INFLUÊNCIA DOS PARÂMETROS DE CORTE E DA FORÇA DE USINAGEM NAS TENSÕES RESIDUAIS GERADAS NO FRESAMENTO DE TOPO DO AÇO MARAGING 350

Hugo Mikael Amâncio[1]; Tatiane Chuvas[2] Bernardo Bretas[1], Matheus Campolina[2] e Maria Cindra Fonseca[1]

[1] *Departamento de Engenharia Mecânica/PGMEC/ UFF – Universidade Federal Fluminense, Rua Passo da Pátria, 156, CEP 24210-240, São Domingos, Niterói – RJ.* mariacindra@id.uff.br

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

As tensões residuais superficiais geradas pelos processos de fabricação têm papel importante na vida em serviço dos componentes. Nesse contexto, o emprego de diferentes parâmetros de corte pode impactar substancialmente nas operações de usinagem e, consequentemente, influenciar as características da superfície usinada. No presente trabalho, foi estudada a influência dos parâmetros de corte nas tensões residuais e na força de usinagem geradas no fresamento de topo do aço maraging 350, usando insertos de metal duro com cobertura de TiN, com aplicação de fluido de corte em jorro. As tensões residuais foram medidas por difração de raios-X, pelo método sen²ψ. Como resultado, tensões residuais compressivas foram obtidas com maior velocidade de corte e menor avanço. Por outro lado, com o emprego de maiores avanço e profundidade de corte, força de usinagem de maior magnitude foi obtida. Análises de rugosidade e a caracterização microestrutural complementam o presente trabalho.

Palavras-chave: *tensões residuais, fresamento de topo, aço maraging 350, difração de raios-X.*

INTRODUÇÃO

Tensões residuais (TR), são tensões remanescentes no material após os processos de fabricação na ausência de carregamento externo e gradientes térmicos. Tais tensões são auto equilibradas e produzidas sempre que regiões do material sofrem deformação plástica heterogênea(1). Essas tensões têm impacto significativo na vida em serviço podendo, conforme sua natureza, serem benéficas ou não aos componentes estruturais. Quando trativas, podem se somar com as tensões de serviço contribuindo para a iniciação e propagação de trincas e quando compressivas, prolongam a vida dos componentes(2).

O estudo das tensões residuais na usinagem, concentra-se nas condições e parâmetros de corte como fatores dominantes em seu surgimento, pois durante a usinagem, altas taxas de deformação e temperatura atuam como mecanismos de surgimento destas tensões impactando na vida em serviço dos componentes usinados[3].

Os aços maraging, são aços de ultra-alta resistência de baixo carbono com matriz formada por uma liga Fe-Ni e endurecida por precipitação de compostos intermetálicos quando submetidos ao tratamento de envelhecimento[4]. Possuem elevada relação resistência/peso quando comparados aos aços convencionais, o que os tornam ideais para a fabricação de moldes e matrizes de injeção, e também são utilizados em componentes de transmissão de alto desempenho no setor automobilístico[5].

A usinagem de aços de alta resistência, como o aço maraging, exige elevada força de usinagem, provocando o aumento do consumo de energia, calor excessivo na região do corte e pior acabamento superficial[5].

O presente trabalho tem como objetivo o estudo da influência dos parâmetros de corte nas tensões residuais e a sua correlação com as forças de usinagem e a integridade da superfície no fresamento de topo do aço maraging 350.

2 – MATERIAIS E MÉTODOS

No presente trabalho foi estudada uma amostra de aço maraging 350, recebido na condição solubilizado a 910°C por 1 hora, com 17,4 mm de espessura. As propriedades mecânicas e a composição química do material estão apresentadas nas Tabelas 1 e 2.

Tabela 1 – Propriedades mecânica do aço maraging 350 (Fonte: Fabricante).

Limite de escoamento (MPa)	Limite de Resistência (MPa)	Dureza (HRC)
951	1097	37

Tabela 2 – Composição química do aço maraging 350 (% em peso) (Fonte: Fabricante).

C	S	N	H	P	W	Co	Ni
0,0023	0,0006	7,03	0,81	0,005	0,026	11,65	17,65
Si	**Mn**	**Cr**	**Mo**	**V**	**Ti**	**Cu**	**Al**
0,039	0,021	0,052	4,69	0,1	1,44	0,009	0,065

Os experimentos de usinagem, por fresamento de topo, foram realizados em uma fresadora CNC Veker MV-760ECO utilizando uma fresa de Ø 16 mm com dois insertos de metal duro revestido com TiN (nitreto de titânio) e raio da ponta de 0,8 mm, conforme Figura 1.

Figura 1: Fresamento das amostras: a) fresa intercambiável Ø 16mm com dois insertos: a) vista frontal b) vista superior e c) amostra com os canais usinados.

(a)

(b)

(c)

Os ensaios foram realizados sob duas condições de corte, dispostas na Tabela 3, em três réplicas, com o método de lubrificação por jorro com fluido de corte de base natural, biodegradável, Hydria EP diluído em uma proporção de 1:19 em água.

Tabela 3 – Parâmetros empregados na operação de fresamento.

Condição	**Rotação** (rpm)	**Velocidade de corte *Vc*** (m/min)	**Avanço por dente fz** (mm/rot)	**Velocidade de Avanço V_f** (mm/min)	**Profundidade de corte a_p** (mm)
1	2500	126	0,04	100	1
2	3500	176	0,02	70	0,3

A força de usinagem foi monitorada através de um sistema de aquisição de dados de três componentes composto por um dinamômetro piezoelétrico modelo Kistler 9257-BA, um amplificador de sinais e um conversor analógico digital. As componentes da força foram obtidas em canais separados (Fx, Fy e Fz) e a força total de usinagem foi calculada pela equação 2.1.

$$F_R = \sqrt{F_x^2 + F_y^2 + F_z^2} \quad (2.1)$$

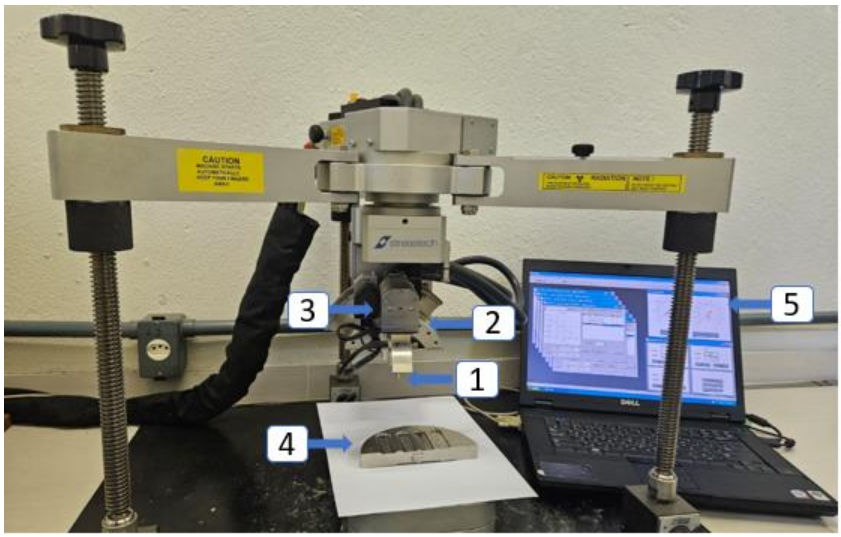
Para obtenção da força resultante, o sinal completo foi seccionado em três regiões das amostras equivalendo ao início, meio e fim da operação de fresamento e realizado média aritmética em 12 pontos por seção totalizando 36 pontos dos picos máximos de força nas duas condições de usinagem.

Tensões residuais longitudinais foram avaliadas na direção do avanço da ferramenta, pela técnica de difração de raios-X, utilizando o método sen²Ψ com os parâmetros listados na Tabela 4. As medições foram realizadas no centro da amostra, fora da região de entrada e saída da ferramenta usando o analisador de tensões *Xstress* 3000, fabricado pela *Stresstech* (Figura 2).

Tabela 4 – Parâmetros utilizados nas análises das tensões residuais.

Inclinação Ψ (°)	0, 20,7, 30, 37,7 e 45
Radiação	CrKα
Comprimento de onda λ (Å)	2,29092
Tempo de exposição (s)	25
Tensão (kV)	30
Corrente (mA)	6,7

Figura 2: Analisador de tensão *Xstress* 3000: 1) colimador, 2) goniômetro, 3) tubo de raios-X, 4) amostra, 5) *software.*



Com um rugosímetro Taylor Hobson Surtronic 25 foi avaliada a rugosidade média (Ra) da superfície usinada, medida em três pontos equidistantes em 1 cm entre si. O equipamento apresenta resolução de 0,01 µm e o comprimento de avaliação e de amostragem foram 4,00 mm e 0,80 mm, respectivamente.

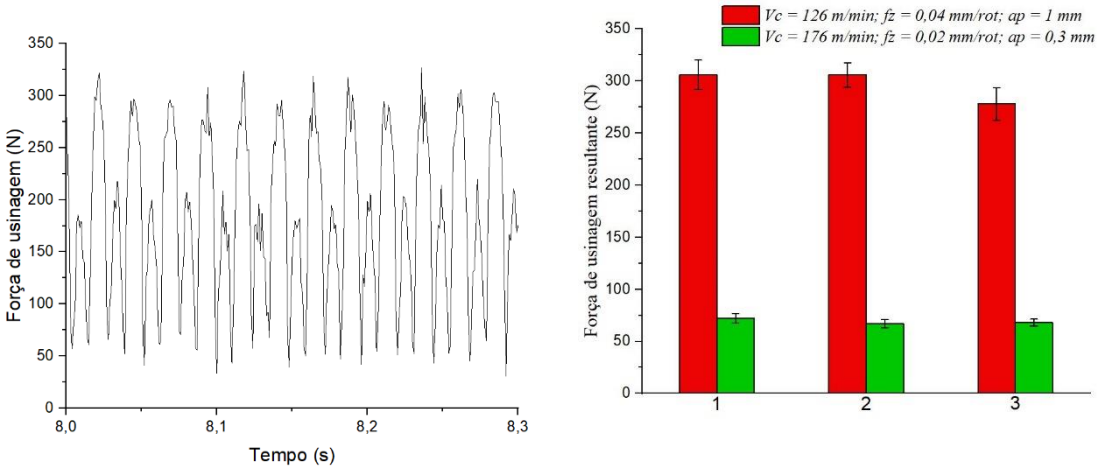
A análise por microscopia óptica foi realizada no laboratório de materiais LAMAT/CEFET/RJ usando uma solução Fry modificada (1g de $CuCl_2$, 150ml de água destilada, 50ml de HCl, 25ml de HNO_3) com tempo de 30s de imersão, para revelar a microestrutura da amostra.

3 – RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados da aquisição da força resultante de usinagem estão apresentados na Figura 3, e uma seção do sinal da força máxima está indicada na Figura 3(a) e a força resultante final na Figura 3(b).

A componente da força *Fz,* que corresponde à força passiva, atua axialmente ao eixo da ferramenta e é perpendicular à superfície usinada, contribuindo somente para a força resultante de usinagem.

Figura 3: Força resultante de usinagem.

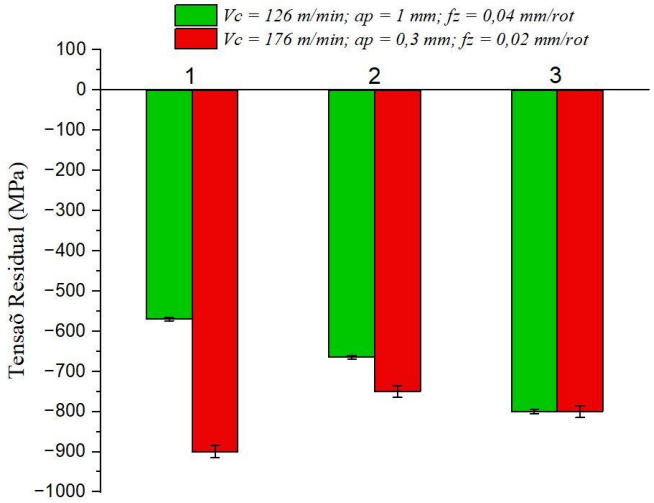


(a) (b)

Ao analisar a Figura 3, é possível perceber que o emprego de maior avanço, menor velocidade e maior profundidade de corte resultou em maior remoção de material e a força resultante de usinagem foi mais elevada. O contrário ocorreu ao aumentar a velocidade de corte, diminuir o avanço e a profundidade de corte simultaneamente reduzindo a força resultante em aproximadamente 78%. Estes resultados estão coerentes com a literatura e especificamente com os resultados encontrados por Varghese *et al.*[6] ao fresar o aço maraging e à medida em que aumentaram a velocidade de corte, as forças de corte diminuíram.

As tensões residuais analisadas nos canais fresados estão apresentadas na Figura 4.

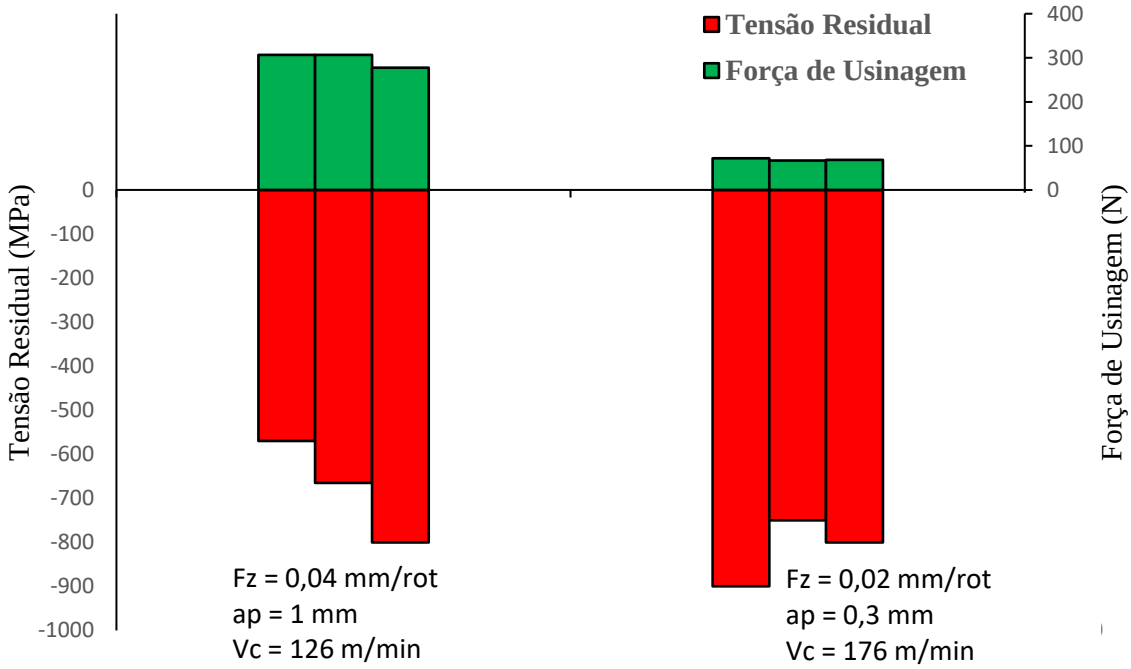
Figura 4: Tensões residuais no fresamento.



Na Figura 4 é possível observar que em todas as condições de usinagem as tensões residuais foram compressivas. Entretanto, com o aumento da velocidade de corte, tensões residuais compressivas de maior magnitude foram obtidas, provavelmente devido ao uso do fluido de corte em jorro durante o processo, o que tornou a influência térmica pouco significativa e os efeitos de deformação plástica preponderantes. Estes resultados corroboram os obtidos por Tomaz *et al*.[7], ao estudar a integridade superficial do aço maraging 300.

Para obtenção da correlação entre as tensões residuais e a força de usinagem foi gerado o gráfico disposto na Figura 5.

Figura 5: Correlação entre tensão residual e força de usinagem.



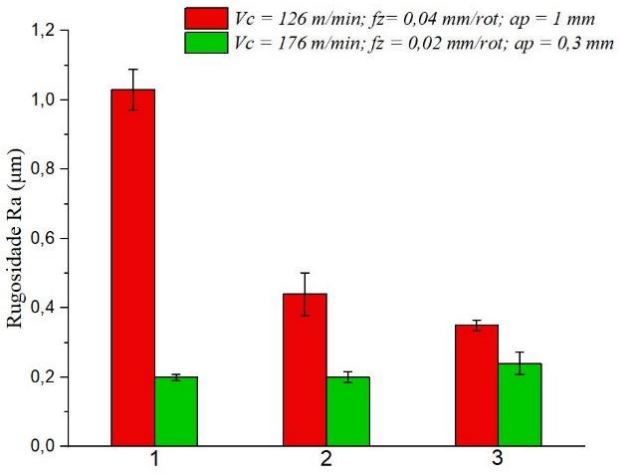
Analisando a Figura 5, observa-se que as tensões residuais compressivas de maior magnitude foram alcançadas à medida que a força de usinagem foi diminuindo. É sabido que o aumento da velocidade de corte provoca maior taxa de deformação e eleva a temperatura na zona de cisalhamento facilitando a remoção do material. Estes resultados são coerentes com os de Jiang *et al.*[8], que analisaram o efeito da força de corte e da temperatura na geração das tensões residuais no fresamento, calculando um coeficiente de correlação, e

concluindo que a força de corte desempenha um papel majoritário em relação aos efeitos térmicos no surgimento das tensões residuais.

O valor médio e desvio padrão da rugosidade média (Ra) obtidos em cada condição de fresamento estão indicados na Figura 6. A análise dos gráficos revelam que o aumento da velocidade de corte resulta em menores valores de rugosidade, proporcionando um acabamento mais refinado. Isso pode estar associado ao uso de uma aresta de corte nova em cada operação e ao desempenho do recobrimento da ferramenta, que contribui para a ausência de aresta postiça de corte (APC) e proporciona melhor qualidade da superfície usinada.

Com o emprego de maior velocidade e menores profundidade de corte e avanço não foram observadas diferenças significativas na rugosidade entre as amostras usinadas. O aço maraging apresentou um bom resultado para rugosidade durante o fresamento, os quais se aproximam aos obtidos por Padmalatha[9] ao retificar um aço maraging 250 com rebolo de óxido de alumínio.

Figura 6: Rugosidade média Ra

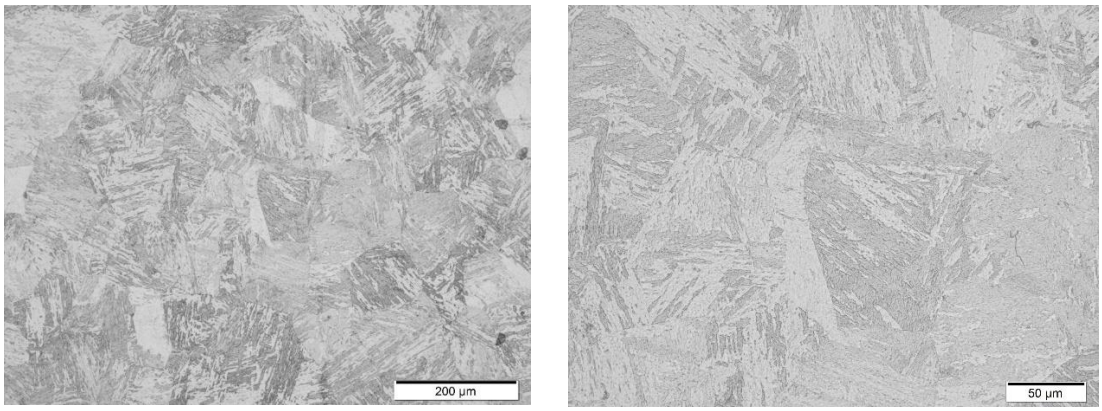


O aumento da velocidade de corte, aliado à redução do avanço e da profundidade de corte, resultou na diminuição das forças de usinagem e da rugosidade, além de favorecer o surgimento das tensões residuais compressivas em maior escala. Esse resultado é benéfico e desejável, pois a redução da força resultante de usinagem diminui a potência requerida pela máquina ferramenta e o consumo de energia, e as tensões residuais compressivas superficiais

contribuem para o aumento da vida em serviço, impedindo ou retardando a nucleação e a propagação de trincas[10,11].

Os resultados das análises metalográficas do material por microscopia óptica está apresentada na Figura 7.

Figura 7: Microscopia óptica do aço maraging 350 solubilizado.



(a) Aumento 200 X (b) Aumento 500X

A análise metalográfica (Figura 7) revelou a microestrutura totalmente martensítica do aço maraging 350 solubilizado, com ripas distribuídas dentro dos grãos originalmente austeníticos. Essa martensita, apresenta uma microestrutura cúbica de corpo centrado (CCC), de baixo carbono e elevado teor de níquel, caracterizando-se por sua ductilidade e resistência, o que assegura a tenacidade do material[12].

CONCLUSÕES

O presente trabalho, que avaliou experimentalmente a influência dos parâmetros de corte e da força de usinagem nas tensões residuais geradas no fresamento de topo do aço maraging 350, permite as seguintes conclusões:

1. No fresamento de topo de aço maraging 350 tensões residuais compressivas de maior magnitude são obtidas quando empregados parâmetros de maior velocidade de corte e menores profundidade de corte e avanço, o que corresponde também à menor força de usinagem.

2. A superfície usinada apresentou um bom acabamento superficial nas duas condições, destacando-se para o melhor resultado (0,2 μm) quando a redução do avanço e aumento da velocidade de corte foram aplicados.
3. O aço maraging na condição de solubilização apresenta uma estrutura completamente martensítica sem precipitados intermetálicos.

AGRADECIMENTOS

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

REFERÊNCIAS

[1] Macherauch, E; Kloos, K.H, “Origin, Measurements and Evaluation of Residual Stress”, *Science and technology*, 1987.

[2] G. A. Webster e A. N. Ezeilo, “Residual stress distributions and their influence on fatigue lifetimes”, *International Journal of Fatigue*, vol. 23, p. 375–383, 2001, doi: 10.1016/S0142-1123(01)00133-5.

[3] K. Saptaji, S. N. Afiqah, e R. D. Ramdan, “A Review on Measurement Methods for Machining Induced Residual Stress”, *IJoCED*, vol. 1, nº 2, p. 106. 2019, doi: 10.35806/ijoced.v1i2.64.

[4] L. G. de Carvalho, M. S. Andrade, e A. F. Padilha, “Análise cinética da transformação martensítica em um aço maraging da série 350”, *Anais do Congresso Anual da ABM*, 2013.

[5] A. T. Abbas, M. O. Helmy, A. A. Al-Abduljabbar, M. S. Soliman, A. S. Hasan, e A. Elkaseer, “Precision Face Milling of Maraging Steel 350: An Experimental Investigation and Optimization Using Different Machine Learning Techniques”, *Machines*, vol. 11, Art. nº 11 2023, doi: 10.3390/machines11111001.

[6] V. Varghese, A. K., M. R. Ramesh, e D. Chakradhar, “Investigation on the performance of AlCrN and AlTiN coated cemented carbide inserts during end milling of maraging steel under dry, wet and cryogenic environments”, *Journal of Manufacturing Processes*, vol. 43, p. 136–144. 2019, doi: 10.1016/j.jmapro.2019.05.021.

[7] Í. V. Tomaz, J. M. Pardal, e M. C. Fonseca, “Influence of minimum quantity lubrication in the surface quality of milled maraging steel”, *Int J Adv Manuf Technol*, vol. 104, nº 9–12, p. 4301–4311, 2019, doi: 10.1007/s00170-019-04262-4.

[8] X. Jiang, B. Li, L. Wang, Z. Wang, e H. Li, “An approach to evaluate the effect of cutting force and temperature on the residual stress generation during milling”, *Int J Adv Manuf Technol*, vol. 87, nº 5–8, p. 2305–2317,2016. doi: 10.1007/s00170-016-8605-5.

[9] T. Padmalatha, M. Jalli, e S. Konapalli, “Influence of Process Parameters of Surface Grinding on Maraging Steel”, *International Journal of Materials Science*, vol. 12, p. 127–135, 2017.

[10] H. Sutanto e J. Madl, “Residual stress development in hard machining - a review”, *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.*, vol. 420, p. 012031, 2018. doi: 10.1088/1757-899X/420/1/012031.

[11] Y. R. Mileski, M. R. Policena, e A. João de Souza, “Análise das forças de usinagem geradas pelo fresamento frontal do aço inoxidável duplex forta® DX 2304”, em *Procceedings of the 11th Brazilian Congress on Manufacturing Engineering*, ABCM, 2021.
doi: 10.26678/ABCM. COBEF2021.COB21-0033.

[12] R. I. Tavares, S. I. V. D. Santana, A. D. S. Paula, L. P. M. Brandão, e F. L. D. Silva, “Estudo de parâmetros que afetam o envelhecimento do aço maraging 350”, em *Anais do Congresso Anual da ABM*, Rio de Janeiro: Editora Blucher, 2017, p. 1293–1303. doi: 10.5151/1516-392X-30453.

INFLUENCE OF CUTTING PARAMETERS AND MACHINING FORCE ON RESIDUAL STRESSES GENERATED IN END MILLING MARAGING STEEL 350

ABSTRACT

The surface residual stresses generated by manufacturing processes play an important role in the service life of components. In this context, the use of different cutting parameters can have a substantial impact on machining operations and, consequently, influence the characteristics of the machined surface. In this study, the influence of cutting parameters on the residual stresses and machining force generated during end milling of 350 maraging steel, using TiN-coated carbide inserts, with the application of flood cutting fluid was studied. Residual stresses were measured by X-ray diffraction using the $sen^2\psi$ method. As a result, compressive residual stresses were obtained at higher cutting speeds and lower feed rates. On the other hand, with the use of higher feed rates and depths of cut, machining forces of greater magnitude were achieved. Roughness analysis and microstructural characterization complement this work.

Keywords: *residual stresses, end milling, 350 maraging steel, X-ray diffraction.*