

ESTUDO DAS TENSÕES RESIDUAIS NO TORNEAMENTO DO AÇO AISI 4340 COM DIFERENTES PARÂMETROS DE CORTE

Maria Cindra Fonseca, mcindra@vm.uff.br

Mateus Campos Martins, mateuscampos@id.uff.br

UFF – Universidade Federal Fluminense - Departamento de Engenharia Mecânica/PGMEC, Rua Passo da Pátria, 156, São Domingos, Niterói, RJ, Brasil, e-mail: mcindra@vm.uff.br

Resumo: Nos processos de fabricação por usinagem a combinação dos efeitos gerados pelo esforço mecânico do contato da ferramenta com a peça usinada, a geração de calor por atrito e as transformações de fases é responsável pelo surgimento das tensões residuais. Entretanto, os parâmetros de corte utilizados na usinagem influenciam de maneira distinta na integridade superficial do material usinado, resultando em diferentes estados de tensões residuais. Dessa forma, o presente trabalho tem como objetivo avaliar a influência da variação dos parâmetros de avanço e profundidade de corte no comportamento das tensões residuais e no acabamento superficial no torneamento do aço AISI 4340. A análise das tensões residuais foi feita por difração de raios-X pelo método do $\sin^2\Psi$. Os resultados mostraram que o aumento do avanço impacta diretamente na formação de maiores tensões residuais superficiais trativas, enquanto que o emprego de menores avanços e profundidades de corte gera melhor acabamento superficial. Além disso, o perfil das tensões residuais em profundidade mostrou que as tensões trativas superficiais de elevada magnitude decrescem rapidamente nas camadas subsuperficiais, se tornando compressivas a 20 μm para algumas condições de corte.

Palavras-chave: Torneamento, tensões residuais, difração de raios-X, aço AISI 4340

1. INTRODUÇÃO

O AISI 4340 é um aço de ultra-alta resistência, com médio teor de carbono e tratável termicamente, muito utilizado para aplicações estruturais, componentes usinados, componentes do setor automobilístico, vasos de pressão em instalações nucleares e em aplicações aeroespaciais, como em trem de pouso de aviões. O vasto campo de aplicação deste aço se deve à sua alta tenacidade, elevada resistência mecânica e à fadiga (Bhattacharya *et al*, 2010 e Lee *et al*, 1997).

Para os componentes usinados, a integridade superficial afeta a vida em serviço e a estabilidade dimensional, por isso, é extremamente importante o controle do estado superficial final do produto fabricado. Os fatores que caracterizam a integridade superficial de uma peça usinada são as tensões residuais, rugosidade, dureza e microestrutura do material (Navas *et al*, 2012). Na usinagem, as tensões residuais são introduzidas principalmente pela deformação plástica e pela geração de calor produzida na interação entre a ferramenta de corte e a peça usinada. Assim sendo, os efeitos térmicos são aliados às grandes taxas de deformação plástica gerando complexos campos de tensão, dependentes e interdependentes dos parâmetros usados nos diferentes processos de usinagem (Liang e Su, 2007). Por sua vez, tanto a deformação plástica quanto a geração de calor dependem das propriedades do material, assim como os parâmetros de corte utilizados no processo, a geometria da ferramenta e a utilização ou não de fluido de corte.

As tensões residuais originadas nos processos de usinagem têm influência direta sobre o comportamento funcional dos componentes usinados. Portanto, o conhecimento do estado de tensões residuais nos componentes usinados tem enorme importância, pois se as tensões residuais superficiais forem trativas e o componente submetido a carregamentos cíclicos, trincas podem ser nucleadas prematuramente, reduzindo a vida útil da peça (Outeiro *et al*, 2006; Díaz *et al*, 2012).

Além das tensões residuais, a rugosidade tem um efeito significativo na vida em fadiga e em outras propriedades superficiais de uma peça. Em muitos casos, a rugosidade final é um dos principais critérios de aceitação de um produto usinado e o acabamento superficial é altamente influenciado pela variação do avanço na usinagem (Hassanpour *et al*, 2016 e Das *et al*, 2013).

O presente trabalho tem como objetivo avaliar a influência da variação dos parâmetros de avanço e profundidade de corte, empregados no torneamento de amostras de aço AISI 4340, no comportamento das tensões residuais e no acabamento superficial.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

No presente trabalho foram estudadas amostras do aço AISI 4340 produzido pela Aços Villares, na forma de barra redonda de 50,8 mm de diâmetro, cuja composição química e propriedades mecânicas, informadas pelo fabricante, estão apresentadas na Tab. (1) e Tab. (2).

Tabela 1. Composição química do aço AISI 4340 (% em peso).

C	Mn	Si	P	S	Cr	Ni	Mo	V	Co	Al	Cu
0,39	0,72	0,25	0,01	0,025	0,75	1,72	0,24	0,01	0,01	0,05	0,04

Tabela 2. Propriedades mecânicas do aço AISI 4340.

σ_{LE} (MPa)	σ_{LR} (MPa)	Alongamento (%)	Redução de área (%)	Dureza Brinell (HB)
765	960	14,8	39,5	302

Para a usinagem das amostras foi usado o torno CNC Vekker LVK – 175, com fixação por contra ponta rotativa e uso de fluido de corte emulsionável Syncut Bio 600 em jorro, para resfriamento e lubrificação da zona de corte. Insertos de metal duro, modelo TNMG 160404FN KCP05, foram utilizados com ângulo de incidência de 0° e recobrimento MTCVD – TiCN-Al₂O₃.

Três amostras do aço AISI 4340, com Ø 50 x 125 mm, foram previamente usinadas para que fosse obtido um diâmetro de 45 mm, com três regiões de 30 mm de comprimento (regiões a, b, c). A Fig. (1) apresenta as dimensões principais das amostras pré-usinadas.

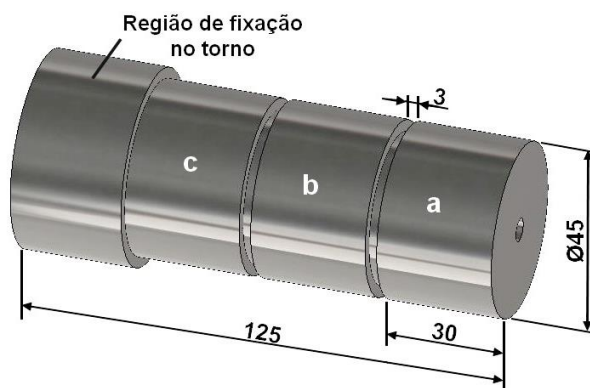


Figura 1. Amostra pré-usinada (unidade: mm).

Após a pré-usinagem foi realizado um tratamento térmico de alívio de tensões, a 625 °C com tempo de encharque de 2 horas e resfriamento ao ar, para garantir que antes da usinagem definitiva não houvesse um estado prévio de tensões residuais que influenciasse no resultado final.

Por fim, as amostras foram usinadas com diferentes parâmetros de corte, conforme indicado na Tab. (2), mantendo a velocidade de corte constante em 200 m/min, com avanço e profundidade de corte variáveis.

Tabela 2. Parâmetros de corte utilizados no torneamento das amostras.

Amostras		Avanço (mm/rot)	Profundidade de corte (mm)	Velocidade de corte (m/min)
A1	a	0,05	0,4	200
	b	0,10		
	c	0,15		
A2	a	0,05	0,8	
	b	0,10		
	c	0,15		
A3	a	0,05	1,2	
	b	0,10		
	c	0,15		

A rugosidade das amostras após o torneamento foi analisada usando um rugosímetro da marca Taylor Hobson Brasil, modelo Surtronic25. A medição da rugosidade média (R_a) foi feita em 10 regiões distintas de cada amostra no sentido de avanço da ferramenta de corte, conforme mostrado na Fig.(2).



Figura 2. Medição da rugosidade média da amostra.

A análise das tensões residuais foi realizada com analisador de tensões Xstress3000, apresentado na Fig. (3), por difração de raios-X e pelo método do $\sin^2\Psi$, usando radiação $\text{CrK}\alpha$ ($\lambda = 2,29092 \text{ \AA}$) e difratando o plano (211) da ferrita. A Figura 4 mostra os pontos de medições das tensões residuais superficiais, realizadas nas direções longitudinal (L) e tangencial (T) à direção do avanço da ferramenta, a 0 e a 180° em cada amostra. Sendo assim, as tensões residuais foram medidas em dois locais diferentes em cada condição de usinagem.

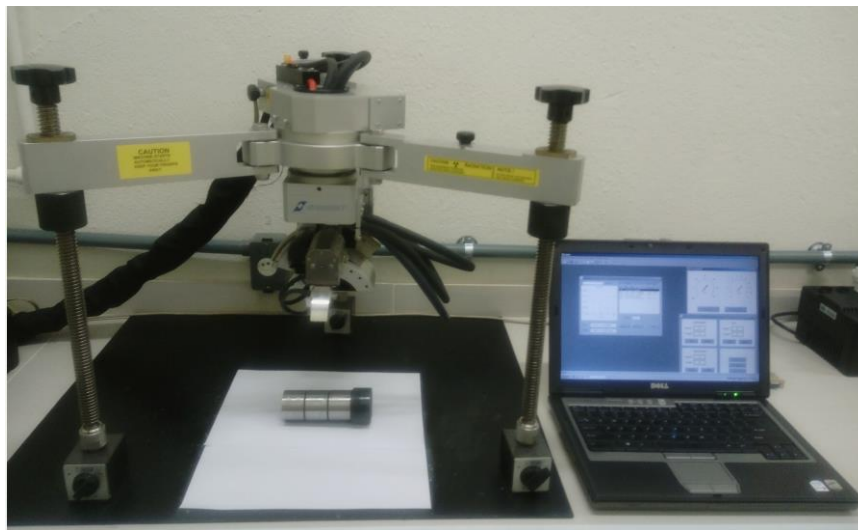


Figura 3. Analisador de tensões Xstress3000

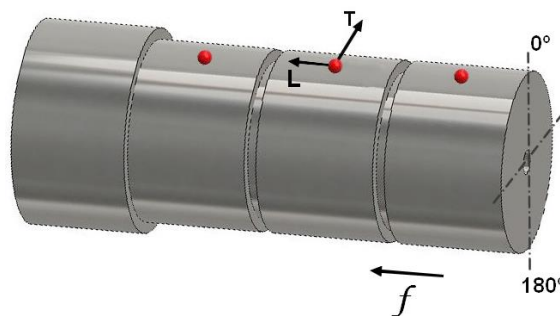


Figura 4. Locais e direções de medição das tensões residuais nas amostras.

Para a análise das tensões residuais em profundidade foi utilizado o método de remoção de camadas seguido de medição por difração de raios-X, com polimento eletrolítico, usando uma solução saturada à base de cloreto de sódio e glicerina bidestilada. A espessura das camadas micrométricas removidas foi aferida por relógio comparador digital. As amostras que tiveram as tensões residuais analisadas em profundidades foram aquelas usinadas com maior avanço (0,15 mm/rot).

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados das tensões residuais superficiais medidas nas direções longitudinal e tangencial estão apresentados nas Figs. (5) e (6).

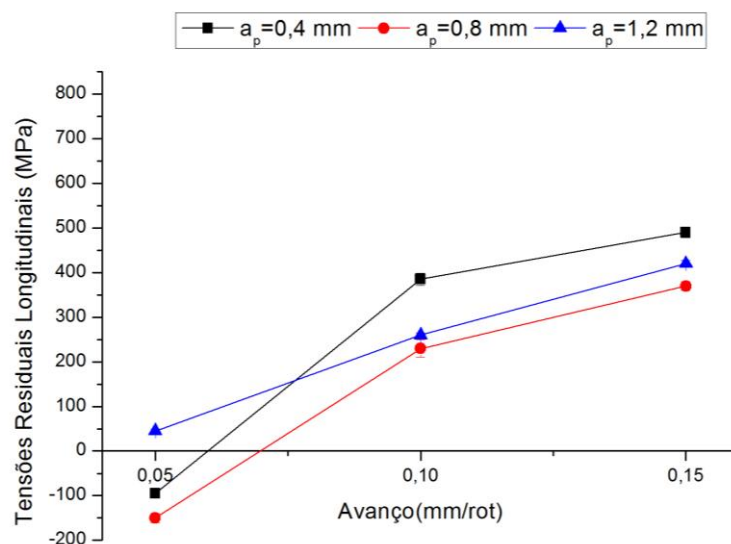


Figura 5. Tensões residuais longitudinais.

Como pode ser observado na Fig. (5), somente o avanço de 0,05 mm/rot gerou tensões residuais compressivas nas amostras com profundidade de corte de 0,4 e 0,8 mm. Porém, coerente com outros trabalhos de usinagem envolvendo torneamento com fluido de corte (Capello, 2004; Leppert & Peng, 2009), conforme houve o aumento do avanço, as tensões residuais se tornaram trativas. Além disso, para as profundidades de corte de 0,4 mm e 1,2 mm foram obtidos resultados de tensões residuais sempre maiores do que na amostra com $a_p = 0,8$ mm.

Na direção tangencial, Fig. (6), as tensões residuais encontradas foram de magnitudes bem mais elevadas do que as tensão longitudinal, chegando a atingir valores de aproximadamente 800 MPa (ligeiramente acima do limite de escoamento do material) para a amostra com avanço de 0,15 mm/rot e profundidade de corte de 0,4 mm. Entretanto, com a profundidade de 0,8 mm as tensões residuais tangenciais, apesar de trativas, tiveram os menores valores para todos os avanços utilizados, comportamento similar ao das tensões residuais longitudinais. Da mesma forma que as tensões longitudinais, a melhor condição de tensão residual ocorreu com avanço de 0,05 mm/rot (cerca de 80 MPa).

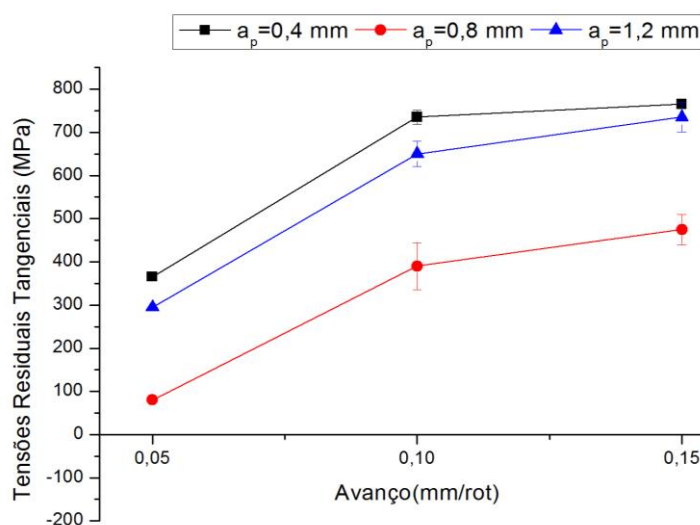


Figura 6. Tensões residuais tangenciais.

Dessa forma, é possível perceber que a utilização da profundidade de corte de 0,8 mm resultou em menores valores de tensões residuais, tanto no sentido longitudinal quanto no sentido tangencial, que apesar de trativas, seriam mais benéficas para a vida em serviço do material, até mesmo em comparação com as amostras usinada com menor profundidade de corte ($a_p = 0,4$ mm).

Diversos autores (Capello, 2004; Leppert & Peng, 2009), observaram em seus trabalhos comportamento semelhante para o aumento das tensões residuais trativas conforme o avanço é elevado. Entretanto, poucos trabalhos discutem o efeito principal que gera esse comportamento das tensões. Tsuchida *et al* (1975), explicaram que esse comportamento é devido à maior influência da ocorrência das deformações plásticas trativas no material que antecede o ponto de cisalhamento. Além disso, conforme o avanço aumenta, a condição de corte se torna mais severa e a interface da ferramenta com a amostra usinada fica menos tempo submetida ao efeito refrigerante do fluido de corte, ocasionando maior geração de calor e consequentemente geração de maiores tensões trativas devido ao efeito térmico.

Os resultados das tensões residuais medidos em profundidade nas amostras com avanço de 0,15 mm/rot estão apresentados na Fig. (7). Percebe-se que as tensões residuais longitudinais em todas as amostras são trativas na superfície, entretanto, após uma pequena profundidade ($\sim 15 \mu\text{m}$) a natureza dessas tensões se torna compressiva. Esse resultado está de acordo com alguns experimentos realizados por Warren e Guo (2009). Além disso, é possível observar que quanto menor a profundidade de corte utilizada na usinagem, mais superficial é a camada com tensões residuais trativas no material.

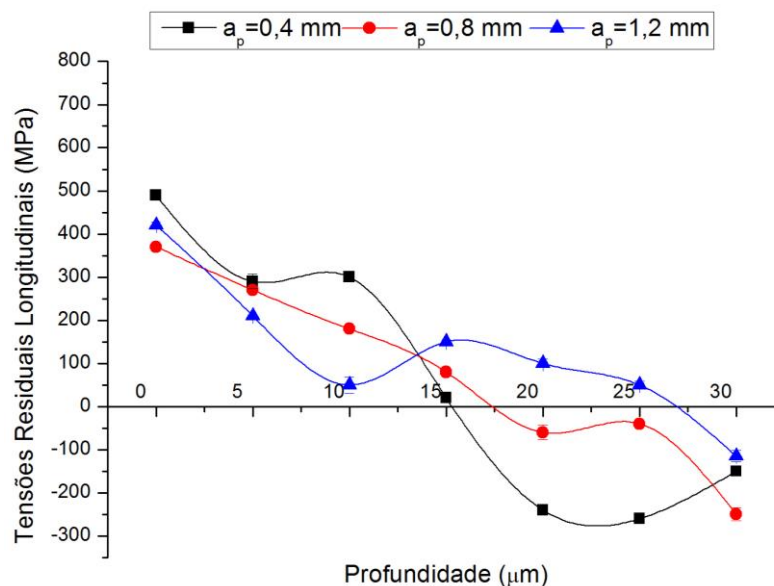


Figura 7. Tensões residuais longitudinais medidas em profundidade.

Para os resultados de rugosidade média superficial, apresentados na Fig. (8), as amostras usinadas com profundidades de corte de 0,4 mm e 1,2 mm tiveram um comportamento semelhante. Entretanto, para a profundidade de 0,8 mm a rugosidade média cresceu de maneira linear com o aumento do avanço. Além disso, para avanços menores, a profundidade de corte de 0,8 mm resultou em maiores valores de rugosidade, mas para o avanço de 0,15 mm/rot com essa profundidade obteve-se o melhor acabamento superficial entre todas as profundidades de corte utilizadas. Debnath *et al*, (2016) verificaram que, apesar de possuir influência menor que outros parâmetros, a profundidade de corte gera uma diferença nos resultados de rugosidade superficial de amostras torneadas, coerente com os resultados encontrados neste trabalho.

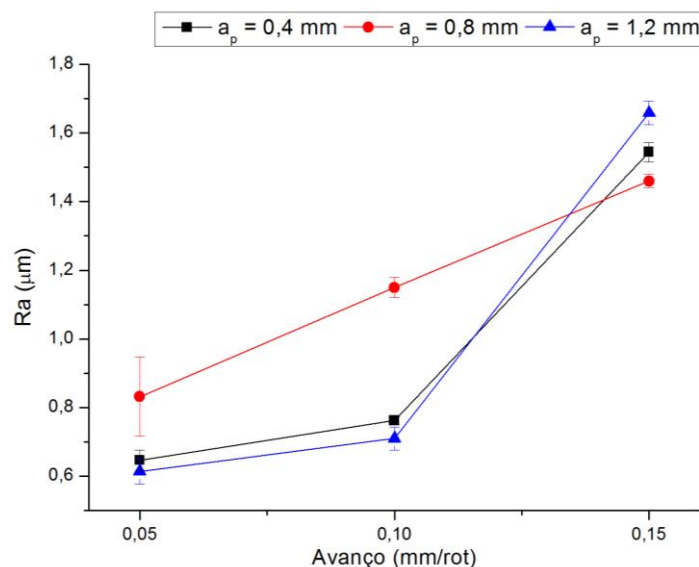


Figura 8. Rugosidade média superficial.

4. CONCLUSÕES

O presente trabalho, que teve como objetivo avaliar a influência da variação dos parâmetros de avanço e profundidade de corte no comportamento das tensões residuais e no acabamento superficial no torneamento do aço AISI 4340, permite as seguintes conclusões:

1. As tensões residuais tangenciais apresentaram magnitudes muito mais elevadas do que as tensões longitudinais em todas as amostras usinadas.
2. Maiores valores de avanço geraram maiores valores de tensões residuais trativas em ambas as direções analisadas.
3. A utilização da profundidade de corte de 0,8 mm proporcionou um estado de tensões residuais menos deletério na superfície do material do que as profundidades de 0,4 e 1,2 mm.
4. A análise das tensões residuais em profundidade permitiu concluir que os altos valores de tensões residuais superficiais trativas mudam de natureza em uma pequena profundidade, se tornando compressivas na direção longitudinal.
5. A análise da rugosidade mostrou que conforme houve aumento do avanço, a rugosidade média das amostras aumentou. Entretanto, para avanços menores, a profundidade de corte de 0,8 mm proporcionou um pior acabamento superficial entre todas as condições utilizadas, mas com o avanço de 0,15 mm/rot foi a condição que apresentou melhor acabamento superficial.

5. AGRADECIMENTOS

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

6. REFERÊNCIAS

- Bhattacharya, S., Dinda, G.P., Dasgupta, A.K., Mazumder, J., 2010, "Microstructural evolution of AISI 4340 steel during Direct Metal Deposition process", *Materials Science and Engineering A* 528, pp.2309-2318, Detroit, USA.
- Capello, E., "Residual stresses in turning Part I: Influence of process parameters", 2004, *Journal of Materials Processing Technology*, Milano, Itália.
- Das, S. R., Kumar, A., Dhupal, D., 2013, "Effect of Machining Parameters on Surface Roughness in Machining of Hardened AISI 4340 Steel Using Coated Carbide Inserts", *International Journal of Innovation and Applied Studies*, National Institute of Technology, Jamshedpur, Jharkhand, India.
- Debnath, S., Reddy, M.M., Yi, Q.S., 2016, "Influence of cutting fluid conditions and cutting parameters on surface roughness and tool wear in turning process using Taguchi method", *Measurement*, Malásia.
- Díaz, F., Mammana, C., Guidobono, A., 2012, "Evaluation of Residual Stresses Induced by High Speed Milling Using an Indentation Method", *Modern Mechanical Engineering*, Universidad Tecnológica Nacional, Rafaela, Argentina.
- Hassanpour, H., Sadeghi, M.H., Rasti, A., Shajari, S., 2016, "Investigation of surface roughness, microhardness and white layer thickness in hard milling of AISI 4340 using minimum quantity lubrication", *Journal of Cleaning Production*, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran.
- Leppert, T., Peng, R. L., 2009, "Surface Residual Stresses in Dry Turning of 0,45 % C Steel", *International Centre for Diffraction Data*, Bydgoszcz, Polónia.
- Lee "Mechanical properties and microstructural features of AISI 4340 high-strength alloy steel under quenched and tempered conditions"
- Liang, S.Y., Su J.-C., 2007, "Residual Stress Modeling in Orthogonal Machining". *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, vol. 56, Issue 1, 65-68.
- Navas, V.G., Gonzalo, O., Bengoetxea, 2012, "Effect of cutting parameters in the surface residual stresses generated by turning in AISI 4340 steel", *International Journal of Machine Tool & Manufacture*, Fundación TEKNIKER-IK4, Guipúzcoa, Spain.
- Outeiro J.C., Umbrello D., M'Saoubi R., 2006, "Experimental and numerical modelling of the residual stresses induced in orthogonal cutting of AISI 316L steel" *International Journal of Machine Tools & Manufacture* 46 1786–1794.
- Tsuchida, K., Kawada, Y., Kodama, S., 1975, "A Study on the Residual Stress Distributions by Turning", *Bulletin of the Japan Society of Mechanical Engineers*, Japan.
- Warren, A. W., Guo, Y. B., Characteristics of residual stress profiles in hard turned vs. ground surface with and without a white layer", 2009, Alabama, USA.

7. DIREITOS AUTORAIS

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo do material impresso incluído no trabalho.

STUDY OF RESIDUAL STRESS IN TURNING OF AISI 4340 STEEL WITH DIFFERENT CUTTING PARAMETERS

Maria Cindra Fonseca, mcindra@vm.uff.br

Mateus Campos Martins, mateuscampos@id.uff.br

UFF – Universidade Federal Fluminense - Departamento de Engenharia Mecânica/PGMEC, Rua Passo da Pátria, 156, São Domingos, Niterói, RJ, Brasil, e-mail: mcindra@vm.uff.br

Abstract: *In machining manufacturing processes the combination of effects generated by the contact pressure between the workpiece and the tool, the heat generation by friction and phase transformations is responsible for the generation of residual stresses. However, the cutting parameters used in the machining processes contribute to the surface integrity of the machined material in different ways, resulting in different states of residual stresses. Thus, the purpose of this work is to evaluate the influence of the variation of feed and depth of cut on residual stresses and the surface roughness after the AISI 4340 steel turning. The residual stresses analysis were realized by X-ray diffraction technique with the $\sin^2\Psi$ method. The results showed that higher feeds generate higher residual stresses values, while lower feeds and depths of cut results in a better surface roughness. In addition, the depth profile showed that the high tensile residual stresses on surface decrease significantly for a thin depth, becoming compressive for 20 μm in some cutting conditions.*

Key-words: *Turning, residual stresses, X-rays diffraction technique, AISI 4340 steel*