

ESTUDO DAS TENSÕES RESIDUAIS GERADAS POR TORNEAMENTO, RETIFICAÇÃO E *BELT-FINISHING* EM AÇO INOXIDÁVEL SUPERMARTENSÍTICO

Maria Cindra Fonseca, mariacindra@id.uff.br¹

Túlio Salek Quintas, tulio_salek@id.uff.br¹

Marília Lima, marilia.lima@vallourec.com²

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

²Superintendência de Pesquisa e Desenvolvimento, Vallourec Research Center Brasil/Vallourec Soluções Tubulares do Brasil S.A., Av. Olinto Meireles, 65, CEP 30.640-010, Belo Horizonte – MG

Resumo: As tensões residuais geradas por usinagem exercem grande influência na vida em fadiga e no desempenho em serviço de componentes mecânicos. Um dos processos de usinagem mais utilizados é o torneamento, o qual tende a induzir tensões residuais trativas, que exercem efeito deletério no desempenho do componente torneado. Entretanto, processos de acabamento como a retificação e o polimento (*belt-finishing*) são geradores de tensões residuais compressivas que melhoram a vida em fadiga do componente. Estes processos são empregados após o torneamento e produzem não apenas um melhor acabamento superficial, mas também tensões compressivas na superfície do componente acabado. Sob essa perspectiva, neste trabalho foi estudado o comportamento das tensões residuais geradas por torneamento, retificação e *belt-finishing* com aço inoxidável supermartensítico. Os parâmetros de corte foram variados em cada processo a fim de se analisar a influência de diferentes regimes de corte sobre as tensões residuais geradas. O torneamento foi realizado com insertos de geometria convencional e *wiper*, empregando-se diferentes velocidades de corte e avanços. Na retificação foram usadas duas profundidades de corte e no polimento *belt-finishing* foram usadas duas lixas, uma de granulometria fina e outra grossa. As tensões residuais foram medidas pela técnica de difração de raios-X, utilizando o método do $\sin^2\psi$. A remoção de camadas por polimento eletrolítico foi usada em conjunto com a difração de raios-X para avaliar as tensões subsuperficiais e análises de rugosidade média (R_a) complementaram o estudo. Os resultados mostram que o torneamento com inserto *wiper* seguido de *belt-finishing* com material abrasivo mais fino produziu tensões residuais superficiais compressivas de maiores magnitudes e tensões residuais compressivas mais estáveis nas camadas subsuperficiais. A retificação também produziu tensões residuais superficiais compressivas, porém, menos estáveis nas camadas subsuperficiais e não foi observada influência significativa em relação ao efeito da profundidade de corte nessas tensões.

Palavras-chave: tensões residuais, difração de raios-X, usinagem, acabamento superficial, aço inoxidável supermartensítico

1. INTRODUÇÃO

A integridade e o desempenho de componentes mecânicos usinados podem sofrer influência significativa das tensões residuais geradas por usinagem (Sarnobat and Raval, 2019), as quais resultam principalmente de deformações plásticas não homogêneas e aquecimento e resfriamento não uniformes da peça (Lin *et al.*, 2019; Mirkoohi *et al.*, 2019; H. Wang *et al.*, 2018). Essas tensões podem causar efeitos deletérios ou benéficos à vida útil de um componente, dependendo de sua natureza e magnitude (Masmiahi *et al.*, 2016). É bem estabelecido que as tensões residuais de tração reduzem a resistência à fadiga e à corrosão sob tensão de um componente, enquanto as tensões residuais de compressão podem melhorar essas propriedades (Martell *et al.*, 2014; Salman *et al.*, 2019).

O torneamento é um dos processos de usinagem mais comuns, de modo que pode-se encontrar na literatura diversos estudos sobre a influência de diferentes fatores do processo como parâmetros de corte, fluidos de corte e geometria da ferramenta de corte no comportamento das tensões residuais e acabamento superficial de peças torneadas (Capello, 2005; Çetindag *et al.*, 2020; Dumas *et al.*, 2018; Chen *et al.*, 2018; Khan *et al.*, 2018). Com relação à geometria da ferramenta de corte, diversos estudos abordam o uso de insertos com geometria *wiper* e suas vantagens em relação aos insertos convencionais (Abbas *et al.*, 2020; Çetindag *et al.*, 2020; Taylor *et al.*, 2020; D'Addona and Raykar, 2016; Correia and Davim, 2011; Kiyak *et al.*, 2016). A tecnologia *wiper* consiste em uma geometria otimizada na qual a ponta

do inserto é formada por múltiplos raios, resultando em um raio de ponta efetivamente maior, ao contrário da geometria convencional que consiste em um único raio de ponta (Abbas *et al.*, 2020; D'Addona and Raykar, 2016). Enquanto os insertos convencionais produzem picos na superfície usinada, a geometria multi-raios dos insertos *wiper* proporciona maior contato entre a ferramenta e a superfície da peça, o que resulta em um efeito de alisamento dos picos, produzindo um melhor acabamento superficial (Kiyak *et al.*, 2016).

Um dos processos de acabamento mais empregados na indústria é a retificação. Esse processo é normalmente empregado como última etapa de fabricação para garantir o controle dimensional e geométrico de um componente, produzindo excelentes acabamentos superficiais, ao mesmo tempo que normalmente induz tensões residuais compressivas (Bianchi *et al.*, 2003; Borchers *et al.*, 2020; Capello and Semeraro, 2002; Ding *et al.*, 2017; Yao *et al.*, 2013). Outro processo de acabamento que vem ganhando destaque é o *belt-finishing*, um tipo de polimento automático no qual se utiliza uma lixa em forma de cinta feita de material polimérico com partículas abrasivas. Esse processo tem ganhado destaque devido à sua capacidade de induzir tensões residuais compressivas de elevadas magnitudes nas camadas superficiais e subsuperficiais dos componentes, além de produzir excelente acabamento superficial (Bouktib and Khellouki, 2021; Khellouki *et al.*, 2010; Wang *et al.*, 2018; Wang *et al.*, 2020).

Os aços inoxidáveis supermartensíticos foram desenvolvidos a partir de aços inoxidáveis martensíticos convencionais, sendo empregados principalmente na fabricação de componentes tubulares utilizados na indústria de óleo e gás, comumente conhecidos como *Oil Country Tubular Goods* (OCTG) (Hara *et al.*, 2020). Esses aços possuem maior tenacidade, maior resistência à corrosão e melhor soldabilidade que os aços inoxidáveis martensíticos convencionais e seu custo de fabricação é inferior ao dos aços inoxidáveis duplex e superduplex, o que os torna uma alternativa atrativa para a fabricação dos OCTG (Tavares *et al.*, 2018). No entanto, apesar de sua alta resistência à corrosão, os aços inoxidáveis supermartensíticos podem ser suscetíveis a problemas como a corrosão sob tensão, que pode ser agravada pela presença de tensões residuais induzidas pelos processos de fabricação desses materiais (Hara *et al.*, 2020; Serafim *et al.*, 2021). É possível encontrar na literatura trabalhos sobre a usinagem de aço inoxidável supermartensítico, abordando aspectos como vida útil e mecanismo de desgaste das ferramentas de corte (Corrêa *et al.*, 2017), porém, ainda não foram encontrados estudos abordando as tensões residuais geradas na usinagem desse material.

O presente trabalho tem como objetivo analisar as tensões residuais geradas na usinagem de aço inoxidável supermartensítico por torneamento, retificação e *belt-finishing*, com diferentes condições de corte e geometrias de ferramenta. As tensões residuais superficiais e subsuperficiais foram medidas pela técnica de difração de raios-X, usando o método do $\sin^2\psi$ e a remoção de camadas por polimento eletrolítico. O estudo foi complementado por análises de acabamento superficial, caracterizado por medições da rugosidade média (R_a).

2. MATERIAIS E MÉTODOS

O material estudado neste trabalho foi um aço inoxidável supermartensítico, comercialmente conhecido como Super 13Cr. A composição química e as propriedades mecânicas do material são apresentadas nas Tabelas 1 e 2, respectivamente.

Tabela 1. **Composição química do aço Super 13Cr (% em peso) (Fonte: o Fabricante).**

C	Mn	P	S	Si	Ni	Cr
0,013	0,44	0,018	0,001	0,24	5,82	12,3
Mo	Al	Cu	V	Nb	Ti	N
2,11	0,005	0,1	0,027	0,01	0,073	0,0116

Tabela 2. **Propriedades mecânicas do aço Super 13Cr (Fonte: o Fabricante).**

Limite de escoamento (MPa)	Limite de resistência (MPa)	Dureza (HRC)
841	887	25,4

Doze amostras de aço Super 13Cr foram torneadas, variando-se a velocidade de corte, o avanço e a geometria do inserto. Após os experimentos de torneamento, quatro das amostras torneadas foram selecionadas para os experimentos de retificação e outras duas foram selecionadas para os experimentos de *belt-finishing*. Nos experimentos de retificação foram empregadas duas profundidades de corte e a granulometria do material abrasivo foi variada nos experimentos de *belt-finishing*. Todos os experimentos foram realizados com fluido de corte semi-sintético aplicado em jorro.

Os experimentos de torneamento foram realizados em um torno CNC - VEKER LVK-175, empregando-se profundidade de corte de 0,1 mm, três velocidades de corte, dois avanços e insertos de metal duro com geometrias, convencional e *wiper*. As condições de corte dos experimentos de torneamento são mostradas na Tab. 3. Uma nova aresta de corte foi utilizada em cada experimento para evitar o efeito do desgaste da ferramenta.

Tabela 3. Condições de corte empregadas no torneamento.

Parâmetro	Valor
Velocidade de corte (m/min)	60 / 80 / 100
Avanço (mm/rev)	0,1 / 0,2
Geometria do inserto	Convencional (TNMG160404-MF2025) Wiper (TNMG160404-WF2025)
Profundidade de corte (mm)	0,1

Os experimentos de retificação foram realizados em uma retificadora cilíndrica CNC Toyoda 03/2014 60M, utilizando rebolo de óxido de alumínio branco (Al_2O_3), o qual foi dressado antes de cada operação para evitar o efeito do desgaste. As amostras foram retificadas com duas profundidades de corte (a_p), enquanto os demais parâmetros foram mantidos constantes. As condições de corte dos experimentos de retificação são mostradas na Tab. 4.

Tabela 4. Condições de corte empregadas na retificação.

Parâmetro	Valor
Profundidade de corte (mm)	0,01 / 0,02
Velocidade da peça (m/min)	19
Velocidade de corte (m/s)	60
Avanço transversal (mm/rev)	0,008

Os experimentos de *belt-finishing* foram realizados em uma polidora longitudinal automática *Materials Testing Center*, modelo GR04, utilizando cintas abrasivas de óxido de alumínio branco com duas granulometrias diferentes. As condições de corte usadas nos experimentos de *belt-finishing* são mostradas na Tab. 5. A granulometria de número 200 corresponde a um tamanho de grão abrasivo de 75 μm , enquanto a granulometria de número 600 corresponde a um tamanho de grão de 25 μm .

Tabela 5. Condições de corte empregadas no *belt-finishing*.

Parâmetro	Valor
Granulometria do material abrasivo (<i>mesh</i>)	200 / 600
Avanço transversal (mm/s)	40
Carga de aplicação (kg)	0,8

Após os experimentos de usinagem, as tensões residuais foram medidas pela técnica de difração de raios X, com o analisador XStress3000, usando o método do $\sin^2\psi$, radiação $CrK\alpha$ ($\lambda_{CrK\alpha} = 2,29092 \text{ \AA}$) com um colimador de $\varnothing 2,0 \text{ mm}$ (30 kV e 6,7 mA) e difratando o plano (211) da ferrita com ângulo $2\theta = 156,41^\circ$. O *software* Xtronic V1 0 Standard foi utilizado para realizar o cálculo das tensões. A técnica de remoção de camadas por polimento eletrolítico foi empregada em conjunto com a difração de raios-X para analisar as tensões residuais subsuperficiais. As medições foram feitas em um ponto de cada amostra, localizado na metade do comprimento usinado, na direção longitudinal, paralela à direção de avanço da ferramenta de corte. O acabamento superficial foi caracterizado pela medição da rugosidade média R_a usando um rugosímetro Taylor Hobson, modelo Surtronic 25. A Fig. 1 apresenta o sistema de medição das tensões residuais.

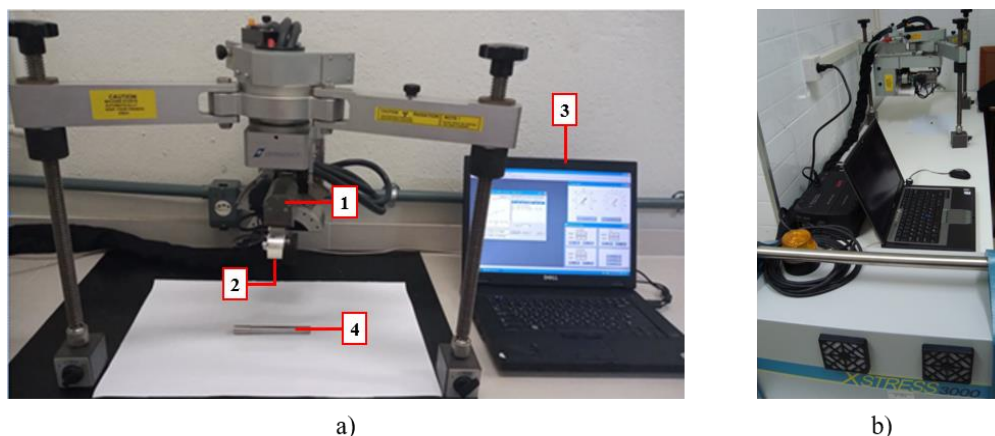


Figura 1. Analisador de tensões XStress3000: a) sistema de medição: 1) tubo de raios-X, 2) colimador, 3) *software* 4) amostra analisada; b) equipamento completo com a unidade de controle.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

As tensões residuais longitudinais foram medidas após os experimentos de torneamento, retificação e *belt-finishing*. Os resultados dos experimentos de torneamento estão apresentados na Fig. 3.

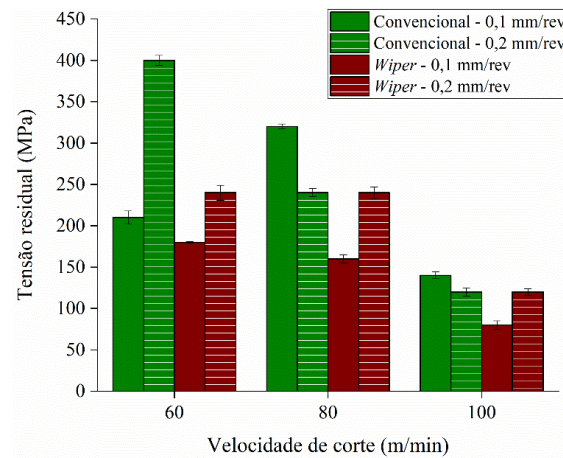


Figura 2. Tensões residuais após torneamento.

Os resultados mostram que tensões residuais trativas de menores magnitudes foram produzidas no torneamento com inserto *wiper*, principalmente quando utilizadas maiores velocidades de corte. Já a tensão residual de maior magnitude (320 MPa) foi gerada no torneamento com inserto convencional e velocidade de corte de 80 m/min. De acordo com Çetindag *et al.* (2020) a geometria *wiper* proporciona um contato mais prolongado entre a ferramenta e a peça, quando comparada à geometria convencional, o que pode causar maiores deformações plásticas. Assim, o efeito combinado das maiores deformações plásticas e da refrigeração proporcionada pelo fluido de corte aplicado em jorro poderia explicar as tensões residuais trativas de menores magnitudes produzidas com uso de inserto *wiper*.

É possível perceber que, no geral, houve uma tendência para geração de tensões residuais trativas de menores magnitudes com emprego de maiores velocidades de corte. No trabalho realizado por Sarnobat and Raval (2019) os autores observaram uma tendência semelhante no torneamento com velocidades de corte variando entre 60 m/min e 120 m/min. Segundo os autores, com menor velocidade de corte o tempo de contato entre a peça e a ferramenta de corte é suficientemente prolongado para que mais calor se difunda para a peça, causando um maior aquecimento da superfície da peça, o que pode resultar em tensões residuais trativas de maiores magnitudes. Contudo, com maior velocidade de corte o tempo de contato entre a ferramenta e a peça é menor, o que resultaria em menor quantidade de calor difundido para a peça. Uma observação importante também pode ser feita em relação ao aumento da taxa de remoção de material devido ao aumento da velocidade de corte. Em um trabalho semelhante, Salman *et al.* (2019) afirmam que com maiores taxas de remoção de material mais calor pode ser evacuado pelos cavacos, reduzindo os efeitos térmicos relacionados às tensões residuais trativas. Essas observações podem explicar o comportamento das tensões residuais no torneamento com inserto *wiper*.

Perfis das tensões residuais em profundidade foram construídos para duas amostras torneadas com inserto convencional e *wiper*, contendo o mesmo valor de tensão residual superficial (240 MPa). Os resultados estão apresentados na Fig. 3.

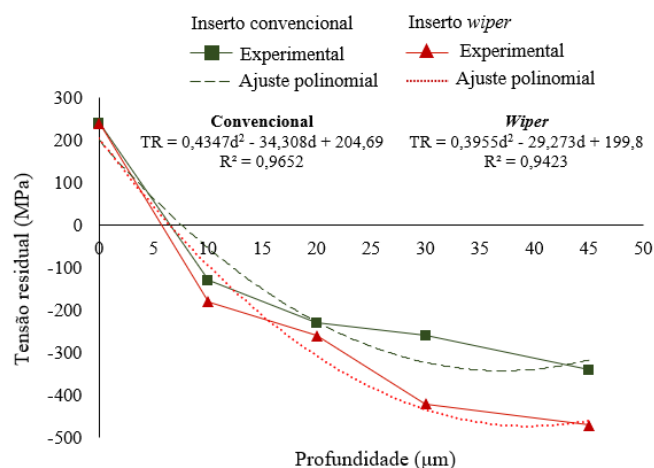


Figura 3. Perfis das tensões residuais em profundidade após o torneamento.

Os resultados apresentados na Fig. 3 mostram que as tensões residuais superficiais tratativas de 240 MPa se tornam compressivas a partir de uma fina camada de 10 μm (cerca de -150 MPa) e aumentam progressivamente em magnitude até a profundidade de 45 μm (atingindo -470 MPa com emprego de inserto *wiper*). O emprego de inserto *wiper* produziu tensões compressivas 72% mais elevadas que as observadas na amostra torneada com inserto convencional (-340 MPa). Esse resultado pode sugerir que a camada deformada plasticamente foi mais espessa no torneamento com emprego de inserto *wiper*, o que está coerente com a hipótese encontrada na literatura (Çetindag *et al.*, 2020), de que esse tipo de inserto induz maiores deformações plásticas que o inserto convencional.

A Fig. 4 apresenta os resultados obtidos nos experimentos de retificação e *belt-finishing*. Ao contrário dos resultados obtidos no torneamento, ambos os processos de acabamento induziram tensões residuais superficiais compressivas, o que é muito desejável do ponto de vista da integridade de um componente usinado (Borchers *et al.*, 2020).

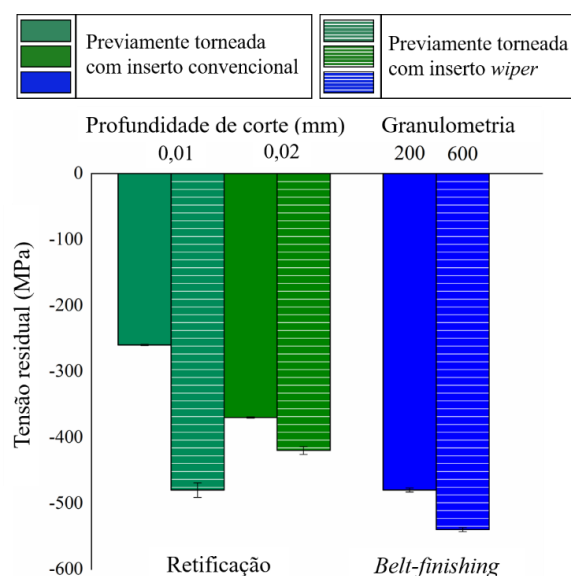


Figura 4. Tensões residuais após retificação e *belt-finishing*.

Nos experimentos de retificação realizados com amostras previamente torneadas com inserto *wiper* foi gerada uma tensão residual compressiva de maior magnitude com emprego de menor profundidade de corte (0,01 mm). Um comportamento contrário foi observado na retificação de amostras previamente torneadas com inserto convencional, ou seja, tensões compressivas de maiores magnitudes foram geradas com emprego de maior profundidade de corte (0,02 mm). De acordo com Ding *et al.* (2017), com profundidades de corte mais elevadas, a quantidade de grãos do rebolo em contato com a superfície da peça é maior e, conseqüentemente, a maior pressão exercida aumenta a deformação plástica do material, contribuindo para a geração de tensões residuais compressivas. Entretanto, não é possível afirmar se os efeitos do torneamento tiveram influência nas tensões geradas na retificação.

A operação de *belt-finishing* com material abrasivo mais fino (granulometria 600) foi capaz de produzir tensões residuais compressivas de magnitude ligeiramente maior (12%) que a produzida com material abrasivo mais grosso (granulometria 200), entretanto, mais experimentos seriam necessários para avaliar se a influência da granulometria é significativa. Segundo Khellouki *et al.* (2007), Kermouche *et al.* (2010) e Bouktib e Khellouki (2021) a operação de *belt-finishing* é capaz de produzir tensões residuais compressivas de elevadas magnitudes devido principalmente à pressão de contato entre a cinta abrasiva e a superfície da peça. No trabalho realizado por Bouktib and Khellouki (2021) os autores avaliam a influência do tamanho do grão abrasivo nas tensões residuais geradas pelo processo *belt-finishing* com passes únicos e passes múltiplos da cinta abrasiva. Os autores observaram que as tensões residuais compressivas foram mais intensas e mais estáveis quando o processo foi executado com um passe de desbaste, usando um material abrasivo mais grosso, seguido por um passe de acabamento usando um material abrasivo mais fino. Também foi observado que o material abrasivo mais grosso foi mais eficiente em gerar tensões compressivas de maiores magnitudes, diferente do que foi observado neste trabalho. Além disso, os autores também observaram que as tensões residuais compressivas foram mais estáveis no polimento de superfícies com menor rugosidade, quando comparadas às tensões geradas no polimento de superfícies com maior rugosidade.

A Fig. 5 apresenta os perfis das tensões residuais em profundidade obtidos para as amostras retificadas, nas quais foram medidas tensões residuais superficiais compressivas de maiores magnitudes, bem como os resultados das tensões residuais em ambas as amostras acabadas por *belt-finishing*.

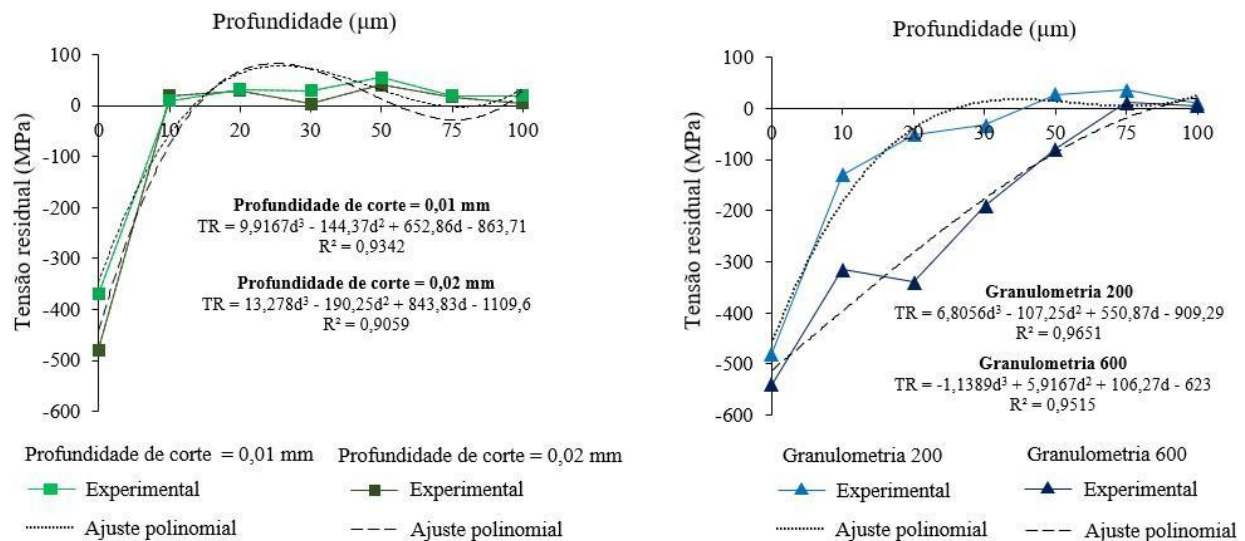


Figura 5. Perfis das tensões residuais em profundidade após a) retificação e b) *belt-finishing*.

Os perfis apresentados na Fig. 5 revelam um comportamento diferente entre as tensões residuais subsuperficiais produzidas por retificação e por *belt-finishing*. As tensões residuais compressivas após a retificação (-420 MPa, em média) se tornaram trativas e de baixas magnitudes nas camadas subsuperficiais (25 MPa, em média) já a partir de 10 μm de profundidade. No processo de *belt-finishing*, as tensões residuais compressivas elevadas na superfície (-500 MPa, em média), diminuíram em magnitude a partir de uma fina camada de 10 μm até ocorrer nas camadas mais profundas (50 μm) uma inversão para tensões residuais trativas de pequenas magnitudes (26 MPa em média). Este resultado está de acordo com as observações de Bouktib e Khellouki (2021), que afirmam que a operação de *belt-finishing* é capaz de induz tensões residuais compressivas não só na superfície, mas também em camadas subperficiais do componente. Os resultados obtidos pelos autores mostram que as tensões residuais compressivas se mantiveram estáveis em uma camada de cerca de 12 μm .

É possível observar que a camada afetada após o acabamento por *belt-finishing* com cinta abrasiva de granulometria 600 (abrasivo mais fino) foi maior do que a produzida com uso de cinta abrasiva de granulometria 200 (abrasivo mais grosso), visto que as tensões residuais subsuperficiais permaneceram em compressão ao longo de uma maior profundidade até (75 μm). Com relação às tensões residuais subsuperficiais das amostras retificadas, elas foram praticamente nulas, o que pode sugerir que a profundidade de corte não teve influência significativa nesse caso. Esses resultados sugerem que o processo de acabamento por *belt-finishing* foi mais eficaz em promover um estado benéfico de tensões residuais tanto na superfície quanto em camadas subsuperficiais, quando comparado ao processo de retificação.

Medições de rugosidade média R_a foram realizadas para avaliar o acabamento superficial produzido pelos diferentes processos de usinagem. A Fig. 6 apresenta os resultados obtidos após o torneamento.

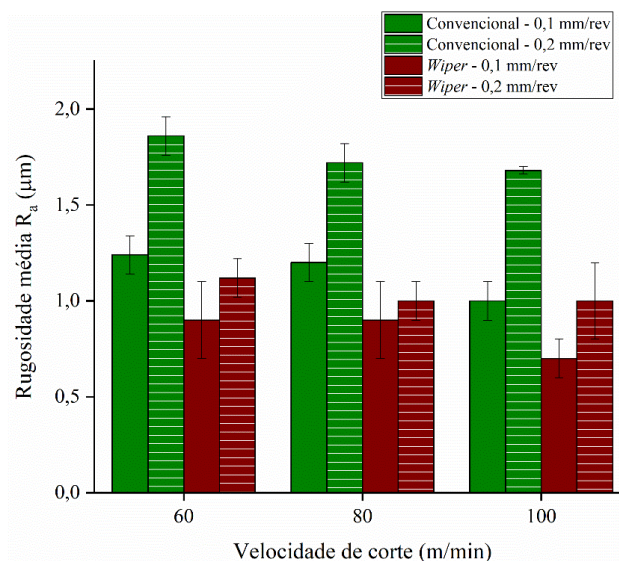


Figura 6. Rugosidade média R_a após torneamento.

Os resultados apresentados na Fig. 6 revelam que um melhor acabamento superficial (menores valores de R_a) foi obtido com o emprego de inserto *wiper*, quando comparado ao acabamento superficial com inserto convencional. O menor valor de rugosidade média R_a ($0,7 \mu\text{m}$) foi gerado no torneamento com inserto *wiper*, utilizando o menor avanço ($0,1 \text{ mm/rev}$) e a maior velocidade de corte (100 m/min), enquanto o maior valor de R_a ($1,86 \mu\text{m}$) foi obtido no torneamento com inserto convencional, maior avanço ($0,2 \text{ mm/rot}$) e menor velocidade de corte (60 m/min). Esses resultados estão de acordo com os publicados por Khan *et al.* (2018). Segundo os autores a geometria multirraios dos insertos *wiper* promove uma maior área de contato entre o inserto e a peça em relação aos insertos convencionais, produzindo um efeito de alisamento que reduz os picos de rugosidade formados na superfície usinada pela ponta do inserto, o que resulta em um melhor acabamento superficial.

Os resultados da rugosidade média (R_a) após os experimentos de retificação são apresentados na Fig. 7.

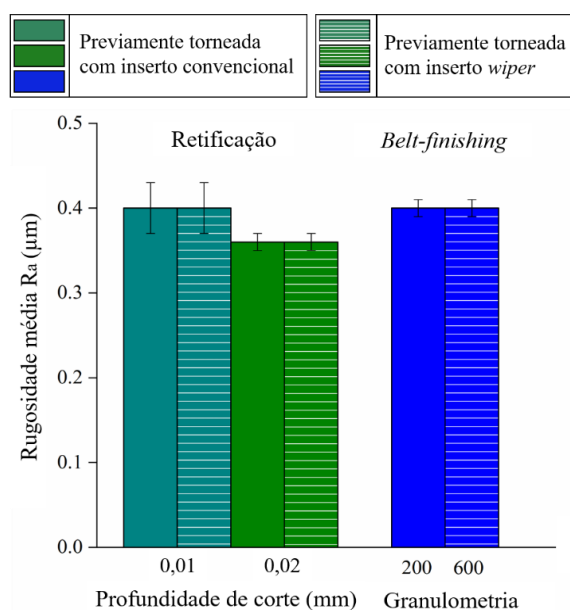


Figura 7. Rugosidade média (R_a) após retificação e *belt-finishing*.

É possível observar que um melhor acabamento superficial foi obtido nas amostras retificadas com maior profundidade de corte ($0,02 \text{ mm}$), quando comparadas àquelas retificadas com menor profundidade de corte ($0,01 \text{ mm}$). De acordo com Yao *et al.* (2013), o aumento da profundidade de corte faz com que uma maior quantidade de grãos abrasivos entre em contato com a superfície da peça, promovendo uma deformação mais homogênea da superfície da peça, o que resulta em um melhor acabamento superficial. Já o acabamento superficial gerado pelo processo de *belt-finishing* foi o mesmo que o produzido na retificação com menor profundidade de corte, não havendo diferença com a variação da granulometria do material abrasivo.

4. CONCLUSÕES

O presente trabalho, que teve como objetivo analisar as tensões residuais e o acabamento superficial gerados por torneamento, retificação e *belt-finishing* de aço inoxidável supermartensítico, permite as seguintes conclusões:

1. O torneamento com inserto *wiper* foi mais eficiente em produzir tensões residuais trativas de menores magnitudes, principalmente quando utilizados menor avanço e maior velocidade de corte. O emprego de inserto *wiper* também resultou em tensões residuais subsuperficiais compressivas de magnitudes maiores que as produzidas no torneamento com inserto convencional em profundidades partir de uma fina camada de $10 \mu\text{m}$.
2. A retificação induziu tensões residuais compressivas na superfície, independente das condições de torneamento anteriores, porém, um valor máximo de -480 MPa foi obtido na amostra previamente torneada com inserto *wiper* e retificada com menor profundidade de corte ($0,01 \text{ mm}$). A profundidade de corte na retificação mostrou maior influência nas tensões residuais produzidas na superfície, enquanto as tensões residuais subsuperficiais foram trativas e de baixíssimas magnitudes em profundidades entre $10 \mu\text{m}$ e $100 \mu\text{m}$.
3. O processo de *belt-finishing* foi mais eficiente na geração de tensões residuais compressivas, tanto na superfície quanto em camadas subsuperficiais. Elevadas tensões residuais superficiais foram produzidas, principalmente com o emprego de material abrasivo mais fino (-540 MPa). Nas camadas subsuperficiais as tensões residuais permaneceram em compressão até uma profundidade de $30 \mu\text{m}$ com material abrasivo mais grosso e foram mais estáveis com o uso de abrasivo mais fino, permanecendo em compressão até a profundidade de $50 \mu\text{m}$.

5. AGRADECIMENTOS

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

6. REFERÊNCIAS

- Abbas, A. T., El Rayes, M. M., Luqman, M., Naeim, N., Hegab, H., and Elkaseer, A., 2020. "On the assessment of surface quality and productivity aspects in precision hard turning of AISI 4340 steel alloy: Relative performance of Wiper vs. conventional inserts". *Materials*, Vol. 13, No. 9. doi: 10.3390/ma13092036.
- Bianchi, E. C., Silva, E. J. da, Aguiar, P. R. de, and Catai, R. E., 2003. "Evaluation of the thermal damages in inlet engine valves varying the grinding wheels and the cutting fluids". *Rem: Revista Escola de Minas*, Vol. 56, No. 2, pp. 81–86. doi: 10.1590/s0370-44672003000200003
- Borchers, F., Meyer, H., Heinzl, C., Meyer, D., and Epp, J., 2020. "Development of surface residual stress and surface state of 42CrMo4 in multistage grinding". *Procedia CIRP*, Vol. 87, pp. 198–203. doi: 10.1016/j.procir.2020.02.095
- Bouktib, N. and Khellouki, A., 2021. "Investigation of belt-finishing effect on the residual stress field through repeated scratching on rough hard-turned surface". *Tribology International*, Vol. 153, 106644. doi: 10.1016/j.triboint.2020.106644
- Capello, E., 2005. "Residual stresses in turning: Part I: Influence of process parameters". *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 160, No. 2, pp. 221–228. doi: 10.1016/j.jmatprotec.2004.06.012.
- Capello, E., and Semeraro, Q., 2002. "Process parameters and residual stresses in cylindrical grinding". *Journal of Manufacturing Science and Engineering, Transactions of the ASME*, Vol. 124, No. 3, pp. 615–623. doi: 10.1115/1.1428328.
- Çetindag, H. A., Çiçek, A., Uçak, N., 2020. "The effects of CryoMQL conditions on tool wear and surface integrity in hard turning of AISI 52100 bearing steel. *Journal of Manufacturing Processes*, Vol. 56, pp. 463–473. doi: 10.1016/j.jmapro.2020.05.015.
- Chen, S., Feng, R., Zhang, C., and Zhang, Y., 2018. "Surface roughness measurement method based on multi-parameter modeling learning". *Measurement: Journal of the International Measurement Confederation*, Vol. 129, pp. 664–676. doi: 10.1016/j.measurement.2018.07.071
- Corrêa, J. G., Schroeter, R. B., and Machado, Á. R., 2017. "Tool life and wear mechanism analysis of carbide tools used in the machining of martensitic and supermartensitic stainless steels". *Tribology International*, Vol. 105, pp. 102–117. doi: 10.1016/j.triboint.2016.09.035.
- D'Addona, D. M., and Raykar, S. J., 2016. "Analysis of Surface Roughness in Hard Turning Using Wiper Insert Geometry". *Procedia CIRP*, Vol. 41, pp. 841–846. doi: 10.1016/j.procir.2015.12.087.
- Ding, W., Zhang, L., Li, Z., Zhu, Y., Su, H., and Xu, J., 2017. "Review on grinding-induced residual stresses in metallic materials". *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 88 (9–12), pp. 2939–2968. doi: 10.1007/s00170-016-8998-1.
- Dumas, M., Valiorgue, F., Van Robaey, A., Rech, J., 2018. "Interaction between a roughing and a finishing operation on the final surface integrity in turning". *Procedia CIRP* 71 (2018), pp. 396–400. doi: 10.1016/j.procir.2018.05.050.
- Esteves Correia, A. and Paulo Davim, J., 2011. "Surface roughness measurement in turning carbon steel AISI 1045 using wiper inserts". *Measurement: Journal of the International Measurement Confederation*, Vol. 44, No. 5, pp. 1000–1005. doi: 10.1016/j.measurement.2011.01.018.
- Hara, T., Semba, H. and Amaya, H., 2020. "Pipe and Tube Steels for Oil and Gas Industry and Thermal Power Plant". In *Reference Module in Materials Science and Materials Engineering*. doi: 10.1016/b978-0-12-803581-8.12107-1.
- Khan, S. A., Umar, M., Saleem, M. Q., Mufti, N. A. and Raza, S. F., 2018. "Experimental investigations on wiper inserts' edge preparation, workpiece hardness and operating parameters in hard turning of AISI D2 steel". *Journal of Manufacturing Processes*, Vol. 34 (June), pp. 187–196. doi: 10.1016/j.jmapro.2018.06.004.
- Khellouki, A., Rech, J. and Zahouani, H., 2010. "The effect of lubrication conditions on belt finishing". *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Vol. 50, No. 10, pp. 917–921. doi: 10.1016/j.ijmachtools.2010.04.004.
- Kiyak, M., Sahin, I. and Cakir, O., 2016. "Application of Wiper Insert in Cutting Tool Technology". In: *Proceedings of ICAS2016 1st International Conference on Advances In Sciences*, pp. 60–65.
- Lin, K., Wang, W., Jiang, R. and Xiong, Y., 2019. "Effect of tool nose radius and tool wear on residual stresses distribution while turning in situ TiB2/7050 Al metal matrix composites". *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 100, No. 1–4, pp. 143–151. doi: 10.1007/s00170-018-2742-y.
- Martell, J. J., Liu, C. R. and Shi, J., 2014. "Experimental investigation on variation of machined residual stresses by turning and grinding of hardened AISI 1053 steel". *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 74, No. 9–12, pp. 1381–1392. doi: 10.1007/s00170-014-6089-8.
- Masmiahi, N., Sarhan, A. A. D., Hassan, M. A. N. and Hamdi, M., 2016. "Optimization of cutting conditions for minimum residual stress, cutting force and surface roughness in end milling of S50C medium carbon steel". *Measurement*:

- Journal of the International Measurement Confederation*, Vol. 86, pp. 253–265. doi: 10.1016/j.measurement.2016.02.049
- Mirkoohi, E., Bocchini, P. And Liang, S. Y., 2019. “Inverse analysis of residual stress in orthogonal cutting”. *Journal of Manufacturing Processes*, Vol. 38 (February), pp. 462–471. doi: 10.1016/j.jmapro.2019.01.033.
- Salman, K. h., Elsheikh, A. H., Ashham, M., Ali, M. K. A., Rashad, M. and Haiou, Z., 2019. “Effect of cutting parameters on surface residual stresses in dry turning of AISI 1035 alloy”. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, Vol. 41, No. 8. doi: 10.1007/s40430-019-1846-0.
- Sarnobat, S. S. and Raval, H. K., 2019. “Experimental investigation and analysis of the influence of tool edge geometry and work piece hardness on surface residual stresses, surface roughness and work-hardening in hard turning of AISI D2 steel”. *Measurement: Journal of the International Measurement Confederation*, Vol. 131, pp. 235–260. doi: 10.1016/j.measurement.2018.08.048.
- Serafim, F. M. F., Alabi, W. O., Oguocha, I. N. A., Odeshi, A. G., Evitts, R., Gerspacher, R. J. and Ohaeri, E. G., 2021. “Stress corrosion cracking behavior of selected stainless steels in saturated potash brine solution at different temperatures”. *Corrosion Science*, Vol. 178 (September 2020), 109025. doi: 10.1016/j.corsci.2020.109025.
- Tavares, S. S. M., Almeida, B. B., Corrêa, D. A. L. and Pardal, J. M., 2018. “Failure of super 13Cr stainless steel due to excessive hardness in the welded joint”. *Engineering Failure Analysis*, Vol. 91 (March), pp. 92–98. doi: 10.1016/j.engfailanal.2018.04.018.
- Taylor, C. M., Diaz, F., Alegre, R., Khan, T., Arrazola, P., Griffin, J. and Turner, S., 2020. “Investigating the performance of 410, PH13-8Mo and 300M steels in a turning process with focus on surface finish”.
- Wang, H., Zhu, L. and Xu, B., 2018. “Residual Stresses of Materials”. *Residual Stresses and Nanoindentation Testing of Films and Coatings*, pp. 1–19. doi: 10.1007/978-981-10-7841-5.
- Wang, W., Salvatore, F. and Rech, J., 2020. “Characteristic assessment and analysis of residual stresses generated by dry belt finishing on hard turned AISI52100”. *Journal of Manufacturing Processes*, Vol. 59, No. 174, pp. 11–18. doi: 10.1016/j.jmapro.2020.09.039.
- Wang, W., Salvatore, F., Rech, J. and Li, J., 2018. “Investigating adhesion wear on belt and its effects on dry belt finishing”. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, Vol. 40, No. 12, pp. 2119–2123. doi: 10.1007/s40430-018-1496-7.
- Yao, C. F., Jin, Q. C., Huang, X. C., Wu, D. X., Ren, J. X. and Zhang, D. H., 2013. “Research on surface integrity of grinding inconel718”. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 65, No. 5–8, pp. 1019–1030. doi: 10.1007/s00170-012-4236-7.

7. RESPONSABILIDADE AUTORAL

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo deste trabalho.

STUDY OF THE RESIDUAL STRESSES INDUCED BY TURNING, GRINDING AND BELT-FINISHING OF SUPERMARTENSITIC STAINLESS STEEL

Maria Cindra Fonseca, e-mail¹

Túlio Salek Quintas, e-mail¹

Marília Lima, e-mail²

¹Department of Mechanical Engineering, School of Engineering/PGMEC, Universidade Federal Fluminense - Rua Passo da Pátria, 156 - CEP 24210-240, Niterói, RJ, Brazil

²Research & Development Superintendence, Vallourec Research Center Brasil/Vallourec Soluções Tubulares do Brasil S.A. - Av. Olinto Meireles, 65 - CEP 30.640-010, Belo Horizonte, MG, Brazil

Abstract. *Residual stresses induced by machining processes play an important role on the performance of machined components. One of the most common machining processes is turning, which normally induces tensile residual stresses that are detrimental to the integrity of the turned component. However, finishing processes such as grinding and belt-finishing are capable of inducing compressive residual stresses that improve properties such as fatigue life and can be used in combination with turning to produce not only a better surface finish, but also a better state of residual stresses on the surface of the finished component. In this work the behavior of residual stresses induced by turning, grinding and belt-finishing was studied. Supermartensitic stainless steel samples were machined with different cutting conditions and conventional and wiper inserts. Residual stresses were measured by the X-ray diffraction technique, using the $\sin^2\psi$ method. Layer removal by electropolishing was used to investigate the residual stresses in the subsurface layers and analyses of surface roughness R_a complemented the study. The results show that turning with wiper insert in combination with belt-finishing with finer abrasive belt produced the highest compressive residual stresses on the surface, as well as an affected layer along which the compressive residual stresses were more stable. Grinding also produced surface compressive residual stresses, however, tensile residual stresses of low magnitudes were obtained in the subsurface layers and no significant influence was observed in relation to the effect of depth of cut on the subsurface residual stresses.*

Keywords: *residual stresses, X-ray diffraction, machining, surface finish, supermartensitic stainless steel*