

ESTUDO DAS TENSÕES RESIDUAIS NO FRESAMENTO FRONTAL DO FERRO FUNDIDO NODULAR AUSTEMPERADO (ADI)

Pedro Paulo Rosa de Paula ⁽¹⁾ (pedroprr@id.uff.br), Lucas Benini ⁽¹⁾ (lucasbenini@id.uff.br)

⁽¹⁾ Universidade Federal Fluminense (UFF); Departamento de Engenharia Mecânica – Programa de Pós-Graduação Mestrado Profissional em Montagem Industrial MPMI

RESUMO: A indústria de fabricação moderna anseia por eficiência de processo e técnicas inovadoras capazes de prever falhas de componentes em serviço nos projetos de engenharia. Neste cenário os ensaios não destrutivos se destacam por não inviabilizarem a utilização da peça final acabada. O emprego do ferro fundido nodular austemperado (ADI) está ganhando notoriedade nas indústrias automotiva, agrícola, aeroespacial e construção civil por conta das suas propriedades mecânicas e eficiência/peso. Entretanto sua utilização é pouco difundida pelo desconhecimento acerca da sua usinagem. Este trabalho tem por objetivo estudar a relação entre os parâmetros do fresamento frontal (ou de topo) na geração de tensões residuais e na qualidade das superfícies usinadas do ADI Classe 3. A usinagem foi realizada com ferramenta de metal duro, variando-se os parâmetros de usinagem. As tensões residuais foram avaliadas pela tensometria por difração de raios-X. A utilização do fluido de corte não ocasionou alterações significativas na qualidade das superfícies usinadas. Os resultados revelaram a incidência de tensões trativas e compressivas e uma excelente qualidade superficial das amostras usinadas.

PALAVRAS-CHAVE: ADI, FRESAMENTO, TENSÃO RESIDUAL, RUGOSIDADE SUPERFICIAL

STUDY OF RESIDUAL STRESS IN FRONT MILLING OF AUSTEMPERATED DUCTILE IRON (ADI)

ABSTRACT: The modern manufacturing industry craves process efficiency and innovative techniques capable of predicting in-service component failures in engineering designs. In this scenario, non-destructive tests stand out because they do not preclude the use of the final finished part. The use of austempered ductile iron (ADI) is gaining notoriety in the automotive, agricultural, aerospace and civil construction industries due to its mechanical properties and efficiency/weight. However, its use is not widespread due to the lack of knowledge about its machining. The objective of this work is to study the relationship between the face milling parameters (or end milling) in the generation of residual stresses and in the quality of the machined surfaces of Class 3 ADI. The machining was carried out with a carbide tool, varying the parameters of machining. Residual stresses were evaluated by X-ray diffraction tensometry. The use of cutting fluid did not cause significant changes in the quality of machined surfaces. The results revealed the incidence of tensile and compressive stresses and an excellent surface quality of the machined samples.

KEYWORDS: ADI, MILLING, RESIDUAL STRESS, SURFACE ROUGHNESS

1. INTRODUÇÃO

A usinagem é um dos processos de fabricação mais difundido na indústria de manufatura, tendo como objetivo conferir às peças acabadas formato, dimensão e acabamento superficial. Este processo ocorre através da remoção de material da peça bruta por técnicas mecânicas, elétricas químicas e térmicas – sem a utilização de uma ferramenta de corte – ou ainda por meio da utilização de ferramenta de corte com geometria definida ou não-definida (Groover, 2017; Machado *et al.*, 2015).

O fresamento é um processo convencional de usinagem no qual utiliza-se de uma ferramenta com geometria definida, multicortante, denominada fresa. É classificado de acordo com a disposição da fresa em relação à peça usinada: fresamento frontal ou de topo, tangencial ou periférico. Por conta da sua versatilidade o fresamento é empregado mundialmente nas mais distintas classes de materiais e suas respectivas indústrias (Groover, 2017; Machado *et al.*, 2015).

O ferro fundido nodular (ou dúctil) é um material consolidado nas aplicações de engenharia por conta de suas propriedades mecânicas, com destaque para a ductilidade, tenacidade, resistência mecânica e amortecimento (Callister e Rethwisch 2016). Para que possamos melhorar suas propriedades mecânicas o ferro fundido nodular pode ser submetido a tratamentos térmicos (Kazemi *et al.*, 2014).

No caso do tratamento térmico de austêmpera, o material é aquecido a uma temperatura acima da zona crítica, e posteriormente o mesmo é resfriado em uma meio moderado onde ocorre a janela de processo sob condições isotérmicas, por fim é resfriado novamente até a temperatura ambiente. O tempo às respectivas temperaturas variam de acordo com a microestrutura que se deseja obter (Chiaverini, 2008).

O ferro fundido nodular austemperado (*austempered ductile iron* - ADI) apresenta-se como um material capaz de suprir as demandas da indústria moderna devido às suas propriedades mecânicas melhoradas (Benini, 2017). Este material é obtido quando se submete o ferro fundido nodular ao tratamento térmico de austêmpera, o que lhe confere um aumento significativo na resistência à tração, ductilidade, fadiga e ao desgaste (Wang, 2022). No entanto, seu emprego em projetos de engenharia é reduzido por conta de poucas informações acerca de sua usinagem e caracterização das superfícies usinadas, seja por ensaios não-destrutivos e destrutivos. Além disto, há escassez de informações sobre as tensões residuais geradas no processo de fresamento no ADI.

As tensões residuais (TR) são as que permanecem na peça após a retirada de carregamentos e/ou gradientes de temperaturas (Kajal *et al.*, 2023). As principais causas de surgimento das TR na usinagem advêm dos efeitos térmicos e mecânicos gerados durante a remoção de material da peça bruta (Chen *et al.*, 2022). O perfeito conhecimento das tensões residuais incidentes nos componentes pode anteceder falhas, visto que as mesmas podem se somar às tensões aplicadas ocasionando

efeitos deletérios quando as tensões residuais são trativas e benéficos quando são compressivas (James *et al.*, 2007). A técnica não-destrutiva de tensometria por difração de raios-X se apresenta como alternativa para mensurar nas direções transversais e longitudinais a magnitude e distribuição das tensões residuais nos componentes usinados (Gunes, 2022).

A superfície da peça final acabada é resultante dos processos de fabricação que envolvem vários fatores: ruptura, recuperação elástica, geração de calor, tensões residuais, deformações plásticas e vibrações. Por isso os desvios macro e micro geométricos devem ser estabelecidos pelos projetistas estabelecendo os intervalos de tolerâncias e a rugosidade superficial. Na indústria metal mecânica um dos instrumentos mais utilizados na medição da rugosidade superficial de peças usinadas é o rugosímetro, por conta de seu alto padrão de qualidade nas medições realizadas ele é capaz de analisar anomalias relacionadas com a qualidade das superfícies (Machado *et al.*, 2015).

1.1. JUSTIFICATIVA

O crescente emprego do ferro fundido nodular austemperado nas indústrias automotiva, agrícola, aeroespacial e construção civil faz com que este material comumente seja submetido a processos de usinagem distintos. No entanto, existem poucas informações sobre o estudo das tensões residuais após a usinagem do ADI. A furação do ADI foi objeto de estudo de Barbosa (2009). No fresamento, Lacalle *et al.* (2020) analisaram o desempenho de pastilhas cerâmicas no fresamento do ADI, enquanto que Eraslan *et al.* (2021) compararam o fresamento frontal do ADI com o do aço fundido G18NiMoCr3-6+QT1 (CS). Já Priarone *et al.* (2016) apresentaram uma discussão sobre a variação de insertos no fresamento do ADI. O torneamento desse material foi objeto de estudo de Katuku (2022) e Parhad *et al.* (2019). Apesar destes trabalhos envolvendo a usinagem do ADI, a caracterização da qualidade superficial combinada à avaliação das tensões residuais por meio de ensaios não-destrutivos ainda é uma lacuna. A escassez de estudos acerca deste tema está atrelada ao alto custo relativo do equipamento de tensometria por difração de raios-x e sua utilização comumente restrita em laboratórios.

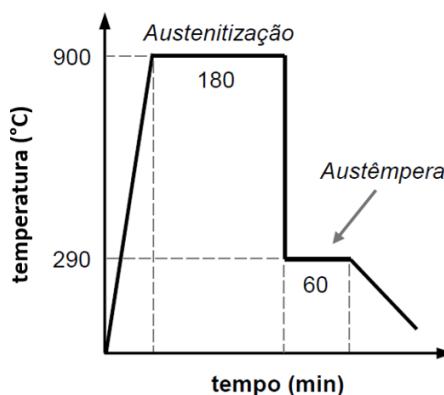
1.2. OBJETIVO

O objetivo deste trabalho é estudar a relação entre os parâmetros de corte utilizados no fresamento frontal na geração de tensões residuais e na qualidade das superfícies usinadas do ADI Classe 3.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

As amostras de ADI classe 3 utilizadas nesta pesquisa foram fornecidas pela empresa Tupy Fundição S. A., em formatos de tarugos cilíndricos, torneadas nas dimensões de Ø 90 mm x 250 mm. O processo de fabricação se deu por fundição contínua, seguida do tratamento térmico de austêmpera. A austenitização ocorreu em temperatura de 900 °C por 180 minutos, em seguida a austêmpera foi realizada na temperatura de 290 °C por 60 minutos em nitrato de potássio (KNO_3) e sal de nitrato de sódio ($NaNO_3$) derretidos, por fim o material foi resfriado novamente até a temperatura ambiente, estas foram as condições necessárias para se obter o ADI classe 3 de acordo com a norma ASTM A897 M-6. A Figura 1 apresenta o ciclo de austêmpera realizado e a Tabela 1 exibe as propriedades mecânicas. A composição química do ADI classe 3 é demonstrada na Tabela 2.

FIGURA 1. Ciclo do Tratamento Térmico de Austêmpera.



Fonte: Autor (2023)

TABELA 1. Propriedades Mecânicas do ADI – classe 3.

Resistência à tração (Mpa)	Tensão de escoamento (Mpa)	Alongamento (%)	Energia ao impacto (J)	Dureza (HB)
1200	850	4	60	341/444

Fonte: ASTM A897M - 06 (2011)

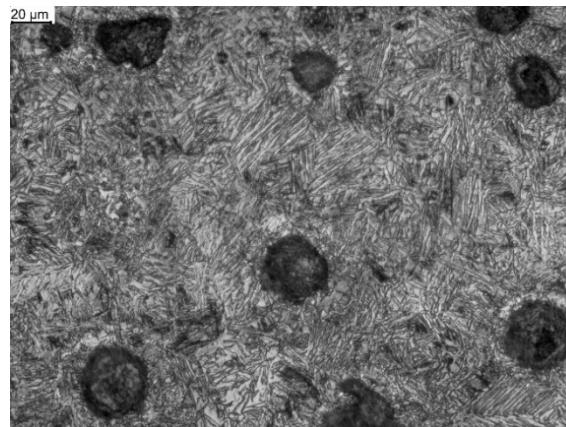
TABELA 2. Composição química do ADI – classe 3.

C	Mn	Si	Cr	Mo	Cu	Mg
%	3,1	0,2	2,3	0,03	0,3	0,7

Fonte: ASTM A897M – 06 (2011)

A análise metalográfica do ADI – classe 3 foi realizada com a utilização de um microscópio metalográfico invertido da marca Kontrol modelo IM720. A Figura 2 exibe a microestrutura do ferro fundido nodular austemperado obtida a utilização do reagente químico Nital 2%.

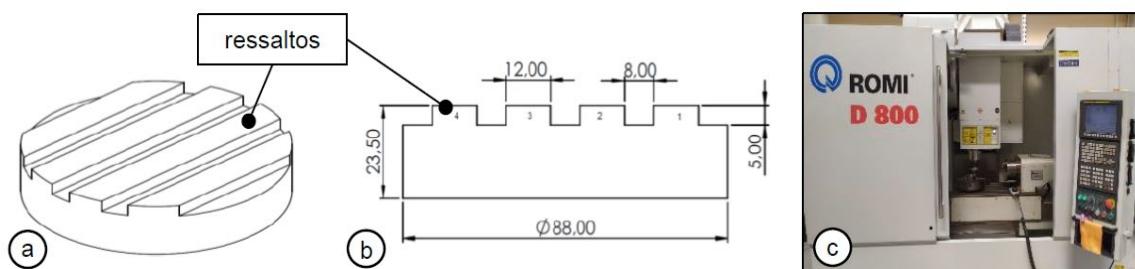
Figura 2. Microestrutura do ADI-classe 3.



Fonte: Autor (2023).

As amostras utilizadas na pesquisa foram preparadas por usinagem conforme geometria exibida na Figura 3. O fresamento frontal nos quatro ressaltos, de cada uma das amostras, foi realizado com uma fresa de topo inteiriça de metal duro, contendo 4 cortes, diâmetro de 10 mm, sem revestimento, modelo S904 e ângulo de hélice de 30°. A usinagem ocorreu em um Centro de Usinagem da marca ROMI, modelo D800, CNC – Comando Fanuc Series Oi-MC, conforme apresentado na Figura 3.

Figura 3. (a) Vista isométrica (b) Geometria das amostras preparadas, cotas em milímetros (c) Centro de Usinagem ROMI D800.



Fonte: Autor (2023).

Com o intuito de avaliar a influência dos parâmetros e condições de corte, na qualidade das superfícies e na geração de tensões residuais nas amostras de ADI classe 3, a utilização de fluido lubrificante-refrigerante (óleo solúvel biodegradável HYDRIA-EP diluído em 1:10), a velocidade de corte (v_c) e a profundidade de corte (a_p) foram variadas em dois níveis, mantendo-se constante em todos os

ensaios o avanço por dente $f_z = 0,05$ mm/dente e a penetração de trabalho (a_e) de 60%. Uma análise factorial completa de dois níveis de 3 parâmetros foi efetuada, considerando duas réplicas de cada condição ensaiada, conforme mostra a Tabela 3.

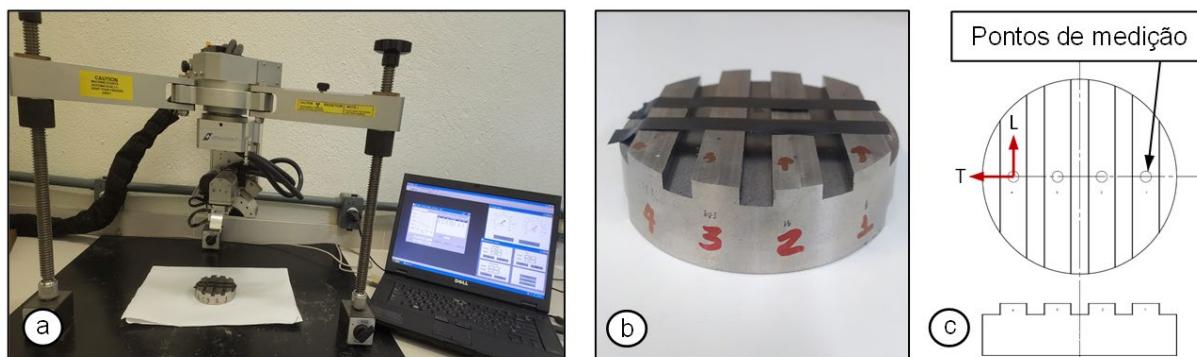
Tabela 3. Condições de fresamento.

Ressalto	a_p (mm)	v_c (mm)	Fluido de corte
A1	0,37	120	Jorro
A2	1	120	Jorro
A3	0,37	160	Jorro
A4	1	160	Jorro
B1	0,37	120	A seco
B2	1	120	A seco
B3	0,37	160	A seco
B4	1	160	A seco

Fonte: Autor (2023).

As tensões residuais (TR) foram mensuradas nos quatro ressaltos usinados das duas amostras (A e B) nas direções L e T, longitudinal e transversal, respectivamente por difração de raios-X, pelo método de $\sin^2\psi$, utilizando o analisador de tensões XStress3000, do fabricante Stresstec, disponibilizado pelo Laboratório de Análise de Tensões LAT/UFF. A localização dos ensaios se deu centralizada aos ressaltos. A Figura 4 mostra o ensaio de Tensometria por difração de raios-x, ressaltos mensurados e a localização dos ensaios realizados.

Figura 4. Tensometria por difração de raios-x: (a) equipamento utilizado; (b) amostra; (c) direção e localização dos pontos de medição.



Fonte: Autor (2023).

A qualidade do acabamento superficial dos 4 (quatro) ressaltos de cada amostra e suas respectivas réplicas usinadas por fresamento frontal foi mensurada considerando os parâmetros de

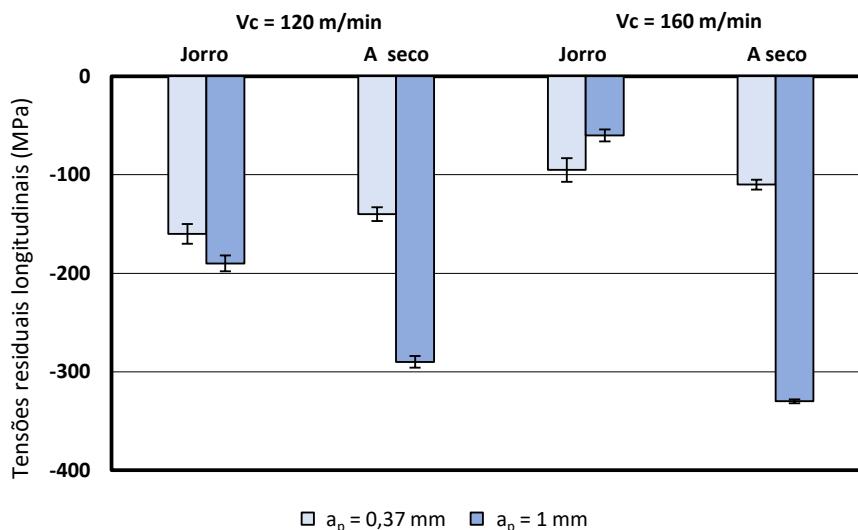
rugosidade R_a e R_z . Neste ensaio utilizou-se um rugosímetro Taylor Hobson Surtronic S25, empregando-se um comprimento de medição $L = 4,00$ mm e um comprimento de amostragem (*cut-off*) $L_c = 0,80$ mm. Foram realizadas 6 (seis) medições de rugosidade em cada um dos ressaltos fresados, no sentido longitudinal (L). O resultado final das medições de cada ressalto se deu por meio da média aritmética entre os valores obtidos.

3. RESULTADOS

3.1. TENSÃO RESIDUAL

A Figura 6 e a Figura 7 apresentam os resultados obtidos nas medições das tensões residuais pelo método de difração de raios-X, de acordo com as respectivas direções longitudinal (L) e transversal (T), em cada um dos ressaltos fresados. A partir da análise das Figuras 6 e 7 é possível verificar que todas as tensões residuais mensuradas na direção longitudinal (L) foram compressivas, entretanto na direção transversal (T) todas as tensões residuais mensuradas foram tratativas. Ma *et al.* (2016) afirmam em sua pesquisa que para cada tipo de tensão residual gerada após a usinagem ocorre a hipótese de prevalência de efeitos térmicos ou mecânicos, de acordo com os parâmetros e condições de cortes adotados nos ensaios de usinagem. Nas tensões residuais tratativas a predominância é de efeitos térmicos, enquanto que nas TR compressivas ocorre uma sobreposição dos efeitos mecânicos. Neste caso, há indícios de que os efeitos mecânicos oriundos da usinagem do ADI prevaleceram na direção longitudinal, uma vez que todas as tensões residuais mensuradas foram compressivas. Já na direção transversal há indícios de que houve a predominância dos efeitos térmicos.

Figura 6. Influência dos parâmetros de corte nas tensões residuais longitudinais.



Fonte: Autor (2023).

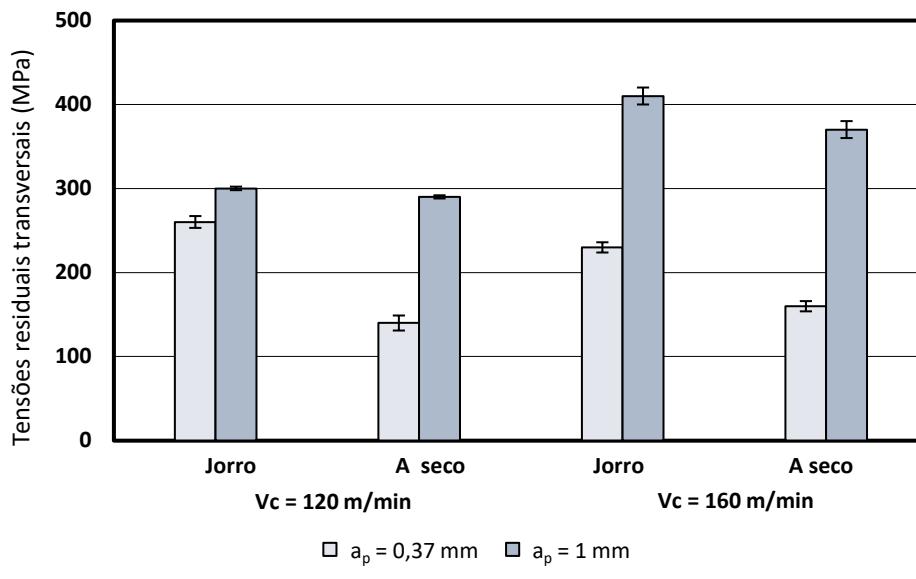
Verifica-se na Figura 6 que o aumento da velocidade de corte fez com que ocorresse um decréscimo na magnitude das tensões residuais de compressão na maioria das medições realizadas. Harter e Grijalba (2013) também obtiveram resultado semelhante quando estudaram o uso de ensaios não destrutivos para avaliação de tensões residuais oriundas da usinagem por fresamento do aço H13. Nota-se na Figura 7 que o aumento da velocidade de corte também foi o principal fator responsável por gerar TR mais tratativas, corroborando com os resultados de Jang *et al.* (1996) que mensuraram as TR variando experimentalmente os parâmetros de velocidade de corte, profundidade de corte e avanço na usinagem do aço inoxidável 304. . Entretanto estes resultados se opuseram aos encontrados no trabalho de Outeiro *et al.* (2002) onde as TR diminuíram aproximadamente 150 MPa quando a velocidade de corte foi aumentada em aproximadamente 66%; e à pesquisa de Quintas *et al.* (2018), em que o aumento da velocidade de corte tendeu a gerar tensões residuais mais compressivas após a o fresamento de topo do aço AISI 4340. De acordo com Brown *et al.* (2018) o aumento da velocidade de corte nos processos de usinagem tende a gerar uma maior taxa de deformação nas zonas de cisalhamento, ocasionando um aumento considerado da taxa de trabalho mecânico que proporciona maiores gradientes de temperatura na superfície da peça usinada culminando na geração de tensões residuais tratativas deste efeito térmico.

O aumento da profundidade de corte se mostrou mais significativo na geração de TR em ambas direções mensuradas quando adotado parâmetros mais elevados de velocidade de corte, evidenciando que quanto mais severo for o processo de usinagem o aumento do parâmetro a_p tenderá a gerar TR mais tratativas e menos compressivas, respectivamente. Mendonça (2016) obteve estes mesmos resultados ao estudar a influência da variação de parâmetros de corte na integridade da superfície do aço SAE 4340, quando usinado por fresamento de topo, usando ferramentas de metal duro. Segundo Sadeghifar *et al.* (2023), este efeito pode estar atrelado ao conceito de que ao aumentar a profundidade de corte ocorre uma maior taxa de remoção de material por passe, aumentando a área de contato podendo causar um atrito maior na interface ferramenta – peça – cavaco o que eleva as temperaturas de corte e, por consequência, a geração de tensões residuais tratativas.

A Figura 7 apresenta os resultados de tensões residuais obtidos por tensometria por difração de raios -X na direção transversal dos ressaltos fresados. Como pode ser observado nesta figura, o uso do fluido lubri-refrigerante foi a condição que menos exerceu influência significativa na maioria das tensões residuais mensuradas em ambas direções. Este fenômeno está de acordo com os resultados da pesquisa elaborada por Leppert e Peng (2012), sugerindo que na usinagem a seco é possível conseguir TR menores ou comparáveis à usinagem com o uso do fluido lubri-refrigerante, quando adotados parâmetros de corte otimizados, tornando o processo ecológico e economicamente correto. Para Outeiro *et al.* (2002) uma justificativa para este fenômeno é que na usinagem a seco ocorre um aumento da temperatura de corte na zona de formação do cavaco o que

pode ocasionar uma queda de dureza localizada nesta região e, eventualmente, uma diminuição das forças de corte culminando na diminuição das tensões residuais geradas.

Figura 7. Influência dos parâmetros de corte nas tensões residuais transversais.



Fonte: Autor (2023).

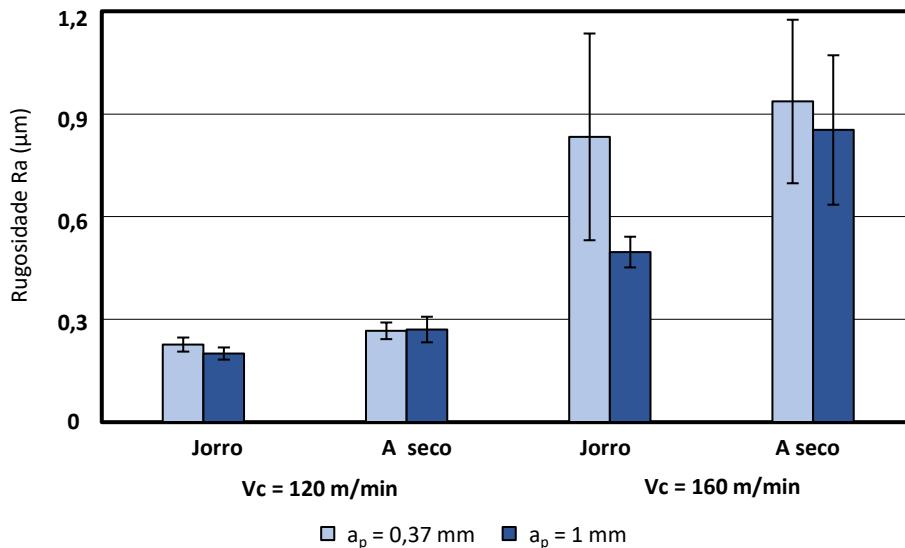
Considerando os resultados obtidos nas medições de tensões residuais após o fresamento do ADI – classe 3, sob as condições e parâmetros de corte adotados no presente trabalho, e comparando-as aos resultados do trabalho de Strodick *et al.* (2022), destaca-se que a seleção dos parâmetros de corte tem grande influência na geração de tensões residuais. As informações acerca da seleção de parâmetros de corte que mais influenciam na geração de tensões residuais devem ser observadas nos projetos de engenharia, de acordo com Martell *et al.* (2014) e Masmiani *et al.* (2016), as TR tratativas promovem efeitos deletérios pois as mesmas podem se somar às tensões do carregamento aplicado, levando-os a falha prematuras e/ou distorções geométricas inesperadas, quando em serviço, contudo, na existência de tensões residuais compressivas pode ocasionar um aumento considerado na vida útil do componente em serviço, principalmente por fadiga, configurando um caso de efeitos benéficos.

3.2. RUGOSIDADE SUPERFICIAL

A Figura 8 exibe os resultados das rugosidades médias Ra. Observa-se que a utilização do fluido lubri-refrigerante não exerceu influência significativa nos valores de rugosidade Ra em todos ensaios efetuados, quando considerado o desvio padrão, corroborando com os resultados da pesquisa apresentada por Oliveira (2006). O mesmo efeito se deu na variação da profundidade de corte, pois em todos os ensaios não houve alterações significativas nos valores de rugosidade quando

a profundidade de corte (a_p) foi variada. Entretanto, o aumento da velocidade de corte para $v_c = 160$ m/min ocasionou o aumento dos valores de Ra.

Figura 8. Influência dos parâmetros de corte nos valores de rugosidade Ra.



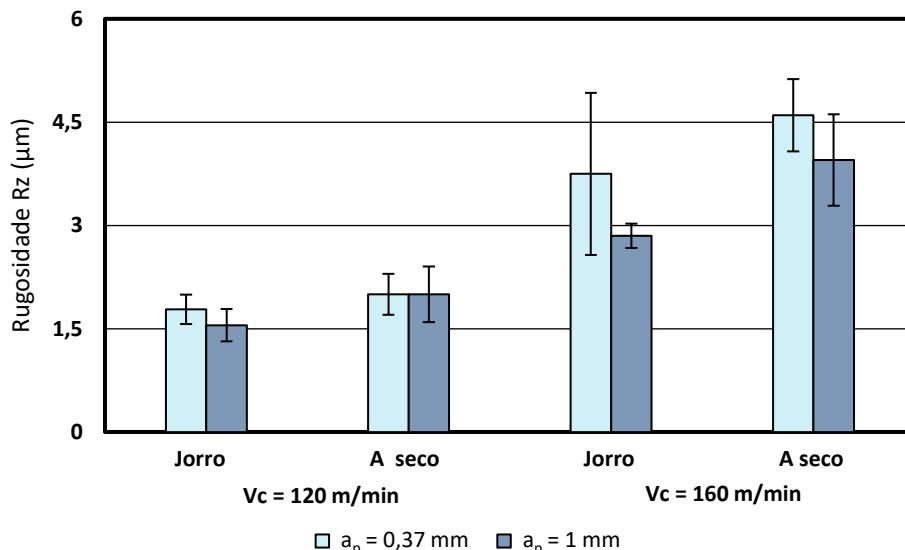
Fonte: Autor (2023).

Na Figura 9 são apresentados os resultados da rugosidade Rz. Observa-se que os resultados mantiveram o mesmo comportamento das medições de rugosidade Ra (Figura 8), pois não houve alterações significativas no acabamento das superfícies, considerando os valores obtidos em Rz. Observa-se que o uso do fluido de corte não influenciou os resultados de rugosidade Rz, assim como o aumento de 0,37 para 1 mm. Contudo, o aumento da velocidade de corte se mostrou um fator relevante nos valores de rugosidade Rz.

Comparando a Figura 8 com a Figura 9, observa-se que o aumento da velocidade de corte foi o parâmetro que mais influenciou os resultados de rugosidade, piorando a qualidade das superfícies usinadas. Esta situação pode estar atrelada a vibrações geradas durante o processo de fresamento e ao desgaste das ferramentas de corte em virtude do aumento da velocidade de corte. É bem estabelecido que a rugosidade de uma superfície usinada é diretamente relacionada com as vibrações das ferramentas de corte (Polishetty *et al.*, 2008; Bonifácio e Diniz, 1994; Eralslam, 2021).

De acordo com Akdemir *et al.* (2012), o conjunto peça-ferramenta-máquina-ferramenta é um sistema flexível, sendo que durante o processo de usinagem podem surgir vibrações decorrentes da variabilidade da força de corte. Estas vibrações podem causar uma piora nos resultados de acabamento. Além disso, Guesser (2009) destaca que a velocidade de corte para o ADI deve ser reduzida, pois velocidades de corte maiores tem um efeito no desgaste da ferramenta, que também pode contribuir para uma pior qualidade superficial.

Figura 9. Influência dos parâmetros de corte nos valores de rugosidade Rz.



Fonte: Autor (2023).

De acordo com ANSI/ASME B46.1–2009 os valores de rugosidade Ra normalmente conseguidos para processos usinagem por fresamento estão compreendidos entre 0,8 e 12,5 µm. Nas condições de ensaio de $v_c = 120$ m/min, os resultados de rugosidade Ra se apresentaram abaixo deste intervalo estabelecido pela norma. Este resultado é bastante almejado, principalmente na indústria de fabricação, nas quais demandam altíssimo grau de qualidade da superfície, pois para se alcançar esse nível de acabamento superficial – valores de Ra compreendidos entre 0,2 e 0,5 µm – muitas vezes é necessário submeter a peça fresada a processos subsequentes de usinagem de acabamento, comumente a retificação.

Na maioria dos ensaios com $v_c = 160$ m/min os resultados obtidos de rugosidade Ra se apresentaram muito próximo ao limite inferior do intervalo realizável em fresamento estabelecido por norma, o que confere às amostras uma excelente qualidade das superfícies fresadas, entretanto inferiores aos conseguidos com a velocidade de corte mais baixa.

4. CONCLUSÕES

Este trabalho teve como objetivo estudar a relação entre os parâmetros de corte utilizados no fresamento frontal na geração de tensões residuais e na qualidade das superfícies usinadas do ADI Classe 3. Com os resultados alcançados, conclui-se:

- As tensões residuais mensuradas após a usinagem do ADI-classe 3 obtiveram naturezas distintas, visto que a incidências das mesmas se apresentaram trativas e compressivas no material fresado na direção transversal e longitudinal, respectivamente;

- A variação da velocidade de corte foi o parâmetro que mais contribuiu para as alterações nas tensões residuais e na qualidade das superfícies usinadas, visto que o seu aumento culminou em TR mais trativas na direção transversal e menos compressivas na direção longitudinal e ainda foi diretamente proporcional ao aumento da rugosidade considerando os parâmetros Ra e Rz;
- O aumento da profundidade de corte tendeu a gerar tensões residuais mais trativas na direção transversal e mais compressivas na direção longitudinal. No entanto a variação da profundidade de corte não influenciou significativamente na qualidade das superfícies usinadas;
- As variações da profundidade de corte, velocidade de corte e utilização do fluido lubrificante-refrigerante nos experimentos não ocasionaram alterações significativas que inviabilizassem a utilização dos componentes fresados no que diz respeito à qualidade das superfícies usinadas. Destaca-se que quando adotada a velocidade de corte de 120 m/min, se obteve melhores resultados de rugosidade superficial.

REFERÊNCIAS

AKDEMIR, A.; YAZMAN, S.; SAGLAM, H.; UYANER, M. The Effects of Cutting Speed and Depth of Cut on Machinability Characteristics of Austempered Ductile Iron. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, v. 134(2), 2012.

AMERICAN SOCIETY OF MECHANICAL ENGINEERS. ANSI/ASME, 2010. ANSI/ASME B46.1-2009. Surface texture: surface roughness, waviness and lay. New York, 2009.

ASTM A897M - 06: Standard Specification for Austempered Ductile Iron Castings, v. 01-02, 2011.

BARBOSA, P. A. Furação de ferros fundidos austemperados e nodular perlítico. Dissertação em Engenharia Mecânica (Materiais e Processos de Fabricação) – Universidade Federal de Uberlândia, 124 p., 2009.

BENINI, L. Influência do teor de grãos microcristalinos de Al_2O_3 em reboços convencionais na retificação de ADI. Tese em Engenharia Mecânica – Universidade Federal de Santa Catarina, 176 p., 2017.

BONIFACIO, M. E. R.; DINIZ, A. E. Correlating tool wear, tool life, surface roughness and tool vibration in finish turning with coated carbide tools. *Wear*, v. 173(1–2), p. 137-144, 1994.

BROWN, M.; WRIGHTB, D.; M'SAOUBIC, R.; MCGOURLAYD, J.; WALLISE, M.; MANTLEF, A.; CRAWFORTHG, P.; GHADBEIGI, H. Destructive and non-destructive testing methods for characterization and detection of machining-induced white layer: A review paper. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, Vol. 23, p.39-53, 2018.

CALLISTER, D.; RETHWISCH, D. Ciência e engenharia de materiais: uma introdução / tradução Sergio Murilo Stamile Soares.- 9. ed. - Rio de Janeiro: LTC, 2016.

CHEN, Z.; QIAN, L.; CUI, R.; LIU, J.; ZHANG, Q. Machining-induced residual stress analysis and multi-objective optimization for milling process of Mg–Li alloy. *Measurement*. v. 204, p. 112-127, 2022.

CHIAVERINNI, V. Aços e ferros fundidos. 550 p. 7 ed. Livros ABM. 2008.

ERASLAN, D.; BALCI, A.; ÇETIN, B.; UÇAK, N.; ÇIÇEK, A.; YILMAZ, O.; DAVUT, K. Machinability evaluations of austempered ductile iron and cast steel with similar mechanical properties under eco-friendly milling conditions. *Journal of Materials Research and Technology*, v.11, p. 1443-1456, 2021.

GROOVER, M. P. Fundamentos da Moderna Manufatura. Vol. 2. GEN: LTC, 5ºedição, 2017.

GUESSER, W. L. Propriedades mecânicas dos ferros fundidos. 344p. 1 ed. São Paulo, Brasil, Artiber, 344 p., 2009.

GUNES, B.; KARATOSUN, S.; GUNES, O. Drilling resistance testing combined with SonReb methods for nondestructive estimation of concrete strength. *Construction and Building Materials*, v. 362, 2023.

HATER, I. I.; GRIJALBA, F.F. Utilização do ruído magnético de Barkhausen no estudo da influência de parâmetros de fresamento no aço H13. *7º Congresso Brasileiro De Engenharia De Fabricação – Penedo, Itatiaia, Rio de Janeiro, Brasil*, 2013.

JAMES, M.N.; HUGHES, D.J.; CHEN, Z.; LOMBARD, H.; HATTINGH, D.G.; ASQUITH, D.; YATES, J. R.; WEBSTER, P. J. Residual stresses and fatigue performance. *Engineering Failure Analysis*. v. 14, p. 384-395, 2007.

JANG, D.Y.; WATKINS, T.R.; KOZACZEK, K.J.; HUBBARD, C.R.; CAVIN, O.B. Surface residual stresses in machined austenitic stainless steel. *Wear*, Vol. 194, p. 168-173, 1996.

KAJAL, G.; TYAGI, M.R.; KUMAR, G. A review on the effect of residual stresses in incremental sheet metal forming used in automotive and medical sectors. *Materials Today: Proceedings*, v. 78, Part 3, p. 524-534, 2023.

KATUKU, K. Regime features of austempered ductile iron cutting. *Journal of Manufacturing Processes*, v. 83, p. 374-386, 2022.

KAZEMI, M.; KIANI-RASHID, A. R.; NOURIAN A.; BABAKHANI A. Investigation of microstructural and mechanical properties of austempered steel bar-reinforced ductile cast iron composite. *Materials and Design*, v. 53, p. 1047-1051, 2014.

LACALLE, L.; VALDIVIELSO, L; AMIGO, A.; SASTOQUE, F. Milling with ceramic inserts of austempered ductile iron (ADI): process conditions and performance. *Int J Adv Manuf Technol*, v.110, p. 899–907, 2020.

LEPPERT, T.; PENG, R. L. Residual stresses in surface layer after dry and MQL turning of AISI 316L steel. *Prod. Eng. Res. Devel.* Vol. 6, p. 367–374, 2012.

Ma, Y.; Feng, P.; Zhang, J.; Wu, Z.; Yu, D. Prediction of surface residual stress after end milling based on cutting force and temperature. *Journal of Materials Processing Technology*, v. 235, p. 41-48, 2016.

MACHADO, A. R.; ABRÃO, A. M.; COELHO, R. T.; SILVA, N. B. Teoria da Usinagem dos Materiais. 3^a ed., São Paulo: Edgard Blucher, 2015.

MARTELL, J. J.; LIU, C. R.; SHI, J. Experimental investigation on variation of machined residual stresses by turning and grinding of hardened AISI 1053 steel. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, v. 74, p. 1381–1392, 2014.

MASMIATI, N.; SARHAN, A.; HASSAN, M.; HAMDI, M. Optimization of cutting conditions for minimum residual stress, cutting force and surface roughness in end milling of S50C medium carbon steel, *Measurement*, v. 86, p. 253-265, 2016.

MENDONÇA, L. B. Influência dos Parâmetros de Corte nas Tensões Residuais Geradas no Fresamento do Aço SAE 4340. Projeto final – Centro Federal De Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca – CEFET/RJ, 37 p., 2016.

OLIVEIRA, J. M. Caracterização da integridade de superfícies usinadas para produção de moldes e matrizes. Dissertação em Materiais – Universidade de Caxias do Sul, 92 p., 2006.

OUTEIRO, J. C.; DIAS, A. M.; LEBRUN, J. L.; ASTAKHOV, V. P. Machining residual stresses in AISI 316L steel and their correlation with the cutting parameters. *Machining Science and Technology*, Vol. 6:2, p. 251-270, 2002.

PARHAD, P.; DAKRE, V.; LIKHITE, A.; BHATT, J. The impact of cutting speed and depth of cut on cutting force during turning of austempered ductile iron. *Materials Today: Proceedings*, v. 19, Part 2, p. 663-669, 2019.

POLISHETTY, A.; SINGAMNENI, S.; LITTLEFAIR, G. A comparative assessment of austempered ductile iron as a substitute in weight reduction applications. *Proceedings of the ASME 2008 international manufacturing science and engineering conference (MSEC2008)*, Evanston, United States of America, 2008.

PRIARONE, P. C.; ROBIGLIO, M.; SETTINERI, L. Fresamento de ferro dúctil austemperado (ADI) com ferramentas de metal duro reciclado. *Int J Adv Manuf Technol*, Vol. 82, p. 501–507, 2016.

QUINTAS, T. S.; SOUZA, M. R.; MARTINS, NORIS, L. F.; FONSECA, M. C. Estudo das tensões residuais geradas no fresamento de topo do AISI 4340. *XXI ENMC – Encontro Nacional de Modelagem Computacional e IX ECTM Encontro de Ciência e Tecnologia de Materiais*. Búzios, Rio de Janeiro, Brasil, 2018.

SADEGHIFAR, M.; JAVIDIKA, M.; LOUCIF, A.; JAHAZI, M.; SONGMENE, V. Experimental and numerical analyses of residual stress redistributions in large steel dies: Influence of tempering cycles and rough milling. *Journal of Materials Research and Technology*, Vol. 24, p. 395-406, 2023.

STRODICK, S.; SCHMIDT, R.; BIERMANN, D.; ZABEL, A.; WALTHER, F. Influence of the cutting edge on the surface integrity in BTA deep hole drilling - part 2: Residual stress, microstructure and microhardness, *Procedia CIRP*, Vol. 108, p. 276-281, 2022.

WANG, X.; Yuzhou Du, Y.; Liu, C.; Hu, Z.; Li, P.; Gao, Z.; Guo, H.; Jiang, B. Relationship among process parameters, microstructure, and mechanical properties of austempered ductile iron (ADI). *Materials Science and Engineering: A*, v. 857, ISSN 0921-5093, 2022.

DECLARAÇÃO DE RESPONSABILIDADE

Os autores são os únicos responsáveis por este trabalho.