

Evaluation of surface roughness in face milling of austempered ductile iron (ADI)

Avaliação da rugosidade superficial no fresamento frontal do ferro fundido nodular austemperado (ADI)

Article Info:

Article history: Received 2023-07-13 / Accepted 2023-12-20 / Available online 2024-01-05

doi: 10.18540/jcecv110iss1pp17790



Pedro Paulo Rosa de Paula

ORCID: <https://orcid.org/0009-0002-2188-5736>

Programa de Pós-Graduação em Montagem Industrial, Departamento de Engenharia Mecânica,
Universidade Federal Fluminense, Brasil

E-mail: pedroprp@id.uff.br

Lucas Benini

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5850-1399>

Programa de Pós-Graduação em Montagem Industrial, Departamento de Engenharia Mecânica,
Universidade Federal Fluminense, Brasil

E-mail: lucasbenini@id.uff.br

José Mauro Moraes Junior

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0355-2682>

Programa de Pós-Graduação em Montagem Industrial, Departamento de Engenharia Mecânica,
Universidade Federal Fluminense, Brasil

E-mail: josemoraes@id.uff.br

Sérgio Souto Maior Tavares

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1698-8634>

Programa de Pós-Graduação em Montagem Industrial, Departamento de Engenharia Mecânica,
Universidade Federal Fluminense, Brasil

E-mail: smtavares@id.uff.br

Resumo

O emprego do ferro fundido nodular austemperado (*austempered ductile iron* – ADI) em projetos de engenharia tem ganhado notoriedade por conta das suas propriedades mecânicas como alta resistência e dureza aliada a alta ductilidade. A ascensão da utilização deste material nas indústrias de construção civil, mineração, automotiva, agrícola e ferroviária fez crescer a demanda por estudos mais elaborados quanto a usinagem deste material. No fresamento frontal (ou de topo) do ADI, os efeitos térmicos e mecânicos que ocorrem durante a usinagem podem causar alterações da qualidade das superfícies usinadas e na sua dureza. Este trabalho tem por objetivo estudar a relação entre os parâmetros de corte utilizados no fresamento frontal na qualidade das superfícies usinadas do ADI. Os ensaios de fresamento empregaram uma ferramenta de metal-duro e variou-se a velocidade de corte, a profundidade de corte e uso ou não fluido lubri-refrigerante. Posteriormente foram mensurados os parâmetros de rugosidade R_a e R_z para cada condição avaliada. A avaliação da dureza Vickers das amostras usinadas complementaram o estudo. Considerando todas as condições de usinagem avaliadas neste trabalho, todos resultados de rugosidade R_a ficaram abaixo de $1,2 \mu\text{m}$ e todos os resultados de rugosidade R_z ficaram abaixo de $5 \mu\text{m}$, indicando um excelente acabamento superficial do ADI.

Palavras-chave: ADI. Fresamento. Rugosidade. Dureza.

Abstract

The use of austempered nodular cast iron (austempered ductile iron – ADI) in engineering projects has gained notoriety due to its mechanical properties such as high strength and hardness combined with high ductility. The rise in the use of this material in the civil construction, mining, automotive, agricultural and railway industries has increased the demand for more elaborate studies regarding the machining of this material. In the front (or top) cooling of the ADI, the thermal and mechanical effects that occur during machining can cause changes in the quality of the machined surfaces and their hardness. This work aims to study the relationship between the cutting parameters used in face milling and the quality of ADI machined surfaces. The milling tests used a carbide tool and the cutting speed, cutting depth and use or not of lubricant-coolant fluid were varied. Subsequently, the roughness parameters Ra and Rz were measured for each condition evaluated. The evaluation of the Vickers hardness of the machined samples complemented the study. Considering all the machining conditions evaluated in this work, all Ra roughness results were below 1.2 μm and all Rz roughness results were below 5 μm , presenting an excellent surface finish of the ADI.

Keywords: ADI. Milling. Roughness. Hardness.

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 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.

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 (Rossi, 2008; Machado *et al.*, 2015). A qualidade de uma superfície é, em geral, classificada em termos do parâmetro de rugosidade, cujos valores são expressos pela profundidade média Ra, pela profundidade de rugosidade Rt e pelos parâmetros da média da profundidade Rz combinada com a profundidade máxima R_{máx} (Mesquita, 1992). Os ensaios de dureza Vickers são consolidados nos laboratórios da indústria metal mecânica devido à simplicidade operacional e de medição das

diagonais da indentação prismática na superfície da peça ensaiada, seja pelo próprio durômetro ou via microscópio. Este tipo de ensaio é caracterizado como semi-destrutivo, pois deixa uma impressão de baixo relevo na superfície das peças que podem inviabilizar ou não a utilização do componente após o ensaio (Li e Yin, 2021).

O advento do emprego do ADI em projetos de engenharia faz com que este material comumente seja submetido a processos distintos de usinagem. Apesar disso, há ainda poucos trabalhos que avaliam a usinagem do ADI. Em relação ao fresamento, Lacalle *et al.* (2020) analisaram o desgaste de insertos cerâmicos no fresamento do ADI. Uma avaliação do desgaste de flanco nos insertos e das forças de usinagem no fresamento do ADI foi efetuado por Priarone *et al.* (2015). Já Eraslan *et al.* (2021) investigaram a usinabilidade no fresamento de topo do ADI comparando com o aço fundido G18NiMoCr3-6+QT1 (CS). Sinlah *et al.* (2016) avaliaram a vida da ferramenta e tempo de corte no fresamento do ADI.

Apesar destes trabalhos, informações acerca do acabamento superficial do ADI decorrentes de processos de usinagem são escassas. Deste modo, o objetivo deste trabalho é avaliar a influência das condições de usinagem na rugosidade superficial geradas pelo fresamento frontal 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 $\varnothing 90$ 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 min 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.

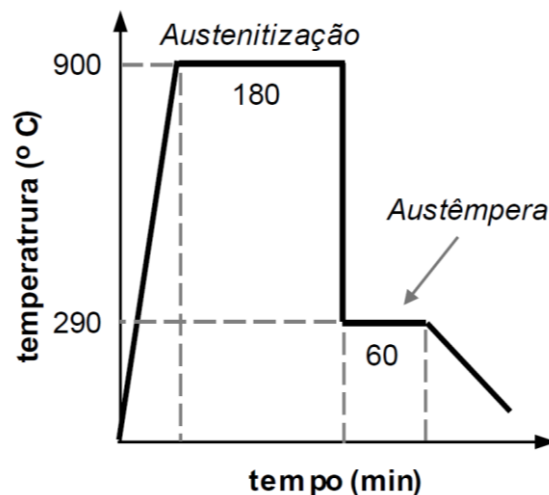


Figura 1 – Ciclo de tratamento térmico de austêmpera.

Na Tabela 1 é demonstrada a composição química do ADI classe 3 como recebido, enquanto que a microestrutura das amostras desse material, obtida por metalografia realizada no Laboratório de Materiais e Soldagem (MES/UFV), é exibida na Figura 2. O reagente químico utilizado para revelação da microestrutura do ADI classe 3 foi o nital 2%.

Tabela 1 – 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	0,04
---	-----	-----	-----	------	-----	-----	------

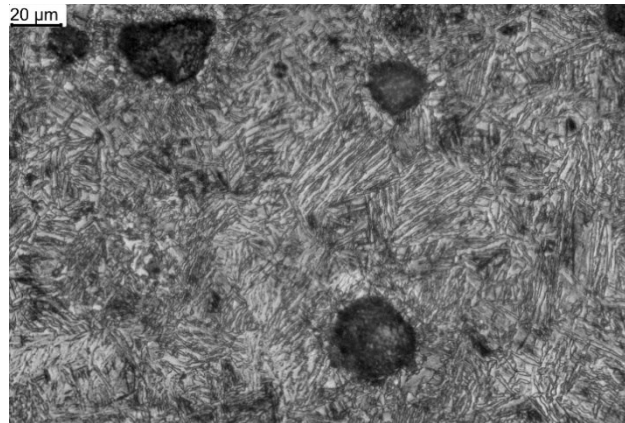


Figura 2 – Microestrutura do ADI classe 3 como recebido.

As amostras utilizadas na pesquisa foram preparadas por usinagem conforme geometria exibida na Figura 3 (a) e (b). 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 por fresamento frontal foi realizada no Laboratório de Manufatura (MAN/UFV) em um Centro de Usinagem da marca ROMI, modelo D800, CNC – Comando Fanuc Series Oi-MC, conforme apresentado na Figura 3 (c).

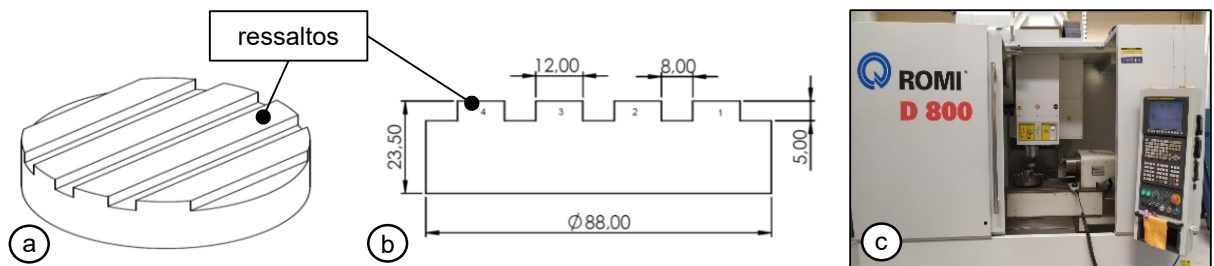


Figura 3 – Ensaio de fresamento: (a) Vista isométrica das amostras (b) Geometria das amostras preparadas em milímetros (c) Centro de Usinagem ROMI D800.

Com o intuito de avaliar a influência dos parâmetros e condições de corte, na qualidade das superfícies e variação de dureza nas amostras de ADI classe 3, a utilização de fluido lubrificante (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 fatorial completa de dois níveis de 3 parâmetros foi efetuada, considerando duas réplicas de cada condição ensaiada, conforme mostra a Tabela 2.

A qualidade do acabamento superficial dos ressaltos fresados foi mensurada com a utilização de um rugosímetro Taylor Hobson Surtronic S25, pertencente ao Laboratório de Metrologia Dimensional e Computacional (LMDC/UFF). Neste trabalho foram considerados os parâmetros de rugosidade R_a e R_z . Para a realização deste ensaio foi empregando um comprimento de medição $L = 4,00$ mm e um comprimento de amostragem (*cut-off*) $L_c = 0,80$ mm. Em todos os 4 (quatro) ressaltos fresados das amostras e suas respectivas réplicas – Figura 4 (a) foram realizadas 6 (seis) medições de rugosidades, limitando-se à área de 1 a 6, conforme Figura 4 (b).

Tabela 2 - Condições de corte empregadas nos experimentos.

Ressalto	a_p (mm)	v_c (m/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

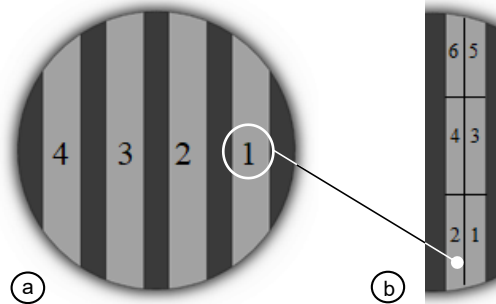


Figura 4 – Esquemática da medição da rugosidade: (a) Recessos fresados (b) delimitação das áreas analisadas nos recessos.

Após a execução dos ensaios de rugosidade superficial, os recessos fresados e suas réplicas e ainda uma amostra não usinada foram submetidos a ensaios de dureza Vickers no Laboratório de Ensaios Mecânicos da UFF, utilizando-se um durômetro Brinell Vickers Heckert – Modelo HPO-250, fabricado pela empresa WMP. Para este ensaio foi empregado uma carga de 15 kgf (HV15), durante 25 s e o resultado final de dureza de cada ressalto ensaiado se deu por média aritmética obtida entre os 5 (cinco) valores mensurados em cada ressalto. A amostra não usinada apresentou uma dureza de 349 HV.

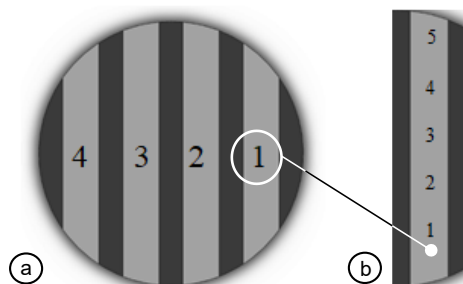


Figura 5 – Esquemática da medição da dureza: (a) Recessos ensaiados; (b) disposição dos ensaios de dureza nos recessos.

3. Resultados

Os valores de rugosidade R_a são apresentados na Figura 6. A partir da análise desta figura é possível destacar que a utilização do fluido lubri-refrigerante não exerceu influência significativa nos ensaios realizados. Este efeito pode estar relacionado à presença de nódulos de grafita na microestrutura do ADI. A grafita pode atuar como lubrificante e dissipador de calor durante o seu processo de usinagem desse material (Eraslam *et al.*, 2021; Polishetty *et al.*, 2008). Resultado semelhante foi obtido na pesquisa realizada por Oliveira (2006), que estudou o processo convencional de fabricação de moldes e matrizes por usinagem. Além disso, os resultados obtidos na pesquisa de Guessier (2009) que fresou amostras de ADI, evidenciou que as ferramentas de metal duro são sensíveis às variações drásticas de temperaturas que ocorrem com a aplicação de fluido

lubri-refrigerante durante a usinagem desse material, tendendo a geração e propagação de trincas em situações de fadiga térmica, culminando na redução da vida útil do ferramental utilizado.

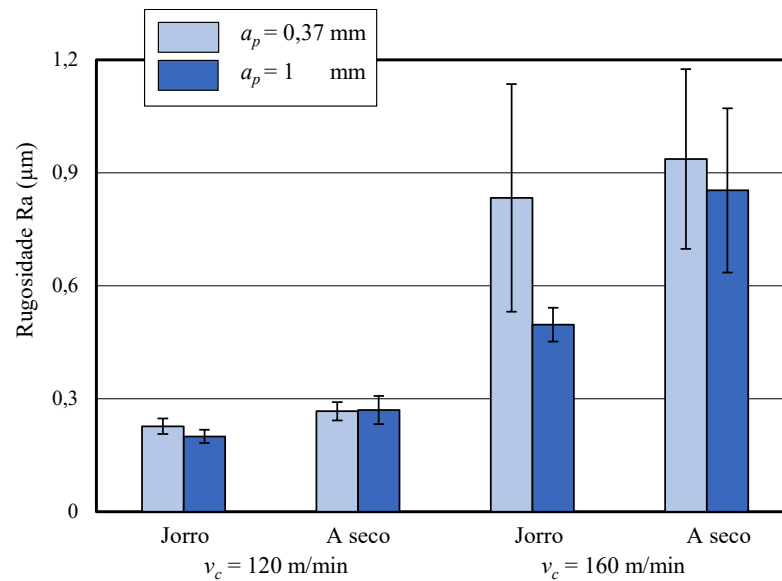


Figura 6 – Influência dos parâmetros de corte nos valores de rugosidade Ra.

Entretanto, a utilização do fluido lubri-refrigerante foi a condição que mais influenciou a qualidade das superfícies usinadas, melhorando-as de acordo com as análises estatísticas dos resultados experimentais apresentadas na pesquisa elaborado por Awale *et. al* (2023). Já que a usinagem a seco culminou em maiores valores de rugosidade Ra, quando comparado às condições onde foram aplicados fluido lubri-refrigerante na usinagem do aço AISI H13.

Segundo Silva *et al.* (2006) a utilização de fluidos lubri-refrigerantes em processos de usinagem está diretamente relacionada à dissipação de calor que é gerado durante a remoção de cavacos da peça bruta e ainda à redução do atrito entre a ferramenta e a peça. A aplicação do fluido faz com que ocorra um aumento da força de corte empregada, pois altas temperaturas facilitam o corte de determinados materiais. Entretanto, na usinagem a seco podem ocorrer a formação de arestas postizas pelo efeito de adesão de material na ferramenta de corte o que ocasiona um decréscimo considerável na qualidade das superfícies usinadas. Portanto, o material a ser usinado e a ferramenta empregada devem ser levados em consideração no que diz respeito à utilização ou não do fluido lubri-refrigerante.

Considerando a profundidade de corte, a utilização do fluido lubri-refrigerante também não exerceu influência significativa nos resultados de Ra quando a profundidade de corte (a_p) foi variada. Estes resultados foram opostos aos resultados de Patole *et al.* (2021), onde somente o aumento da profundidade de corte afetaram drasticamente a qualidade das superfícies usinadas.

De acordo com ANSI/ASME B46.1–2009 os valores de rugosidade Ra normalmente alcançados em 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 foram 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 onde foram adotadas uma velocidade de corte de 160 m/min os resultados obtidos de rugosidade Ra se apresentaram muito próximo ao limite inferior do intervalo realizável em fresamento estabelecido por norma.

Na Figura 7 são apresentados os resultados da rugosidade Rz. Observa-se que os resultados mantiveram o comportamento semelhante aos resultados da rugosidade Ra (Figura 6), pois não houve alterações significativas no acabamento das superfícies considerando os valores obtidos em

Rz. Verifica-se que o uso do fluido de corte não influenciou significativamente os resultados de rugosidade Rz, assim como o aumento de da profundidade de corte (a_p). Contudo, o aumento da velocidade de corte se mostrou um fator relevante nos valores de rugosidade Rz.

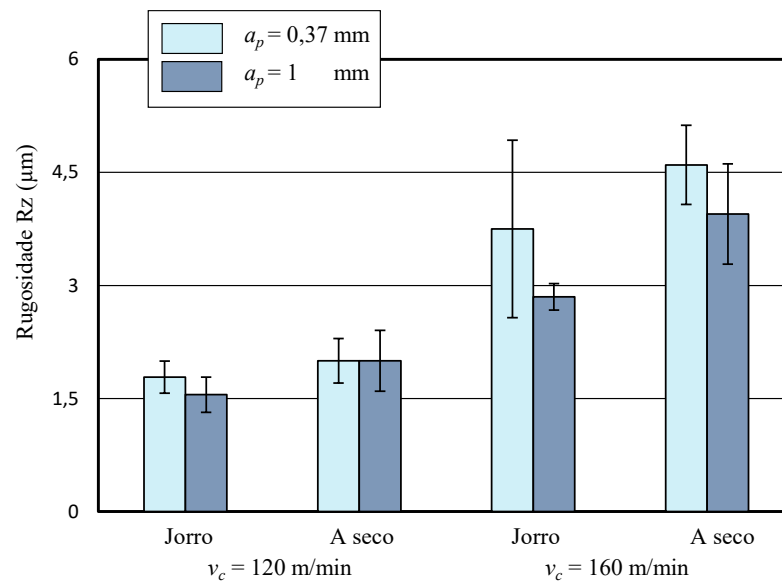


Figura 7 – Influência dos parâmetros de corte nos valores de rugosidade Rz.

Comparando a Figura 6 com a Figura 7, observa-se que os parâmetros de rugosidade Ra e Rz exibidos neste trabalho apresentaram comportamento semelhante no que diz respeito aos resultados obtidos, pois em ambos os casos o aumento da velocidade de corte foi o parâmetro que mais influenciou os resultados de rugosidade, piorando a qualidade das superfícies usinadas. Observa-se que a qualidade das superfícies usinadas diminuem com o aumento da velocidade de corte. Isto pode estar relacionado às vibrações geradas pelo processo de fresamento e ao desgaste da ferramenta de corte devido ao aumento da velocidade de corte. É bem estabelecido que a rugosidade da superfície usinada está diretamente relacionada à vibração da ferramenta de corte (Eraslan *et al.*, 2021; Bonifácio e Diniz, 1994; Polishetty *et al.*, 2008). Segundo Akademir *et al.*, (2012), a interface peça-ferramenta-máquina é um sistema flexível e durante o processo de usinagem surgem vibrações devido à variabilidade da força de corte. Estas vibrações podem deteriorar os resultados de rugosidade. Além disso, Guesser (2009) ressalta que a velocidade de corte para o ADI deve ser reduzida, pois velocidades de corte mais altas afetam o desgaste da ferramenta, o que também leva a uma pior qualidade superficial.

A dureza da superfície de um componente pode ser determinada por diversos tipos de ensaios, comumente utiliza-se na indústria de manufatura ensaios mecânicos nos quais medem a resistência a uma deformação plástica localizada (risco ou indentações) que o material apresenta. Esta propriedade mecânica é de suma importância nos projetos de engenharia pois o perfeito conhecimento da dureza apresentada pelo componente pode anteceder falhas (ZHANG, 2023; CALLISTER, 2016).

Na Figura 7 são exibidos os resultados de ensaios de dureza Vickers. Verifica-se que não houveram alterações significativas nos resultados de dureza em relação a variação dos parâmetros de corte ensaiados neste trabalho. Deve-se destacar que a medição da dureza das amostras como recebidas foi de 349 HV15.

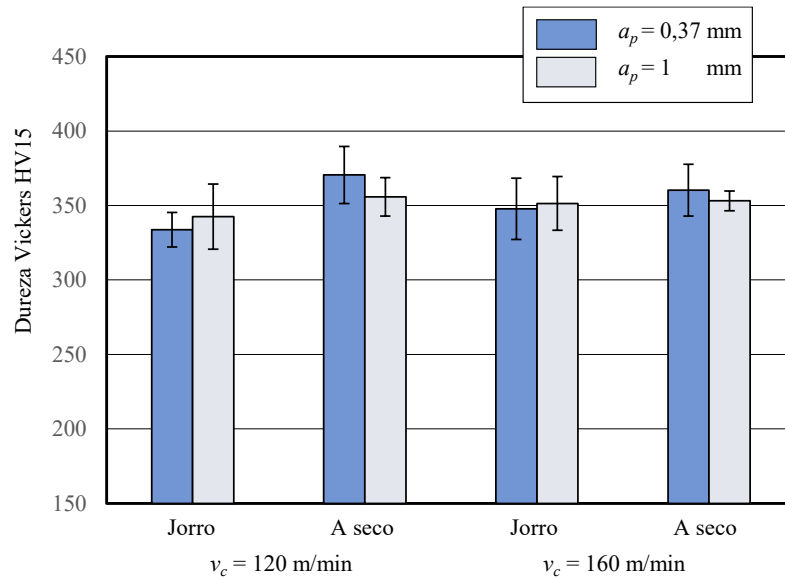


Figura 7 – Influência dos parâmetros de corte nos ensaios de dureza Vickers.

4. Conclusões

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

- A variação da velocidade de corte foi o parâmetro que mais influenciou na qualidade das superfícies usinadas, visto que o seu aumento foi diretamente proporcional ao aumento da rugosidade, considerando os parâmetros Ra e Rz. Entretanto não contribuiu na variação dos valores de dureza Vickers mensurados após a usinagem;
- O aumento da profundidade de corte não influenciou significativamente na qualidade das superfícies usinadas e suas respectivas durezas;
- O uso do fluido lubri-refrigerante no fresamento frontal do ADI – classe 3, sob as condições empregadas neste trabalho é dispensável, pois sua utilização não exerceu influência significativas na qualidade das superfícies e nos resultados de dureza Vickers, quando comparado a usinagem a seco;
- Os resultados do ensaio de dureza Vickers evidenciaram que não ocorreram alterações significativas nesta propriedade em função das condições de corte empregadas neste trabalho;
- As variações da profundidade de corte, velocidade de corte e utilização do fluido lubri-refrigerante nos experimentos não ocasionaram alterações significativas que inviabilizassem a utilização dos componentes fresados no que diz respeito à qualidade das superfícies usinadas e dureza. Destaca-se que quando adotada a velocidade de corte de 120 m/min, se obteve melhores resultados de rugosidade superficial.

Referências

- Akdemir, A.; Yazman, Ş.; Saglam, H.; Uyaner, M. (2012) 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). <https://doi.org/10.1115/1.4005805>
- American society of mechanical engineers. ANSI/ASME, 2010. ANSI/ASME B46.1-2009. Surface texture: surface roughness, waviness and lay., New York.
- ASTM A897M – 06, (2011). Standard Specification for Austempered Ductile Iron Castings, v. 01-02.
- Awale, A. S.; Srivastava, A.; Kumar, A.; Yusufzai, M. Z. K.; Vashista, M. (2023) Magnetic non-destructive evaluation of microstructural and mechanical characteristics of hardened AISI

- H13 die steel upon sustainable grinding, *Journal of Manufacturing Processes*, v. 103, p. 193-206. <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2023.08.035>
- Benini, L., (2017), *Influência do teor de grãos microcristalinos de Al₂O₃ em rebolos convencionais na retificação de ADI*, Tese de doutorado, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, SC, Brasil.
- Bonifácio, M. E. R.; Diniz, A. E. (1994) 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. [https://doi.org/10.1016/0043-1648\(94\)90266-6](https://doi.org/10.1016/0043-1648(94)90266-6)
- Callister, D.; Rethwisch, D. (2016) *Ciência e engenharia de materiais: uma introdução*; tradução Sergio Murilo Stamile Soares.- 9. ed. - Rio de Janeiro: LTC.
- Chiaverinni, V. (2008) *Aços e ferros fundidos*. 550 p. 7 ed. Livros ABM.
- Eraslan, D.; Balci, A.; Çetin, B.; Uçak, N.; Çiçek, A.; Yilmaz, O.; Davut, K. (2021) 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. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2021.01.123>
- Groover, M. P. (2017) *Fundamentos da Moderna Manufatura*. Vol. 2. GEN:LTC, 5ª edição.
- Guesser, W. L. (2009) *Propriedades mecânicas dos ferros fundidos*. 344p. 1 ed. São Paulo, Brasil, Artiber.
- Kazemi, M.; Kiani-Rashid, A. R.; Nourian A.; Babakhani A. (2014) Investigation of microstructural and mechanical properties of austempered steel bar-reinforced ductile cast iron composite. *Materials and Design*, v. 53, p. 1047-1051. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2013.07.088>
- Lacalle, L.; Valdivielso, L; Amigo, A.; Sastoque, F. (2020) Milling with ceramic inserts of austempered ductile iron (ADI): process conditions and performance. *Int J Adv Manuf Technol* v.110, p. 899–907. <https://doi.org/10.1007/s00170-020-05942-2>
- Li, Z.; Yin, F., (2021). Automated measurement of Vickers hardness using image segmentation with neural networks, *Measurement*, Vol. 186. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2021.110200>
- Mesquita, N. G. M. (1992) *Avaliação e escolha de uma superfície segundo sua função e fabricação*. Tese de Doutorado, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, Brasil.
- Machado, A. R.; Abrão, A. M.; Coelho, R. T.; Silva, N. B. *Teoria da Usinagem dos Materiais*. 3ª ed., São Paulo: Edgard Blucher, 2015.
- Oliveira, J. M. (2006) *Caracterização da integridade de superfícies usinadas para produção de moldes e matrizes*. Dissertação de Mestrado, Universidade de Caxias do Sul, Caxias do Sul, RS, Brasil.
- Patole, P. B., Kulkarni, V. V., Bhatwadekar, S. G. (2021). Machining with nano fluid: a review. *Manufacturing, Rev.*8,13. <https://doi.org/10.1051/mfreview/2021011>
- Polishetty, A., Singamneni S, Littlefair G. (2008) A comparative assessment of austempered ductile iron as a substitute in weight reduction applications. oct 7-10; Illinois USA Proceedings of the *ASME 2008 international manufacturing science and engineering conference collocated with the 3rd JSME/ASME international conference on materials and processing (MSEC2008)* 2008:49e57.
- Priarone, P. C.; Robiglio, M.; Settineri, L. (2016) Milling of Austempered Ductile Iron (ADI) with recycled carbide tools. *Int J Adv Manuf Technol*, v. 82, p. 501–507. <https://doi.org/10.1007/s00170-015-7387-5>
- Rossi, G. C. (2008) *Estudo das forças de corte no processo de fresamento de bordas de chapas utilizadas para a fabricação de tubos de aço com costura*. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo.
- Sinlah, A., Handayani, D., Voigt, R. C., Hayrynen, K., M'Saoubi R., Saldana C. (2016) Effects of microstructure and strength on wear performance in rough milling of austempered ductile iron, *International Journal of Cast Metals Research*, v. 29:1-2, p. 62-67. <https://doi.org/10.1179/1743133615Y.0000000026>

- Wang, X., Du, Y., Liu, C., Hu, Z. Li, P., Gao, Z., Guo, H., Jiang, B. (2022) Relationship among process parameters, microstructure, and mechanical properties of austempered ductile iron (ADI), *Materials Science and Engineering: A*, <https://doi.org/10.1016/j.msea.2022.144063>
- Zhang, H.; Wu, H.; Zhang, L.; Jiang, M.; Huang, H.; Yan, J. (2023). Surface hardness and scratch characteristics of nanosecond laser colored Ti-based metallic glass, *Journal of Alloys and Compounds*, v. 970 <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2023.172659>