

CONEM 2016
CONGRESSO NACIONAL DE
ENGENHARIA MECÂNICA

21-25
AGOSTO DE 2016
FORTALEZA - CEARÁ

ESTUDO DAS TENSÕES RESIDUAIS, FORÇAS DE USINAGEM E QUALIDADE DE SUPERFÍCIE GERADAS NO FRESAMENTO DE AÇO MARAGING CLASSE 300

Carolina Paiva Nascimento, carolina.paiva6@gmail.com¹

Mateus Campos Martins, mateuscamp@id.uff.br¹

Juan Manuel Pardo, juanpardo@vm.uff.br¹

Sérgio Souto Maior Tavares, sstavares@terra.com.br¹

Anna Carla Araujo, anna@mecanica.uff.br²

Maria Cindra Fonseca, mcindra@vm.uff.br¹

¹Universidade Federal Fluminense, Rua Passo da Pátria, 156, São Domingos CEP 24210-240, Niterói-RJ,

²Universidade Federal do Rio de Janeiro, Av. Athos da Silveira Ramos, 149, Bloco G-Sala 204 Gabinete 14, CEP 21941-909, Cidade Universitária, RJ.

Resumo: O desenvolvimento da tecnologia e dos processos metalúrgicos proporcionou o surgimento de novos materiais de altíssima resistência, tais como, os aços maraging. Estes aços ainda são pouco estudados do ponto de vista da seleção adequada dos parâmetros de usinagem e da geração de tensões residuais durante este processo. O presente trabalho tem como objetivo o estudo das tensões residuais, das forças de usinagem e da qualidade de superfície geradas no fresamento de topo do aço maraging 300, utilizando diferentes parâmetros de corte. As tensões residuais foram analisadas por difração de raios-X utilizando a técnica do $\sin^2\psi$. Os resultados mostram que as tensões residuais obtidas foram compressivas e de alta magnitude, e os parâmetros que tiveram maior influência no comportamento das tensões residuais foram profundidade e velocidade de corte.

Palavras-chave: Usinagem, Aço Maraging 300, Tensões residuais, Difração de raios-X.

1. INTRODUÇÃO

O estudo dos aços de alta resistência mecânica, em particular os aços maraging, que podem atingir tensão limite de escoamento da ordem de 1400 MPa, é estratégica. Esses aços são utilizados na indústria aeronáutica que requer componentes com uma alta qualidade de acabamento superficial e uma ótima resistência à fadiga, pelo fato de estarem submetidos aos mais diversos tipos de carregamentos ao longo da sua vida em serviço (Varela et al., 2014).

As indústrias em todo mundo estão constantemente interessadas na redução dos tempos nos processos de fabricação, dentre eles na usinagem. Os parâmetros de usinagem utilizados durante esse processo podem contribuir de forma significativa para essa otimização. Assim sendo, a correta especificação do regime de corte: velocidade de corte, avanço e profundidade de corte, tem impacto direto nos tempos e nos custos de fabricação (Lalwani et al., 2008).

Do ponto de vista da usinagem, os aços maraging ainda são pouco estudados. Alguns estudos recentes realizados (Kosaraju & Chandraker, 2015, e Lalwani et al., 2008) sobre usinagem por torneamento dos aços maraging mostram que não está bem estabelecida a influência dos parâmetros de corte nas forças de corte e no acabamento superficial dos componentes usinados.

Assim sendo, a seleção dos parâmetros de corte não é um tema trivial, pois a sua seleção tem impacto direto na geração de tensões residuais e na qualidade de superfície do componente mecânico produzido por usinagem. As tensões residuais tensões autoequilibradas existentes nos materiais em condições de temperatura homogênea e sem carregamento externo (Macherauch & Kloos, 1987) e são diretamente influenciadas pelos parâmetros de corte selecionados nos processos de usinagem e sua magnitude e distribuição podem afetar de forma significativa a integridade estrutural de um componente mecânico usinado (Varela et al., 2014; James, 2010). O conhecimento das tensões residuais remanescentes na peça em função das condições de corte é crítico para melhorar a vida em fadiga, o comportamento à fratura, a resistência à corrosão e a integridade estrutural das peças, especialmente na indústria aeroespacial (Lazoglu et al., 2008).

Neste contexto, o presente trabalho tem como objetivo o estudo da influência dos parâmetros de corte na geração de tensões residuais, nas forças de usinagem e na qualidade de superfície por fresamento de topo do aço *maraging* classe 300.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

O procedimento experimental foi realizado em duas etapas: obtenção dos resultados das forças de usinagem durante o fresamento e medições experimentais após o processo de usinagem.

2.1. Material

O aço *maraging* classe 300 estudado nesse trabalho foi fabricado pela Villares Metal e fornecido na condição laminado e solubilizado, cuja composição química e propriedades mecânicas estão apresentadas nas Tabelas 1 e 2, respectivamente. A amostra foi fornecida na forma de barra, com 170 mm de diâmetro e 10 mm de espessura.

Tabela 1. Composição química do aço *maraging* classe 300 estudado (% em peso).

C	Ni	Co	Mo	Al	Cr	Si	Ti
0,007	18,33	9,4	5,0	0,106	0,110	0,040	0,790
Cu	Mn	V	W	P	Mg	N	O
0,020	0,020	0,020	<0,010	<0,005	<0,005	<0,001	<0,001

Tabela 2. Propriedades mecânicas do aço *maraging* classe 300 estudado.

Tensão Limite de Escoamento (MPa)	Tensão Limite de Resistência (MPa)	Alongamento (%)	Redução de Área (%)
790	1010	17	76

2.2. Fresamento

A usinagem da amostra foi realizada em um centro de usinagem Romi V400 do CEFCON/UFRJ. Para a obtenção dos valores das forças de usinagem, a amostra foi fixada no dinamômetro piezoelétrico de três componentes, modelo 9257-AB da Kistler, com capacidade de medição de sinais de forças até 10 kN com um amplificador de sinais, uma placa de aquisição de dados e um microcomputador com programa de leitura. A Fig.1 apresenta um esquema que representa a máquina-ferramenta utilizada, a configuração de fixação do corpo de prova, e ainda a representação da conexão de aquisição de dados (Dinamômetro + Amplificador + Placa de Aquisição A/D). A aquisição de dados utilizou amplificação de 10 mV/N e uma frequência de aquisição de 2,0KHz.

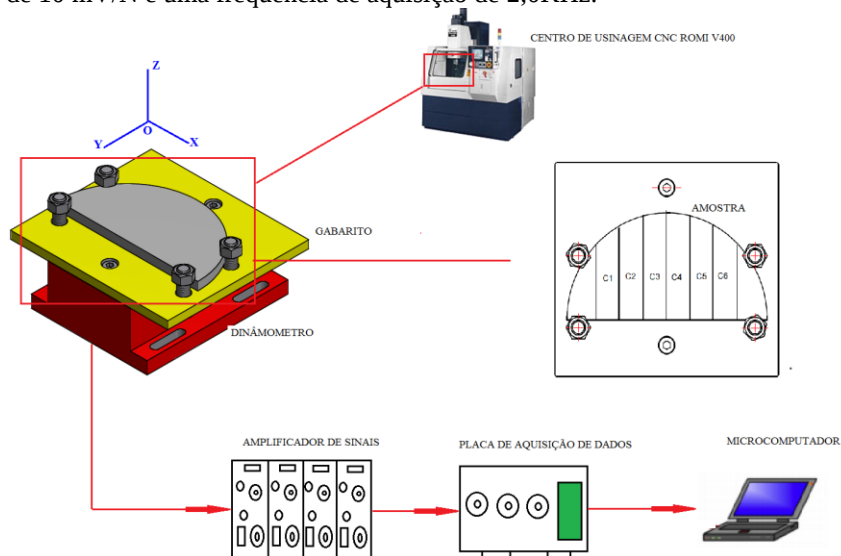
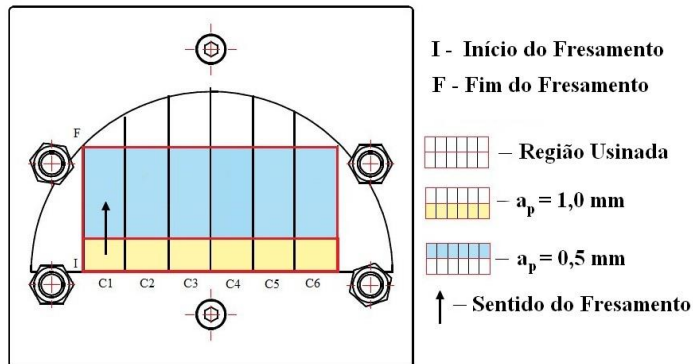


Figura 1. Arranjo do fresamento do aço *maraging* 300 no CEFCON/UFRJ.

A amostra foi fixada através de um gabarito e a usinagem realizada em 6 canais, nomeados de C1 a C6, como ilustra a Figura 2. É realizado um fresamento de topo em cheio no qual foram utilizadas pastilhas de metal duro recobertas com TiN, classe KC725M, da Kennametal, montadas em um suporte de 16 mm de diâmetro, usando como fluido de corte uma emulsão à base de óleo vegetal na proporção de 1:40.



(a) Regiões do CP com as profundidades de corte empregadas

(b) Imagem do Corpo de Prova

Figura 2. Configuração da amostra

O planejamento de experimentos foi realizado com os parâmetros de corte apresentados na Tabela 3. O avanço por dente (f_z) foi considerado constante, de 0,03 mm/dente.

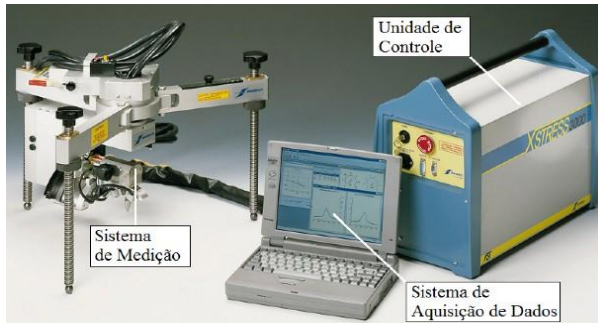
Tabela 3. Parâmetros de corte utilizados no ensaio.

Canais Usinados	Profundidade de corte a_p (mm)	Comprimento de corte (mm)	Velocidade de corte (m/min)
C1 e C3	0,5	10	25
C1 e C3	1,0	40	25
C2 e C5	0,5	10	35
C2 e C5	1,0	40	35
C4 e C6	0,5	10	45
C4 e C6	1,0	40	45

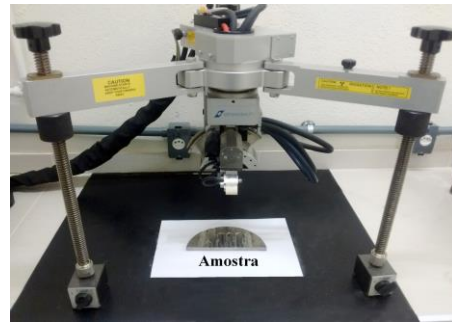
2.3. Avaliação da superfície

Após o fresamento, foi realizada a medição da rugosidade da amostra com o rugosímetro da marca Taylor Hobson Brasil Surtronic25. A medição da rugosidade (R_a) foi feita em duas regiões de cada canal, isto é, no fresamento com profundidade de 0,5 mm e de 1,00 mm, sendo utilizada a média dos valores dos canais usinados com a mesma velocidade de corte.

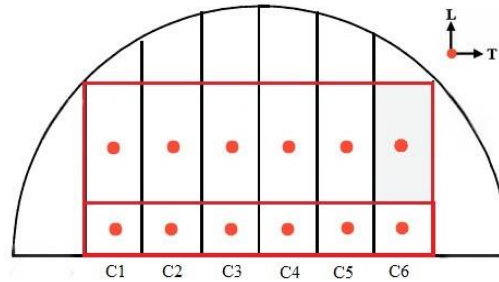
As tensões residuais foram analisadas no Laboratório de Análises de Tensões - LAT, do Departamento de Engenharia Mecânica da UFF, pela técnica da difração por raios-X usando o método $\sin^2\Psi$. Foi utilizado o analisador de tensões Xstress3000, fabricado pela Stresstech, Fig. 3a, com a radiação $\text{CrK}\alpha$ ($\lambda_{\text{CrK}\alpha} = 2.29092 \text{ \AA}$) para difratar o plano (211) da ferrita, sob o ângulo de Bragg $2\theta = 156.41^\circ$. As medições foram realizadas sobre a superfície do corpo de prova (Fig.3b) nas regiões destacadas na Fig. 3c de cada canal, em duas direções, longitudinal (L) e transversal (T) ao sentido do corte e em 2 pontos, isto é, na região usinada com a profundidade de corte de 0,5 mm e 1,0 mm.



(a) Analisador de tensões XStress3000



(b) Amostra sendo analisada



(c) Regiões de Análise e Direções Longitudinal e Transversal de Medida
Figura 3. Configuração Experimental para Medida de Tensão Residual

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Nesta seção estão apresentados os resultados das forças de usinagem F_{res} , da Rugosidade de superfície (R_a) e das tensões residuais obtidas a partir do processo de fresamento de topo do aço *maraging* 300.

3.1. Forças de Usinagem

A força de usinagem analisada é a resultante das forças de corte e de avanço no fresamento, F_{res} . Experimentalmente, é calculada a partir das componentes das forças nos eixos x e y, obtidas pelo dinamômetro (Eq. 1).

$$|F_{res}| = \sqrt{|F_x|^2 + |F_y|^2}, \quad (1)$$

A Fig. 4 apresenta um exemplo da força resultante F_{res} durante dez rotações da ferramenta. A Fig. 5 apresenta um resumo do resultado de todos os experimentos, no qual foram utilizadas as forças máximas com 100 revoluções após a entrada completa da ferramenta de corte. É possível observar que as forças de usinagem sofrem influência da velocidade e da profundidade de corte empregada durante o processo.

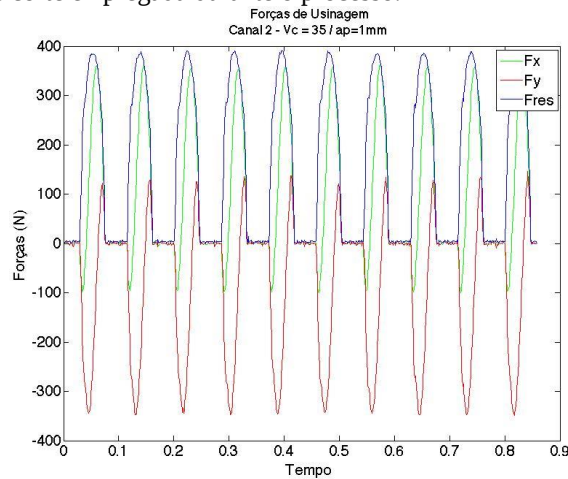


Figura 4. Forças de usinagem no fresamento com condições $V_c = 35$ m/min, $a_p = 1$ mm.

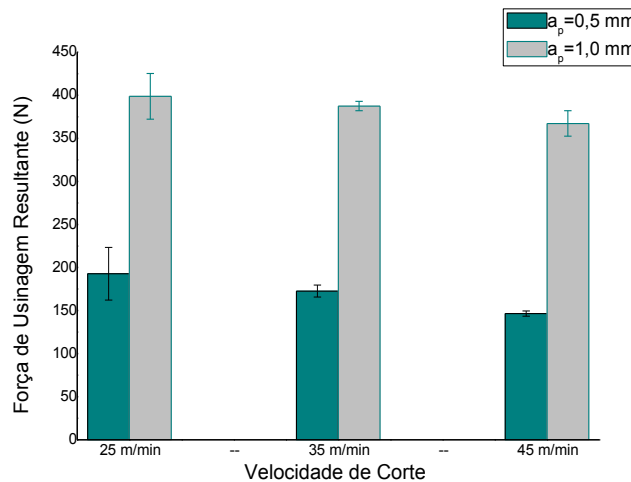


Figura 5. Forças de usinagem em função da velocidade de corte e profundidade.

Pode-se observar que, como esperado, a profundidade de corte apresentou influência na magnitude das forças de usinagem. Com o aumento da área de corte, causado pela profundidade de corte, para velocidade constante, maior é o valor da resultante F_{res} .

O aumento das velocidades de corte empregadas no fresamento promoveu uma redução dos valores das forças de usinagem, o que está coerente com o resultado observado por Kosaraju e Chandraker, 2015 durante o torneamento do aço *maraging* classe 350 com método de Taguchi.

3.2. Qualidade de superfície

Após a aquisição dos resultados de rugosidade (R_a), os valores analisados de acordo com as velocidades e profundidades de corte empregadas, conforme apresentado na Figura 6.

É possível observar que a diminuição da profundidade de corte correspondeu a uma muito pequena melhoria na qualidade de superfície, o mesmo encontrado por Kosaraju e Chandraker, 2015 no torneamento do aço *maraging* classe 350, onde o avanço por rotação teve uma maior influência na rugosidade (R_a) em primeiro lugar e, em segundo, a profundidade de corte utilizada.

A rugosidade foi medida em dois pontos dos canais como descrito no item 2.3, os valores plotados na Figura 7 demonstram que apenas para a velocidade de corte de 25 m/min o aumento das tensões residuais compressivas corresponde a um aumento da qualidade de superfície. As velocidades de corte de 35 m/min e 45 m/min resultaram em detrimento do acabamento com o aumento da profundidade de corte, porém, a velocidade de 35 m/min resultou no pior acabamento superficial do aço *maraging*, tanto para a profundidade de 0,5 mm quanto para de 1,0 mm.

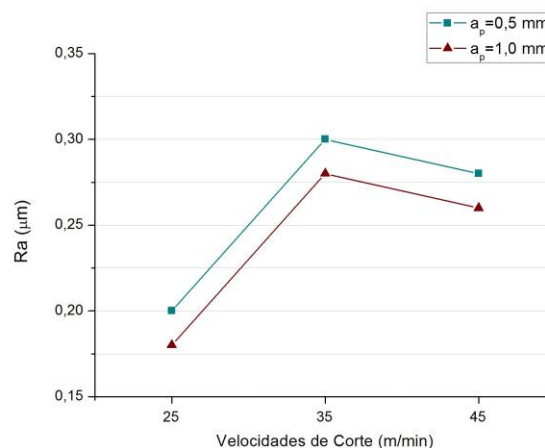


Figura 6. Resultados de Rugosidade em função das Velocidades de Corte.

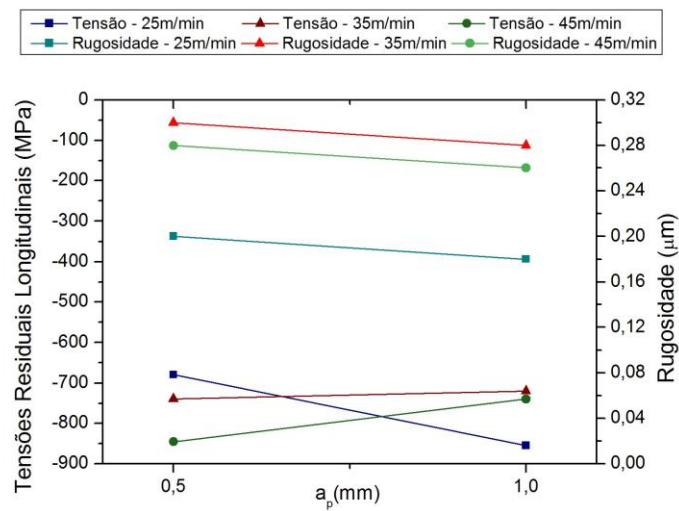


Figura 7. Resultados das tensões residuais e da rugosidade para as diferentes profundidades de corte empregadas.

3.3. Tensões Residuais

As tensões residuais foram analisadas por difração de raios-X nas direções longitudinal e transversal em relação à direção do corte, nos canais usinados. Os resultados estão apresentados nas Figuras 8 e 9 e mostram que as tensões residuais superficiais geradas no fresamento do aço maraging foram compressivas e de elevada magnitude em todas as condições e parâmetros de corte estudados. É possível também perceber que a variação da velocidade de corte teve maior influência nas tensões residuais do que a profundidade de corte.

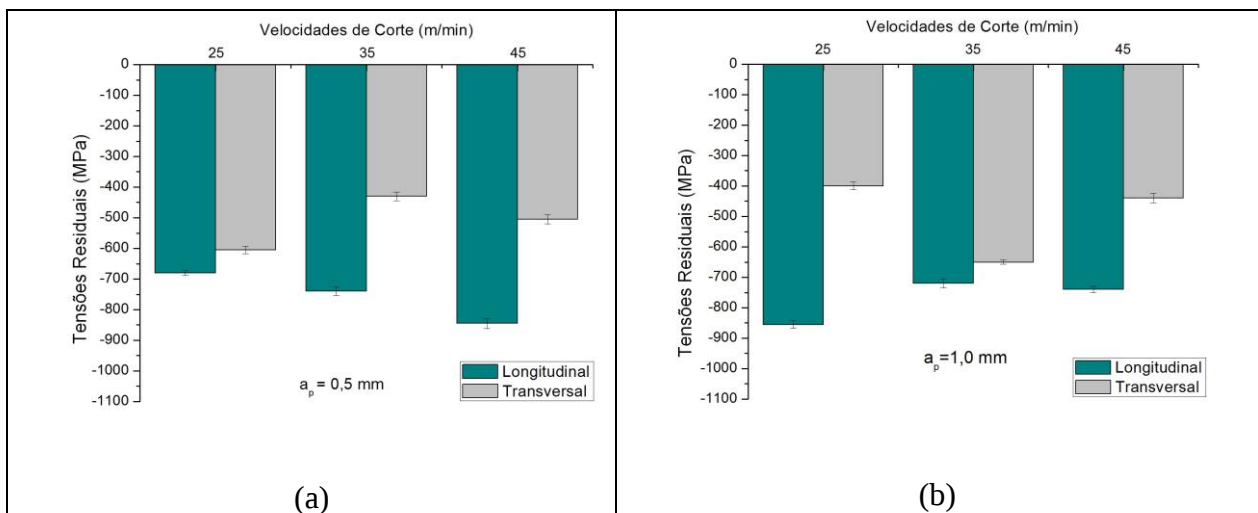


Figura 8. Tensões residuais com a variação da velocidade de corte: a) Profundidade de corte de 0,5 mm; b) Profundidade de corte de 1,0 mm.

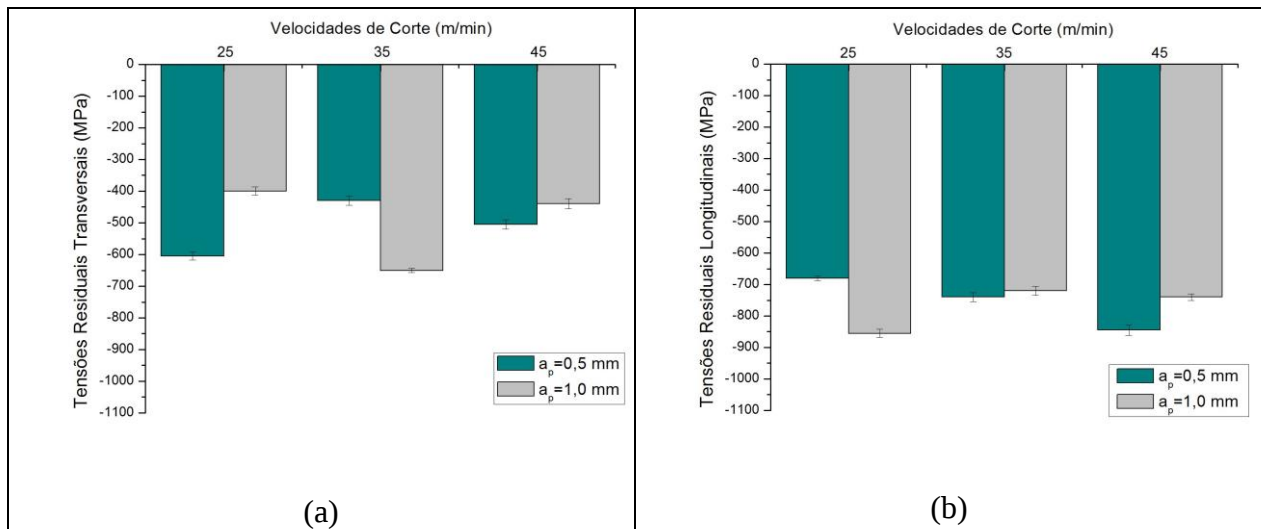


Figura 9. Tensões residuais com a variação da velocidade e profundidade de corte: a) Tensões residuais transversais; b) Tensões residuais longitudinais.

Comparando as tensões residuais longitudinais com as forças de usinagem (Figura 10) é possível perceber que, para a profundidade de corte 0,5 mm, quanto maiores as velocidades de corte e as forças de usinagem, mais compressivas são as tensões. Entretanto, para a profundidade de 1,0 mm, o aumento da velocidade de corte e da força de usinagem resultou em uma diminuição da intensidade das tensões residuais compressivas, com valores na faixa de 750 e 775 MPa, com as velocidades de 35 e 45 m/min.

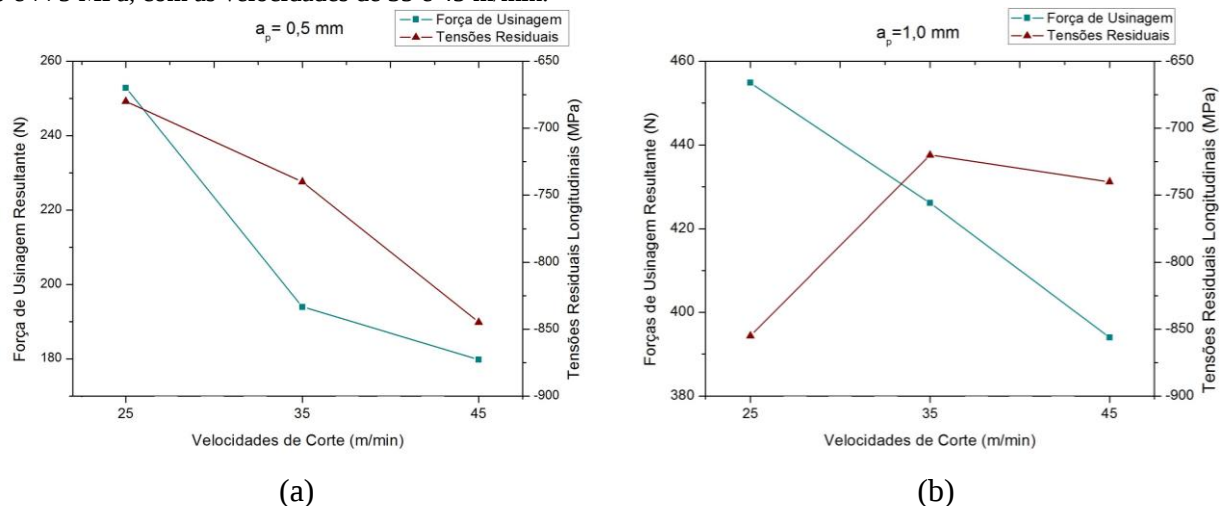


Figura 10 – Comparação das tensões residuais longitudinais com as forças de usinagem.

4. CONCLUSÕES

O presente trabalho, que teve como objetivo analisar o efeito da velocidade e da profundidade de corte nas forças de usinagem, na rugosidade de superfície e tensões residuais, permite as seguintes conclusões:

- A magnitude das forças de usinagem reduziu com o aumento das velocidades de corte;
- Dentre as velocidades empregadas, 25 m/min resultou no melhor acabamento superficial;
- As tensões residuais obtidas no fresamento de topo do aço maraging classe 300 com os parâmetros utilizados foram todas compressivas e de alta magnitude.
- A utilização da profundidade de corte de 0,5 mm juntamente com o aumento das velocidades de corte resultou em uma elevação das tensões residuais compressivas.

5. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao CNPq, à CAPES e à FAPERJ pelo suporte financeiro, que permitiu a realização do presente trabalho.

6. REFERÊNCIAS

- Fuh, K.H.; Wu C.F.; 1995, "A residual stress model for the milling of aluminum alloy (2014-T6)", Journal of Materials Processing Technology, 87-105.
- James M.N.; 2010, "Residual stress influences in mechanical engineering", XVIII Congresso Nacional de Engenharia Mecânica.
- Lalwani, D.I.; Mehta, N.K.; Jain, P.K.; 2008, "Experimental investigations of cutting parameters influence on cutting forces and surface roughness in finish hard turning of MDN 250 steel", Journal of Materials Processing Technology 2006, pp. 167 - 179.
- Lazoglu, I., Ulutan, D., Alaca B.E., Engin S., Kaftanoglu B.; 2008, "An enhanced analytical model for residual stress prediction in machining", CIRP Annals - Manufacturing Technology 57, 81-84.
- Macherauch, E., Kloos, K. H., 1987, "Origin, Measurements and Evaluation of Residual Stress in Science and Technology", Ed. By E. Macherauch, V. Hauk, DGM Verlag.
- Martins, T.R.B.; 2015, "Influência do tratamento térmico de envelhecimento na microdureza e na suscetibilidade à fragilização por hidrogênio do aço maraging classe 300", Dissertação de Mestrado, UFF.
- Masmiatin, N.; Sarhan, A.A.D.; 2015, "Optimizing cutting parameters in inclined end milling for minimum surface residual stress - Taguchi approach".; Measurement, 267-275.
- Navas, G.V.; Gonzalo, O.; Bengoetxea, I.; 2014, "Effect of cutting parameters in the surface residual stress generated by turning in AISI 4340 steel", International Journal of Machine Tools & Manufacture 61, pp. 48-57, 2012.
- Varela P.I.; Rakurty C.S.; Balaji A.K.; 2014 "Surface integrity in hard machining of 300M steel: Effect of cutting-Edge geometry on machining induced residual stress".
- Kosaraju, S.; Chandraker, S.; 2015, "Taguchi analysis on cutting force and surface roughness in turning MDN 350 steel", Material Today Proceedings 2, pp. 3388-3393.

7. RESPONSABILIDADE AUTURAL

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo deste trabalho.

EXPERIMENTAL INVESTIGATIONS OF RESIDUAL STRESS, CUTTING FORCES AND SURFACE ROUGHNESS IN MILLING OF MARAGING CLASS 300.

Carolina Paiva Nascimento, carolina.paiva6@gmail.com¹

Mateus Campos Martins, mateuscamos@id.uff.br¹

Juan Manuel Pardal, juanpardal@vm.uff.br¹

Sérgio Souto Maior Tavares, sstavaress@terra.com.br¹

Anna Carla Araujo, anna@mecanica.uff.br²

Maria Cindra Fonseca, mcindra@vm.uff.br¹

¹Universidade Federal Fluminense, Rua passo da pátria, 156, São Domingos CEP 24210-240, Niterói-RJ,

²Universidade Federal do Rio de Janeiro, Centro de Tecnologia, Bloco G – Sala 204 Gabinete 14, Cidade Universitária, RJ.

Abstract. The development of technology and metallurgical processes provided the emergence of new high-strength materials, such as the maraging steel. These steels are still poorly studied from the point of view of proper selection of machining parameters and generation of residual stress during this process. Nevertheless, its extraordinary combination of strength and toughness justify its relevance for the industries, particularly in aeronautical sector. This work aims to study the residual stresses, the machining forces and surface quality generated in the steel end milling of maraging 300 steel, using different cutting parameters. Residual stresses were analyzed by X-ray diffraction technique, using $\sin^2\psi$ method. Obtained results present compressive residual stresses with high magnitude and the parameters that have most influence on the behavior of residual stresses were cut depth and speed.

Keywords: Machining, maraging steel 300, Residual stresses, X-ray Diffraction.