circunferência são apresentadas na Fig. 1 (b).



Figura 1 – (a) Desenho esquemático do aço duplex 2205 das peças utilizadas, (b) Posição das medições na circunferência das peças.

A usinagem por torneamento foi realizada em um torno universal da marca Nardini, modelo Mascote 350 conforme os seguintes parâmetros: profundidade de corte de 0,3 mm, avanço de 0,094 mm/rev, usinagem a seco. Estas condições de corte são utilizadas em operações de acabamento.

A Tabela 1 apresenta as rotações e as velocidades de corte utilizadas no experimento, sendo avaliadas duas amostras para cada condição de usinagem.

Tabela 1 – Rotações e velocidades de corte utilizadas.

Amostra	n (rpm)	Vc (m/min)
1-2	500	32
3-4	1000	64
5-6	1250	80
7-8	2500	159

A ferramenta de corte utilizada foi inserto de metal duro VBMT 16 04 08-PM 4325, com revestimento de nitreto de titânio (CVD Ti(C,N)+Al₂O₃+TiN) da Sandvik, sendo que para cada condição de corte foi utilizado apenas um gume para garantir a uniformidade das arestas de corte e assim diminuir a influência do desgaste dos insertos nos resultados finais.

As tensões residuais foram analisadas por difração de raios-X na fase ferrítica do material com o analisador de tensões Xstress3000, da marca Stresstech, utilizando o método do $\sin^2\psi$. Foram realizadas duas medições por amostra, sendo uma na posição de 0° e outra na de 180°, ao longo da circunferência das peças. As medições foram realizadas no material como usinado, em cada ponto nas direções longitudinal e transversal ao eixo da amostra, sendo a direção longitudinal aquela coincidente com a direção do avanço.

A rugosidade média (Ra) foi avaliada usando um rugosímetro Surtronic 25, da marca Taylor Hobson Precision. Foram realizadas seis medidas por amostra, sendo que três foram na posição de 0° e três na de 180°, ao longo da circunferência das peças. Para todas as medições foi utilizado um comprimento de amostragem (*cutoff*) de 2,5 mm e uma distância total de 12,5 mm.

Os ensaios de microdureza Vickers foram realizados utilizando um microdurômetro HVS-1000 com carga de 9,8 kgf por quinze segundos. Foram realizadas 6 medições por amostra, nas posições de 90° e 270° ao longo da circunferência das peças, para evitar que qualquer possível nova medição de tensões residuais ou rugosidade fosse afetada pelas marcas de indentação dos penetradores.

A fim de avaliar a qualidade de superfície gerada no torneamento foi realizada a análise macrográfica das amostras torneadas. As imagens foram capturadas com aumentos de 4X, 10X, 20X e 40X. Não foram realizados quaisquer ataques ou lixamentos na superfície, sendo o objetivo apenas avaliar a rugosidade média (Ra) da usinagem.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Figura 2 apresenta os valores médios das tensões residuais nas direções longitudinal e transversal.

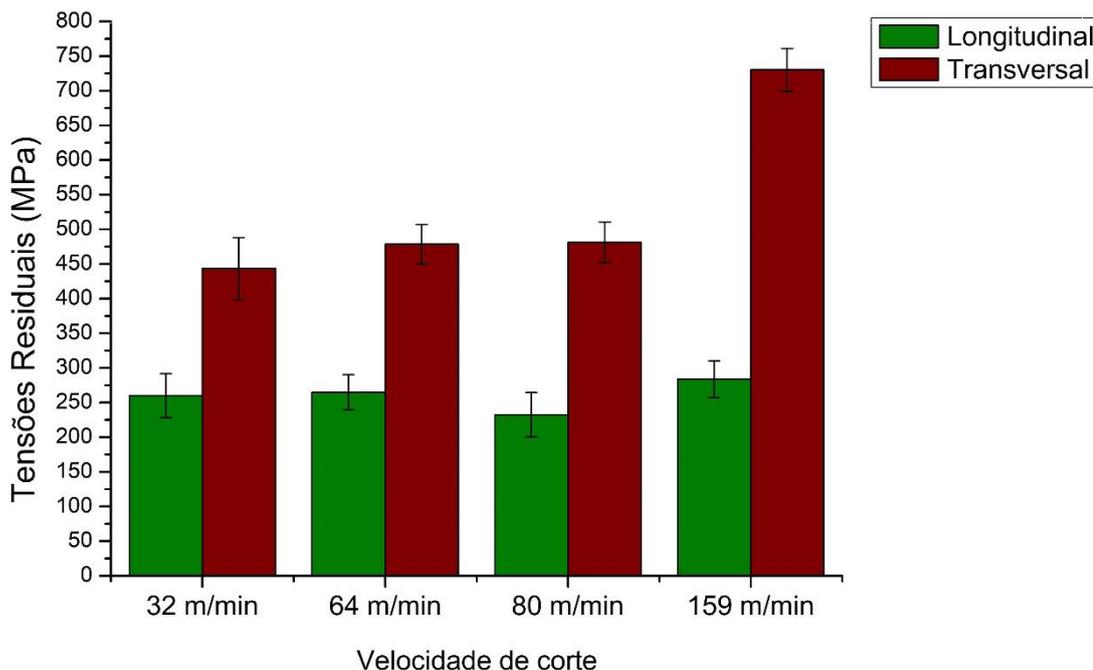


Figura 2 – Tensões residuais médias no torneamento do aço duplex 2205.

É possível constatar que em todas as velocidades de corte as tensões residuais são trativas, e tal resultado está de acordo com Navas *et al.* (2012), sendo o principal causador destas tensões o calor gerado no processo e a posterior contração do material usinado.

Além disso, pode-se verificar a diferença da magnitude das tensões quanto à direção, uma vez que, independentemente da velocidade de corte utilizada no torneamento do aço duplex 2205, as tensões residuais na direção transversal foram consideravelmente superiores em relação à direção longitudinal. Isso ocorre, provavelmente, em razão do baixo avanço no torneamento, o que faz com que as forças de corte e o aquecimento sejam de maiores magnitudes na direção transversal e consequentemente gere maiores valores de tensões trativas, os mesmos resultados são obtidos no trabalho de Navas *et al.* (2012).

As tensões residuais longitudinais são muito similares, logo, não sendo possível constatar a influência do aumento da velocidade de corte nas tensões residuais nesta direção. Contudo, na direção transversal ocorre um aumento da magnitude das tensões residuais com o aumento da velocidade de corte, sobretudo ao se utilizar a velocidade de corte de 159 m/min, ocorrendo um aumento de aproximadamente 300 MPa em relação às demais amostras.

Para verificar a significância da velocidade de corte em relação às tensões residuais foi utilizado o teste de análise de variâncias simples, *one-way* ANOVA (Gang *et al.*, 2007; Harisha *et al.*, 2018). Diante dos resultados apresentados na Tabela 2 é possível perceber que a velocidade de corte apresenta um efeito significativo na tensão residual transversal, pois o valor-p é inferior a 0,05, contudo, na direção longitudinal, embora a velocidade de corte seja a única variável alterada no processo de torneamento, não se constata o mesmo nível de significância, pois conforme IMO (2014) a usinagem dos aços inoxidáveis duplex envolve diversas variáveis que não podem ser controladas durante a execução do experimento.

Tabela 2 – Análise de significância da velocidade de corte nas tensões residuais.

Tensão Residual	Valor-p
Longitudinal	0,271748
Transversal	0,000008

A Figura 3 apresenta os resultados médios de microdureza Vickers de acordo com a velocidade de corte.

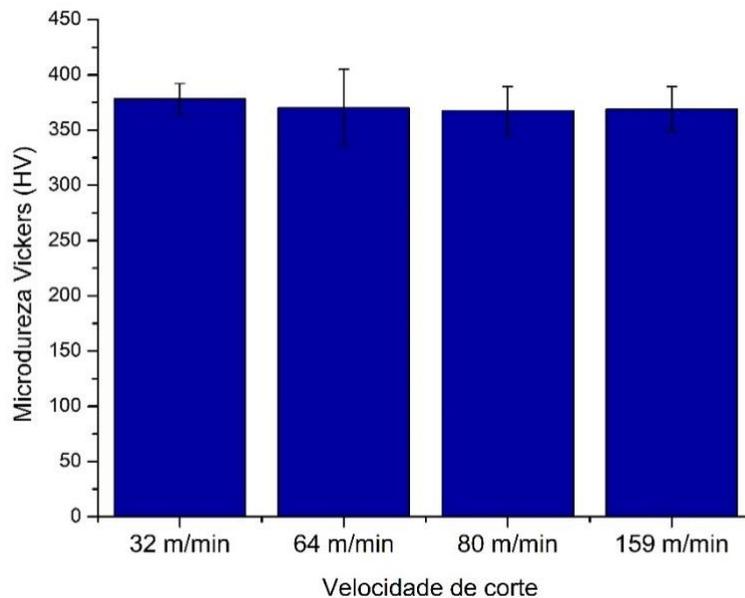


Figura 3 – Valor médio de microdureza Vickers no torneamento do aço duplex 2205.

A microdureza Vickers não sofre alteração significativa em relação à alteração da velocidade de corte, pois o valor médio global é da ordem de 370 MPa com um desvio padrão de 5 MPa, e consequentemente o coeficiente de variação (razão do desvio-padrão pela média) é de cerca de 1%, indicando uma baixa dispersão entre os valores (Lamy *et al.*, 2013). O teste *one-way* ANOVA indicou um valor-p de 0,885274 para o efeito da velocidade de corte na microdureza Vickers, por conseguinte, a alteração da variável de entrada não apresenta um efeito significativo para essa propriedade mecânica.

A Figura 4 apresenta o valor médio para a rugosidade Ra de acordo com a velocidade de corte.

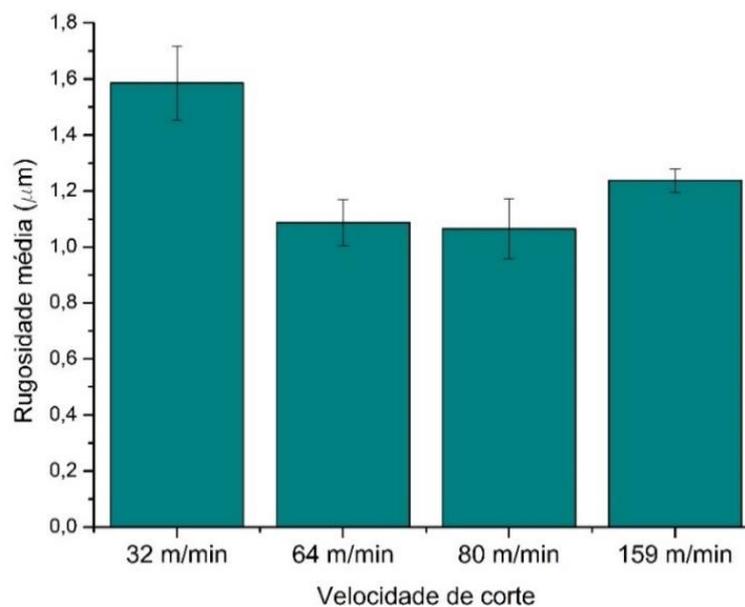


Figura 4 – Valor médio de rugosidade Ra no torneamento do aço duplex 2205.

A velocidade de corte de 32 m/min forneceu o maior valor de rugosidade média, aproximadamente 0,5 μm acima da rugosidade das demais amostras. As velocidades de corte de 64 m/min e 80 m/min forneceram um valor de rugosidade média de cerca de 1 μm , não sendo, pois, possível constatar alteração deste resultado quanto à velocidade de corte.

As amostras usinadas com maior velocidade de corte (159 m/min) obtiveram um valor de rugosidade média de aproximadamente 15 % maior em relação à rugosidade das amostras usinadas a 64 m/min e 80 m/min. Embora maiores velocidades de corte gerem menores valores de rugosidade e consequentemente melhores acabamentos superficiais, a velocidade de corte 159 m/min provoca o surgimento de aresta postiça de corte na usinagem de aço inoxidável duplex.

Dhananchezian *et al.* (2018) ao avaliarem o torneamento de aço inoxidável duplex 2205 com inserto de metal duro com revestimento de nitreto alumínio titânio utilizando usinagem a seco com diferentes de velocidades de corte (72, 119 e 197 m/min), avanço de 0,111 mm/rev e profundidade de corte de 1 mm obtiveram uma rugosidade média de 1,441 μm para velocidade de corte de 72 m/min, e com o aumento da velocidade de corte ocorreu a diminuição da rugosidade média. Logo, a rugosidade média obtida no presente estudo é coerente com a obtida por Dhananchezian *et al.* (2018), embora não tenha sido possível observar o decréscimo da rugosidade média com o aumento da velocidade de corte no presente trabalho.

O teste *one-way* ANOVA indicou um valor-p tendendo a zero, ou seja, a velocidade de corte representa um efeito significativo no acabamento superficial das amostras. Segundo He *et al.* (2018) o avanço possui uma maior influência na rugosidade superficial do que a velocidade e a profundidade de corte, assim sendo, seria esperado que caso houvesse a variação do avanço e da velocidade de corte no presente trabalho, o valor-p do avanço fosse mais significativo do que o da velocidade de corte.

A rugosidade média teórica pode ser calculada utilizando a fórmula proposta por He *et al.* (2018) descrita na Eq. 1.

$$R_a = \frac{f^2}{18\sqrt{3}r_\epsilon} \approx 0,0321 \frac{f^2}{r_\epsilon} \quad (1)$$

Sendo f o avanço da ferramenta em mm/rot e r_ϵ raio da ponta da ferramenta em mm. Logo, utilizando os parâmetros de corte e as informações relativas a ferramenta de corte informadas pelo fabricante é possível obter uma rugosidade média teórica de 0,35 μm , sendo esse valor consideravelmente inferior ao obtido no presente experimento. É importante constatar que a fórmula clássica para obtenção da rugosidade média teórica independe da velocidade de corte empregada no torneamento, bem como do material da ferramenta de corte e da amostra. As propriedades dinâmicas da máquina-ferramenta, particularmente a vibração entre a ferramenta de corte e a amostra, constituem um papel crítico na formação da rugosidade superficial, sendo, pois, uma das explicações para a diferença entre os valores teórico e real da rugosidade média.

Como as amostras foram torneadas com apenas um gume de corte para cada condição de velocidade de corte, é possível identificar, por microscopia óptica, a diferença de qualidade de superfície devido aos parâmetros de corte na usinagem em todas as amostras. As amostras usinadas com velocidade de corte de 32 m/min apresentaram os piores resultados de rugosidade, com a presença de microtrincas, conforme Fig. 5.

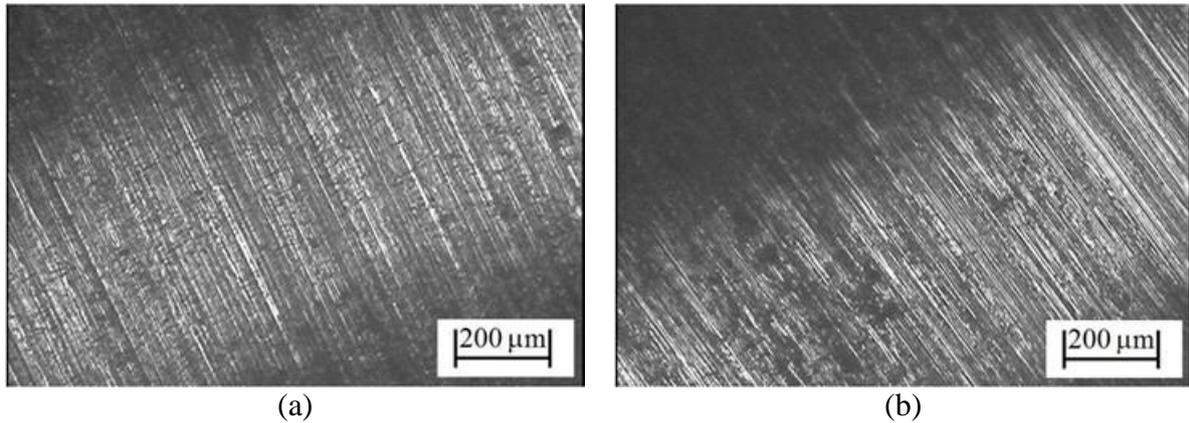


Figura 5 – Amostras torneadas com velocidade de corte de 32 m/min.

A Figura 6 apresenta a qualidade das amostras torneadas com velocidade de corte 64 m/min, sendo possível constatar que o aumento da velocidade de corte propiciou melhor acabamento superficial.

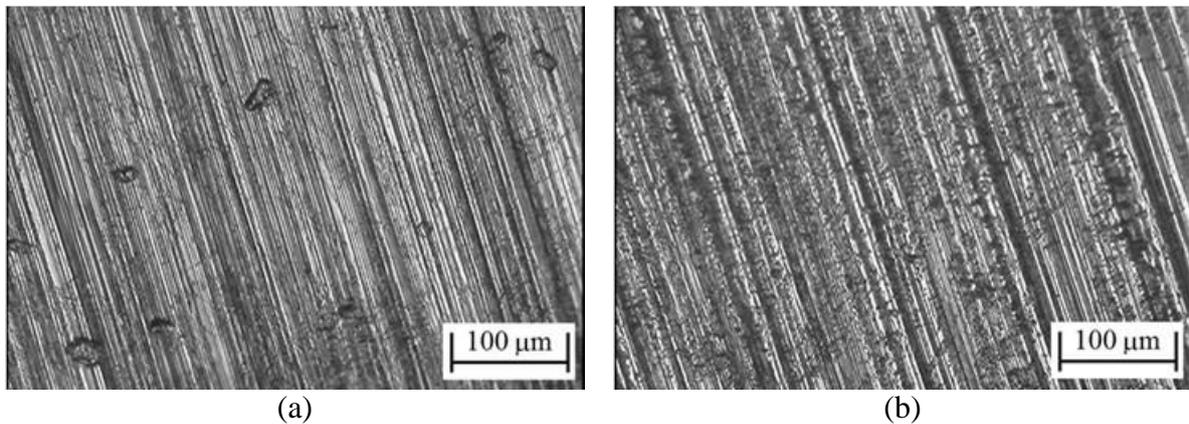


Figura 6 – Amostras torneadas com velocidade de corte de 64 m/min.

As amostras usinadas com velocidade de corte de 80 m/min apresentaram melhor rugosidade, e tal resultado pode ser observado na Fig. 7, onde há menor presença de riscos oriundos do processo de usinagem.

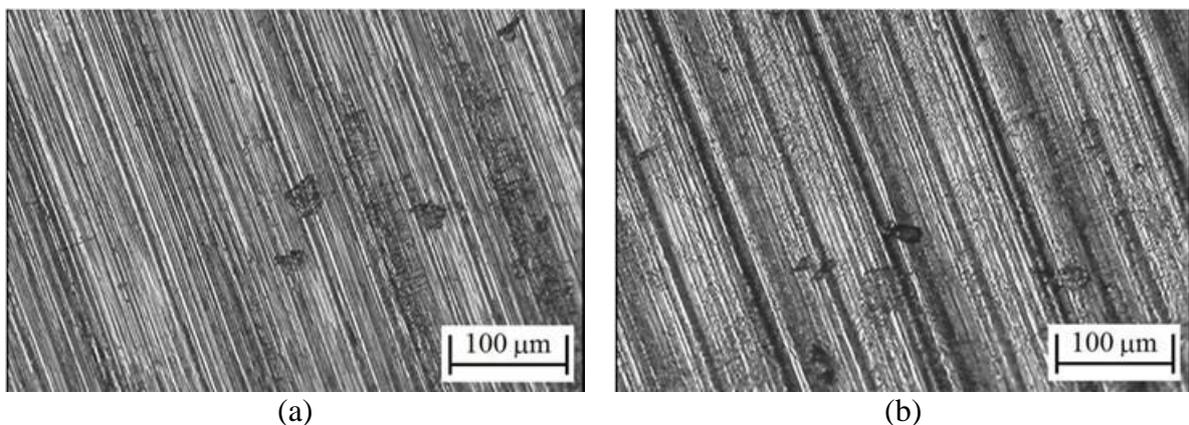


Figura 7 – Amostras torneadas com velocidade de corte de 80 m/min.

A Figura 8 apresenta as superfícies das amostras torneadas com velocidade de corte de 159 m/min. Embora tenham sido utilizadas as maiores velocidades de corte do presente trabalho, seus resultados de rugosidade foram maiores do que demais as amostras, indicando, possivelmente, problemas devido à formação de arestas postiças nos gumes de corte.

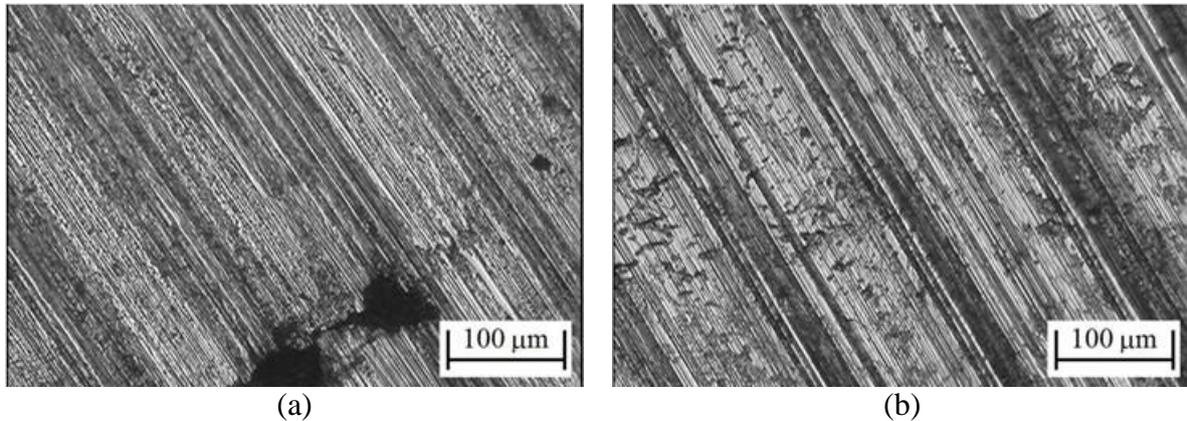


Figura 8 – Amostras torneadas com velocidade de corte de 159 m/min.

A estrutura bifásica dos aços inoxidáveis duplex contribui na geração de vibração durante a usinagem do material, aumentando ainda mais os problemas para a obtenção de bons acabamentos superficiais e reduzindo a vida da ferramenta (IMOA, 2014). Cada fase apresenta propriedades distintas, contribuindo, assim, de maneira diferente para a formação do cavaco, e segundo Jay Airao *et al.* (2018) a fase austenítica é mais sensível a deformação do que a fase ferrítica, e consequentemente, o comportamento do estado de tensões residuais em um material bifásico é de maior dificuldade, uma vez que é necessária a avaliação em ambas as fases, embora seja possível constatar a influência dos parâmetros de corte em uma única fase. Como verificado no presente trabalho, o aço inoxidável duplex 2205 apresenta uma usinabilidade baixa, em razão das altas tensões de escoamento e resistência à tração, baixa condutividade térmica e tendência a formação aresta postiça de corte, representando, portanto, um importante desafio para a indústria de fabricação (Jay Airao *et al.*, 2018; Rajaguru e Arunachalam, 2017).

4. CONCLUSÕES

O presente trabalho, que teve como objetivo o estudo do comportamento das tensões residuais e da qualidade da superfície no torneamento de amostras de aço duplex 2205, com diferentes velocidades de corte, permite as seguintes conclusões:

1. O torneamento gerou tensões residuais trativas em todas as amostras, que não foram influenciadas pelo aumento da velocidade de corte na direção longitudinal, enquanto que na direção transversal com o emprego de maior velocidade de corte (159 m/min) ocorreu um aumento de magnitude das tensões residuais.
2. A velocidade de corte não alterou significativamente a microdureza, conforme pode ser corroborado pela utilização do teste *one-way* ANOVA que indicou um valor-p de 0,885274.
3. A rugosidade média obtida no experimento é consideravelmente superior à obtida por meio da formulação clássica teórica, sendo que uma das razões para essa diferença a ausência do efeito dos demais parâmetros de corte, do material usinado e das demais propriedades geométricas na equação clássica.

4. A velocidade de corte teve um efeito significativo na rugosidade média, conforme indicado pelo valor-p tendendo a zero. Entretanto, essa significância pode ser explicada pela maior rugosidade média na amostra torneada com velocidade de corte de 32 m/min.

Agradecimentos

Os autores agradecem ao CNPq, à CAPES e à FAPERJ pelo suporte financeiro, que permitiu a realização do presente trabalho.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Dhananchezian, M.; Rishaba priyan, M.; Rajashekar, G.; Sathya Narayanan, S. (2018), Study The Effect Of Cryogenic Cooling On Machinability Characteristics During Turning Duplex Stainless Steel 2205. *Materials Today: Proceedings*, 5, 12062-12070.
- Gang, W.; Lei, N.; Freeland, S.J. (2007), The effects of differential gene expression on coding sequence features: Analysis by one-way ANOVA. *Biochemical and Biophysical Research Communications*, 358, 1108-1113.
- Harisha, S.K.; Rajkumar, G.R.; Vikas Pawar, Keshav, M. (2018), Statistical Investigation of Tool Geometry for Minimization of Cutting Force in Turning of Hardened Steel. *Materials Today: Proceedings*, 5, 11277-11282.
- He, C.L.; Zong, W.J.; Zhang, J.J. (2018), Influencing factors and theoretical modeling methods of surface roughness in turning process: State-of-the-art. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 129, 15-26.
- IMOA (2014), “*Practical Guidelines for the Fabrication of Duplex Stainless Steels*”, 3º ed., International Molybdenum Association, Londres.
- Jay Airao; Bhavesh Chaudhary; Vivek Bajpai; Navneet Khanna (2018), An Experimental Study of Surface Roughness Variation in End Milling of Super Duplex 2507 Stainless Steel. *Materials Today: Proceedings*, 5, 3682-3689.
- Lamy, J.B.; Delzon, S.; Bouche, P.S.; Alia, R.; Vendramin, G.G.; Cochard, H.; Plomion, C. (2013). Limited genetic variability and phenotypic plasticity detected for cavitation resistance in a Mediterranean pine. *New Phytologist*, 201, 974-886.
- Koyee, R.D.; Eisseler, R.; Schauder, S. (2014), Application of Taguchi coupled Fuzzy Multi Attribute Decision Making (FMADM) for optimizing surface quality in turning austenitic and duplex stainless steels. *Measurement*, 58, 375-386.
- Krolczyk, G.M.; Nieslony, P.; Maruda, R.W.; Wojciechowski, S. (2017), Dry cutting effect in turning of a duplex stainless steel as a key factor in clean production. *Journal of Cleaner Production*, 142, 3343-3344.
- Navas, V.G.; Gonzalo, O.; Bengoetxea, I. (2012), Effect of cutting parameters in the surface residual stresses generated by turning in AISI 4340 steel. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 61, 48-67.
- Rajaguru, J.; Arunachalam, N. (2017), Coated tool Performance in Dry Turning of Super Duplex Stainless Steel. *Procedia Manufacturing*, 10, 601-611.
- Rossi, B. (2014), Discussion on the use of stainless steel in constructions in view of sustainability. *Thin-Walled Structures*, 83, 182-189.
- Stoycheva, S.; Marchese, D.; Paul, C.; Padoan, S.; Juhmani, A.; Linkov, I. (2018), Multi-criteria decision analysis framework for sustainable manufacturing in automotive industry. *Journal of Cleaner Production*, 187, 257-272.
- Weiya, Z.; Wenchun, J.; Xu, Z.; Shan-Tuang, T. (2018), Fatigue life of a dissimilar welded joint considering the weld residual stress: Experimental and finite element simulation. *International Journal of Fatigue*, 109, 182-190.

INFLUENCE OF CUTTING PARAMETERS IN THE RESIDUAL STRESSES GENERATED IN THE 2205 DUPLEX STAINLESS STEEL MACHINING

Abstract. *The residual stress study is of considerable importance for industrial designs. These stresses are generated in the material after any manufacturing process, and their nature (tensile or compressive) and magnitude are risk or safety factors for these components, as for example in the fatigue life and stress corrosion cracking resistance. The present work has the objective of analyzing the residual stress generated in the machining process by finishing turning in 2205 duplex stainless steel samples, with different cutting speeds. The residual stresses were analyzed by X-ray diffraction using the $\sin^2\psi$ method. The material surface integrity characterization was done with Vickers microhardness, average roughness (Ra) and surface macrography. The results showed that the turning generated tensile residual stresses in both directions analyzed, being the change of the cutting speed more significant in the transverse direction. Moreover, it was not possible to verify a change in the Vickers microhardness with the increase of the cutting speed, however, the change of this cutting parameter was statistically significant for the average roughness, mainly due to the worse surface finish obtained when using the smaller cutting speed.*

Keywords: *2205 duplex stainless steel, turning, residual stresses, X-ray diffraction, surface integrity.*