



## COMPORTAMENTO DAS TENSÕES RESIDUAIS GERADAS NO TORNEAMENTO DE AÇO SUPERDUPLEX

Katarine Tavares<sup>1</sup>, Túlio Quintas<sup>1</sup>, Pedro Calas Pacheco<sup>2</sup> e Maria Cindra Fonseca<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>Departamento de Engenharia Mecânica/PGMEC/ UFF – Universidade Federal Fluminense (UFF),  
Rua Passo da Pátria, 156, Bloco D, S/302, CEP 24210-240, São Domingos, Niterói – RJ

<sup>2</sup>Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca – PPEMM – CEFET/RJ, Av.  
Maracanã, 229, CEP 20.271-110, Rio de Janeiro – RJ

[mariacindra@id.uff.br](mailto:mariacindra@id.uff.br)

### RESUMO

*Os aços inoxidáveis são largamente usados na fabricação de peças para a indústria de óleo e gás e petroquímica por apresentar excelente resistência mecânica, excelente resistência à corrosão e ductilidade. Entre os aços inoxidáveis, os aços superduplex se destacam por apresentar elevadas propriedades mecânicas e de resistência à corrosão quando comparados com os aços austeníticos, o que se deve ao balanço das fases em sua microestrutura, que contém quantidades iguais de ferrita e austenita. Entretanto, a usinagem desses aços é considerada difícil devido à taxa de encruamento, alta resistência e baixa condutividade térmica. Assim sendo, devido à sua baixa usinabilidade, esses aços tendem a gerar tensões residuais trativas que são deletérias ao material, visto que podem colaborar para nucleação e propagação de trincas de fadiga. Além disso, a microestrutura bifásica desses aços contribui na indução de vibrações durante a usinagem, dificultando a obtenção de um bom acabamento. Dessa forma, o presente trabalho tem como objetivo o estudo das tensões residuais geradas no torneamento de aço inoxidável superduplex usando dois tipos de geometrias de inserto de metal duro: convencional e wiper (alisadora). As tensões residuais foram analisadas por difração de raios-X, empregando o método do  $\sin^2\psi$  na ferrita. Os resultados mostraram que as tensões residuais são trativas após o torneamento de desbaste com o emprego de inserto convencional e a rugosidade média foi elevada. Após o passe de acabamento, as amostras usinadas com inserto de geometria wiper apresentaram melhor acabamento superficial e as tensões residuais mudaram de natureza de trativa para compressiva. Entretanto, utilizando o inserto convencional, esse comportamento não foi observado, e as tensões residuais se mantiveram trativas, apesar de sofrerem relaxação.*

**Palavras-chave:** *tensões residuais, aço superduplex, usinagem, difração de raios-X.*

### INTRODUÇÃO

Os aços inoxidáveis são largamente usados na fabricação de peças para a indústria de óleo e gás e petroquímica por apresentar boa resistência mecânica, excelente resistência à corrosão e ductilidade. Entre os aços inoxidáveis, os aços superduplex se destacam por apresentar elevadas

propriedades mecânicas e de resistência à corrosão quando comparados com os aços austeníticos, o que se deve ao balanço das fases em sua microestrutura, que contém quantidades iguais de ferrita e austenita<sup>(1)</sup>.

Entretanto, a usinagem desses aços é considerada difícil devido ao encruamento por deformação, alta resistência, baixa condutividade térmica e formação de rebarbas. Por isso, elevadas forças de corte e rugosidade superficial são geralmente observadas na usinagem de componentes e a geração de elevadas temperaturas aceleram o desgaste da ferramenta e prejudicam seu desempenho<sup>(2)</sup>.

Assim sendo, devido à sua baixa usinabilidade, a usinagem desses aços tende a gerar tensões residuais trativas que são deletérias à peça, visto que podem colaborar para nucleação e propagação de trincas de fadiga e a falhar por corrosão sob tensão. Além disso, a microestrutura bifásica característica dos aços inoxidáveis superduplex contribui na indução de vibrações durante a usinagem, dificultando a obtenção de um bom acabamento superficial e consequente aumento da rugosidade. Essas irregularidades superficiais têm um efeito significativo na funcionalidade da superfície torneada, bem como na resistência ao desgaste podendo impactar diretamente no desempenho do componente e ocasionar uma falha prematura. O uso de inserts alisadores (*wiper*) contribui na obtenção de rugosidades menores e tensões residuais menos trativas<sup>(3,4,5)</sup>.

Assim sendo, o presente trabalho tem como objetivo o estudo das tensões residuais geradas no torneamento de aço inoxidável superduplex usando dois tipos de geometrias de inserto de metal duro: convencional e *wiper* (alisadora).

## MATERIAIS E MÉTODOS

No presente trabalho foram usadas amostras de aço superduplex UNS S32750, fornecido na forma de barra cilíndrica de 25 mm de diâmetro e 300 mm de comprimento, cuja composição química e propriedades mecânicas estão presentes nas Tabelas 1.

Tabela 1: Composição química do aço superduplex UNS S32750 (% em peso)<sup>(6)</sup>.

C	Cr	Ni	Mo	N	Mn	Cu	P	S	Si
0,013	24,79	6,95	3,83	0,28	0,75	0,15	0,019	0,0006	0,29

Os experimentos foram realizados conforme a sequência apresentada no fluxograma da Figura 1.

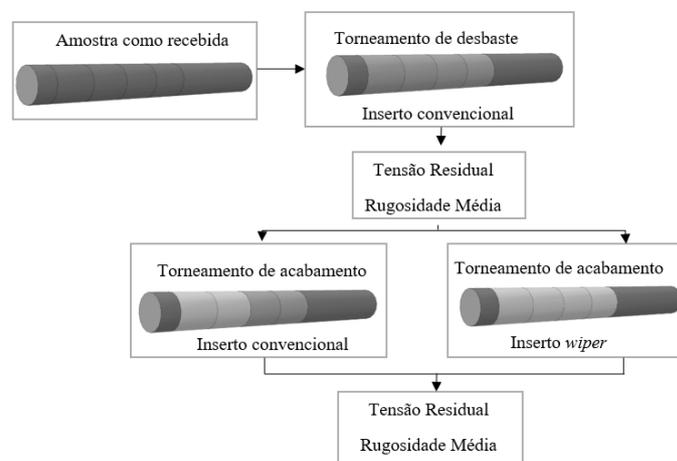


Figura 1: Fluxograma dos experimentos.

Uma barra cilíndrica foi dividida em 4 amostras de 40 mm de comprimento. As amostras foram torneadas para desbaste utilizando fluido de corte em jorro e inserto convencional. Em seguida, as amostras 1 e 2 foram torneadas em passe de acabamento com inserto convencional e as amostras 3 e 4 com inserto *wiper*. Após essas operações, as tensões residuais geradas tanto no desbaste quanto no acabamento foram medidas, assim como a rugosidade média. A definição dos parâmetros de corte, apresentados na Tabela 3, levou em consideração o torno e o diâmetro da amostra. As ferramentas de corte utilizadas foram os inserts de metal duro convencional e alisador (*wiper*), modelos TNMG160404-MA e TNMX160404-SW, respectivamente, ambos revestidos de MC6015 (TiCN-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-Ti) com raio de ponta de 0,4 mm, montados em um suporte modelo MTJNR 2020K 16M1, da marca Sandvik, com ângulo de saída negativo ( $\gamma$ ) de  $-6^\circ$ .

Tabela 3: Condição do torneamento de desbaste (D) e acabamento (A) das amostras.

Amostra	Geometria da ferramenta de corte	$V_c$ (m/min)	$a_p$ (mm)	$f$ (mm/rev)
1D	Convencional	80	1,0	0,3
2D				
3D				
4D				
1A	Convencional	220	0,3	0,1
2A				
3A	<i>Wiper</i>			
4A				

As tensões residuais longitudinais e transversais foram medidas, na fase ferrítica do material, após cada etapa de torneamento no Laboratório de Análises de Tensões (LAT/UFF), utilizando o analisador de tensões Xstress3000 apresentado na Figura 2. O equipamento utiliza a técnica de difração de raios-X pelo método do  $\text{sen}^2\psi$ , com radiação  $\text{CrK}\alpha$ , difratando o plano (211) da ferrita.

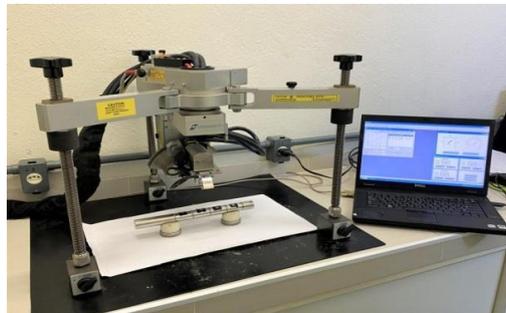


Figura 2: Analisador de tensões Xstress3000, com as amostras analisadas.

A rugosidade média ( $R_a$ ) das amostras foi medida usando um rugosímetro da marca *Taylor Hobson* Brasil, disponibilizado pelo Laboratório de Metrologia Dimensional e Computacional (LMDC/UFF). Foi utilizado um comprimento de medição ( $L_m$ ) de 4,0 mm e um comprimento de amostragem *cut-off* ( $L_e$ ) de 0,80 mm, com alcance de 300  $\mu\text{m}$  e precisão de 2%.

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados das tensões residuais superficiais analisadas na fase ferrítica das amostras torneadas com inserto convencional e *wiper*, estão indicados na Tabela 4 e Figura 3.

Tabela 4: Tensões residuais geradas no torneamento das amostras.

Direção Amostra	Tensões Residuais (MPa)			
	Desbaste		Acabamento	
	Longitudinal	Transversal	Longitudinal	Transversal
	Inserto Convencional		Inserto Convencional	
1	210 ± 1	420 ± 1	260 ± 9	890 ± 2
2	250 ± 15	370 ± 10	290 ± 1	100 ± 4
	Inserto Convencional		Inserto <i>Wiper</i>	
3	470 ± 1	650 ± 12	- 120 ± 7	475 ± 2
4	440 ± 1	880 ± 3	- 190 ± 2	310 ± 2

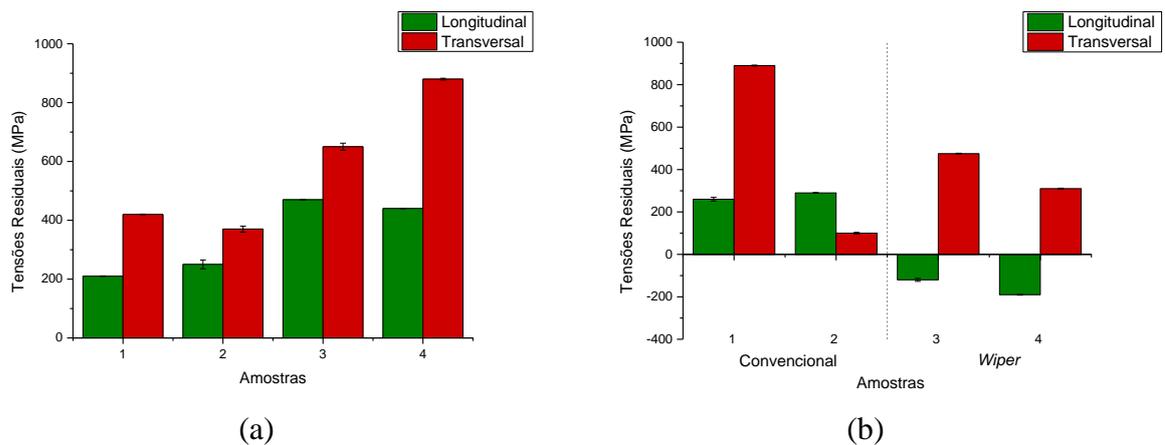


Figura 3: Tensões residuais geradas no torneamento: (a) passe de desbaste e (b) passe de acabamento.

Analisando a Figura 4 é possível verificar que em todas as amostras tensões residuais trativas foram geradas nos passes de desbaste com inserto convencional e que as tensões residuais transversais foram superiores em até 100% às longitudinais na amostra 4, ultrapassando o limite de escoamento do material de 550 MPa. De acordo com Huang & Yang, isso se deve ao fato da força de corte, que atua no sentido da velocidade de corte ser superior à força de avanço que atua no sentido longitudinal do material torneado<sup>(7)</sup>. Com relação às tensões residuais geradas no acabamento (Figura 5a) é possível observar que, enquanto as tensões residuais longitudinais após o acabamento com inserto convencional se mantiveram trativas, as amostras que foram torneadas com inserto *wiper* tiveram tensões residuais longitudinais compressivas. Estes resultados estão coerentes com o observado por Guddat *et al.*(2011), pois com o uso da geometria *wiper*, a área de contato entre a ponta da ferramenta e a peça é ampliada, induzindo maior deformação e consequentemente a diminuição das tensões residuais trativas e/ou tornando-as mais compressivas<sup>(8)</sup>.

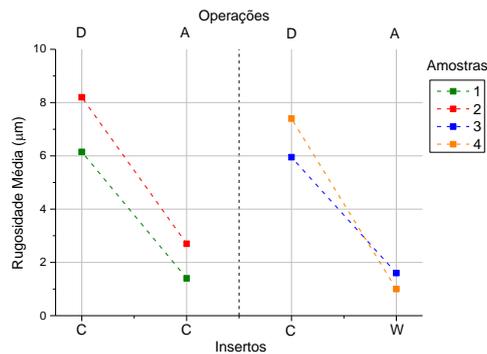


Figura 6: Rugosidade média considerando os insertos utilizados: Convencional (C) e *Wiper* (W) nas operações de: Desbaste (D) e Acabamento (A).

Os resultados de rugosidade média apresentados na Figura 6 mostram que todas as amostras apresentaram o mesmo comportamento, com valores elevados após a operação de desbaste, que diminuíram após o acabamento. Segundo Jiang & Wang (2019), isso pode ser explicado devido à diminuição do avanço utilizado nas operações de acabamento<sup>(10)</sup>. É possível verificar ainda que na operação de acabamento (realizada com menor avanço) a geometria do inserto não impactou nos valores de  $R_a$ , que foram similares tanto para o torneamento com insertos convencionais quanto *wiper*.

## CONCLUSÕES

O presente trabalho permite as seguintes conclusões:

1. Os parâmetros utilizados no torneamento de desbaste influenciaram diretamente na geração das tensões residuais tanto longitudinais quanto transversais que foram elevadas e de natureza trativa, apresentando valores acima de 50% do limite de escoamento do material (550 MPa).
2. O passe de acabamento com inserto *wiper* tornou as tensões residuais longitudinais compressivas. Entretanto, independentemente do inserto utilizado, todas as tensões residuais transversais se mantiveram trativas apesar da maioria ter sofrido relaxação.
3. Com o aumento da velocidade de corte, diminuição do avanço e da profundidade de corte, a operação de acabamento correspondeu a um valor menor de rugosidade média. Sendo assim, ao final do experimento, todas as amostras apresentaram melhores condições de acabamento superficial independentemente do inserto utilizado.
4. O uso de inserto convencional levou ao aumento das tensões residuais longitudinais enquanto o emprego de insertos *wiper* resultou em mudança na natureza das tensões residuais longitudinais de trativas para compressivas. Entretanto, a geometria do inserto não influenciou na rugosidade média, que apresentou valores próximos com o emprego de ambos os insertos.

## AGRADECIMENTOS

Este estudo foi financiado, em parte, pela Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) – Código Financeiro 001. Os autores agradecem também às agências de pesquisa CNPq e FAPERJ, pelo apoio financeiro, que permitiu a realização deste trabalho.

## REFERÊNCIAS

1. MÉLO EB, SANTOS DC, MAGNABOSCO R. Estudo comparativo dos métodos de quantificação de porcentagem volumétrica de ferrita em aço inoxidável dúplex UNS S31803 (SAF 2205). APRESENTAÇÃO NO SEMINÁRIO BRASILEIRO DO AÇO INOXIDÁVEL, p. 12-14, São Paulo, 2009.
2. STEPHENSON, D. A.; AGAPIOU, J. S. Metal Cutting Theory and Practice, Third Edition, Boca Raton, FL: CRC Press, 2016.
3. ÖZEL, T.; ULUTAN, D. Prediction of machining induced residual stresses in turning of titanium and nickel-based alloys with experiments and finite element simulations. CIRP Annals - Manufacturing Technology, v. 61, n. 1, p. 547–550, 2012.
4. HE, C.L., ZONG W.J., ZHANG J.J., Influencing factors and theoretical modeling methods of surface roughness in turning process: State-of-the-art, International Journal of Machine Tools and Manufacture, Vol. 129, 2018.
5. D’ADDONA, D. M.; RAYKAR, S. J. Analysis of Surface Roughness in Hard Turning Using Wiper Insert Geometry. Procedia CIRP, v. 41, p. 841–846, 2016.
6. VOGEL, J.P., NERY, W.S., ARAUJO, A.C. Estudo do efeito do avanço nas forças e no acabamento de um torneamento de aço superduplex. 7º Congresso Brasileiro de Engenharia de Fabricação. Penedo, Itatiaia – RJ, 2013.
7. HUANG, K., YANG, W. Analytical modeling of residual stress formation in workpiece material due to cutting. International Journal of Mechanical Sciences, vol. 114, p.21–34, 2016.
8. GUDDAT, J., M’SAOUBI, R., ALM, P., MEYER, D. Hard turning of AISI 52100 using PCBN wiper geometry inserts and the resulting surface integrity. Procedia Engineering 19, 2011.
9. JIANG, L., WANG, D., Finite-element-analysis of the effect of different wiper tool edge geometries during the hard turning of AISI 4340 steel. Simulation Modelling Practice and Theory, 2019.

## **BEHAVIOR OF RESIDUAL STRESS GENERATED IN SUPER DUPLEX STEEL TURNING**

### **ABSTRACT**

*Stainless steels are widely used in the manufacture of parts for the oil and gas and petrochemical industries due to their excellent mechanical strength, excellent corrosion resistance and ductility. Among stainless steels, super duplex steels stand out for having high mechanical properties and corrosion resistance when compared to austenitic steels, which is due to the balance of phases in their microstructure, which contains equal amounts of ferrite and austenite. However, machining these steels is considered difficult due to the work hardening rate, high strength and low thermal conductivity. Therefore, due to their low machinability, these steels tend to generate residual tensile stresses that are deleterious to the material, as they can contribute to the nucleation and propagation of fatigue cracks. In addition, the two-phase microstructure of these steels contributes to the induction of vibrations during machining, making it difficult to obtain a good finish. Thus, the present work aims to study the residual stresses generated in the turning of super duplex stainless steel using two types of carbide insert geometries: conventional and wiper. Residual stresses were analyzed by X-ray diffraction, using the  $\sin^2\psi$  method on ferrite. The results showed that the residual stresses are tensile after rough turning with the use of a conventional insert and the average roughness was high. After the finishing pass, the samples machined with wiper geometry inserts showed better surface finish and the residual stresses changed from a tensile to a compressive nature. However, using the conventional insert, this behavior was not observed, and the residual stresses remained tractive, despite undergoing relaxation.*

**Keywords:** residual stresses, super duplex steel, machining, X-ray diffraction.