



Análise das tensões residuais e integridade superficial no fresamento de topo de aço SAE 4340 sob diferentes parâmetros de corte **Analysis of residual stresses and surface integrity in milling of SAE 4340 steel under different cutting parameters**

Paulo Cesar Freitas

Luísa Barros de Mendonça

Hector Reynaldo Costa

Maria da Penha Cindra Fonseca

Tatiane de Campos Chuvas

Resumo: A integridade superficial dos componentes usinados afeta diretamente sua estabilidade dimensional e, conseqüentemente, sua vida útil. Por esta razão, é extremamente importante controlar o estado da superfície final das peças após sua fabricação. Entre os principais fatores que afetam a vida útil de uma peça usinada podem ser citadas as tensões residuais, rugosidade, dureza e microestrutura. Particularmente, as tensões residuais desempenham um papel fundamental na integridade de peças usinadas porque estas podem se somar as tensões aplicadas durante o serviço e, dessa forma pode ocorrer perda de resistência à fadiga das peças, podendo resultar em falha durante a vida em serviço. As tensões residuais geradas durante a usinagem dependem principalmente do material da peça, do tipo e geometria da ferramenta e dos parâmetros de usinagem, tais como, velocidade de corte, avanço e profundidade de corte. Este trabalho investiga a influência dos parâmetros de corte, a saber: a velocidade de corte e profundidade de corte, sobre a integridade superficial de peças usinadas de aço SAE 4340, durante o fresamento de topo, com o uso de ferramentas de metal duro. Os resultados mostraram que as tensões residuais têm tendência trativa para as condições de corte aplicadas, porém a magnitude das mesmas aumenta com o aumento da velocidade de corte.

Palavras-chave: Fresamento; integridade superficial; tensões residuais; difração de raios-X.

Abstract: The surface integrity of the machined components directly affects their dimensional stability and, consequently, their service life. For this reason, it is extremely important to control the condition of the final surface of the parts after manufacture. Among others, the main factors that affect the service life of a machined part are the residual stresses, surface roughness, hardness and microstructure. Particularly, residual stresses is fundamental in the integrity of machined parts because these can be added to the stresses applied during the service and, decrease the fatigue strength, leading to possible failure during the life service. Residual stresses generated during machining depend on the workpiece material, tool type and geometry, and machining parameters such as cutting speed, feed rate and depth of cut. This work intends to study the possible influences of the cutting parameters: cutting speed and depth of cut, on the surface integrity of SAE 4340 steel during top milling, with the use of cemented carbide tools. The results showed that the residual stresses have a traction tendency for the applied cutting conditions, but the magnitude of the stresses increases with the increase of the cutting speed.

Keywords: Milling; surface integrity; residual stresses; X-Ray Diffraction.

1. Introdução

As operações de usinagem são de muita relevância no âmbito dos processos de fabricação mecânica, principalmente nas indústrias automobilísticas, de eletrodomésticos e máquinas em geral. Em particular, o fresamento pode ser destacado como uma das operações de usinagem mais versáteis para a produção de diferentes superfícies. Essa versatilidade é devida, principalmente, à grande variedade de geometrias que suas ferramentas podem apresentar, propiciando assim a geração de inúmeras peças (DINIZ *et al.*, 2001). Contudo, as propriedades e qualidade da superfície impactam sobre o desempenho do produto, pois mudanças, em qualquer aspecto na chamada integridade superficial da peça, podem ocasionar algumas particularidades, tais como, aceleração do processo de fadiga, resistência a abrasão e a corrosão, além do surgimento e propagação de trincas (GORGULHO & LIMA, 2013; VIEIRA, 1998).

O termo integridade superficial é utilizado para tratar dos aspectos da superfície da peça usinada, onde são incluídos acabamento superficial (como a rugosidade), danos metalúrgicos e tensões residuais. Por esta razão, é extremamente importante controlar o estado da superfície das peças após a fabricação por usinagem. Por esta razão, a seleção cuidadosa dos parâmetros de corte corretos de usinagem tem grande influência na obtenção de uma boa integridade superficial (SHAW, 1994).

Em particular, tensões residuais, geradas nos processos de fabricação, como a usinagem, podem ser benéficas ou prejudiciais para a vida em serviço do componente, em função da sua natureza (trativa ou compressiva) e magnitude (NAVAS *et al.*, 2012). Em usinagem, as tensões residuais são resultantes, basicamente, das deformações plásticas, originadas das forças de corte que atuam sobre a peça, do aquecimento não uniforme da peça e de possíveis variações volumétricas devido às mudanças de fase do material (CAPELLO, 2005). As tensões residuais produzidas durante a usinagem de um determinado tipo de material estão ligadas principalmente ao material da peça, ao tipo e geometria da ferramenta e aos parâmetros de usinagem, tais como, velocidade, avanço e profundidade de corte. Assim, diversos autores, como EI-KHABEERY & FATTOUH (1989), SEGAWA *et al.* (2004), MAUROTTO *et al.* (2014) e FELHÖ *et al.* (2015), desenvolveram, ao longo do tempo, pesquisas no âmbito das tensões residuais geradas em processos de usinagem, particularmente, no fresamento. Segundo LIMA (2008), FARIAS (2009) e MAUROTTO *et al.* (2014), no fresamento de topo uma deformação plástica considerável é produzida por meio de operações padrão, assim as tensões residuais tendem a ser compressivas. Entretanto, valores de tensão residuais encontrados na superfície analisadas podem apresentar uma tendência trativa com o aumento de velocidade de corte, pois com esse aumento o efeito térmico se torna dominante.

O aço SAE 4340 é um aço para beneficiamento com elevada temperabilidade, utilizado na fabricação de diferentes componentes mecânicos, principalmente, quando se deseja uma combinação de resistência mecânica e resistência à fratura. Esse material também possui elevada resistência à fadiga e, dependendo do teor de carbono, a dureza na condição temperada varia de 50 a 60 HRc (CARDOSO, 2011). A microestrutura desse aço é predominantemente martensítica. Contudo, dependendo dos tratamentos térmicos aplicados há possibilidade de formação de outras fases como ferrita, bainita e austenita retida (LEE & SU, 1999).

O presente trabalho apresenta um estudo sobre a influência dos parâmetros de corte (velocidade de corte e profundidade de corte) na natureza e na magnitude das tensões residuais geradas no processo de fresamento de topo de SAE 4340, com o uso de ferramentas de metal duro. Complementarmente foram obtidos dados de rugosidade Ra após a usinagem.

2. Materiais e Métodos

2.1. Material

O aço estudado neste trabalho foi o aço SAE 4340 com tratamento térmico de alívio de tensão, apresentando dureza de 30 HRc, de acordo com o fabricante. A composição química do material, informada pelo fabricante, está descrita na Tabela 1.

Tabela 1: Composição química do aço SAE 4340 informada pelo fornecedor (em % de 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

2.2. Preparação das amostras

Para a obtenção das amostras foi utilizada uma barra de 500 mm de comprimento com 2” de diâmetro. Foram produzidas 4 peças com altura de 30mm, conforme Figura 1. Em cada peça foram usinadas as duas faces. Cada peça recebeu uma numeração de 1 a 4 e cada face, uma denominação, A ou B.

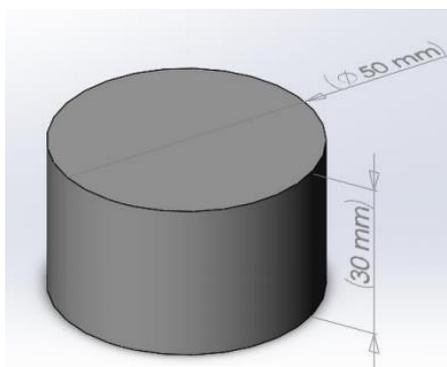


Figura 1: Disco em aço SAE 4340 (Ø 50 x 30 mm).

2.3. Fresamento

O fresamento foi realizado a seco em uma fresadora Diplomat 3001, modelo FVF 2000 e foram estudados dois parâmetros de corte: velocidade de corte e profundidade de corte, totalizando 4 condições, conforme apresenta a Tabela 2. Desta forma, o fresamento das amostras foi baseado em um experimento fatorial de 4 combinações. Para cada condição foram realizados 2 testes, totalizando 8 amostras.

Tabela 2: Condições de corte das amostras usinadas.

Condição	V_c [m/min]	a_p [mm]
1	40	0,4
2	40	0,6
3	50	0,4
4	50	0,6

A usinagem foi realizada com uma fresa intercambiável de 20 mm de diâmetro com duas arestas de corte, avanço por dente de 0,278 mm/dente e utilizando pastilhas de metal duro XDMT090308HX PA120 com raio da ponta de 0,8 mm. Cada condição de corte utilizou a pastilha nova, visando minimizar os efeitos do desgaste sobre a geração das tensões residuais. Após usinagem de cada face (A e B) as medidas de rugosidade e as tensões residuais foram realizadas nos canais formados.

Todas as usinagens foram realizadas a seco. O corte a seco, mesmo sendo mais severo tem como principal vantagem a exclusão de um consumível nas operações de usinagem (o fluido de corte), que pode vir a reduzir os custos de operação e diminuição dos impactos ambientais, pois os fluidos de corte são altamente contaminantes. Contudo, a usinagem a seco é relacionada a um maior desgaste da ferramenta, que resulta em uma diminuição da vida útil da mesma, aumentando os gastos com pastilhas e insertos.

2.4. Análise das Tensões Residuais

As medições de tensões residuais foram realizadas através da técnica de tensometria por difração de raios-X. Foi usado um analisador de tensões da Stressrad, utilizando os seguintes parâmetros: $Cr\alpha$ com $\lambda=2,2809\text{\AA}$, difratando o plano cristalográfico (211) da ferrita; ângulo de difração de ferrita (2θ): 156,2°; ângulos Ψ : 0°, 21°, 30°, 38°, 45°: tempo de exposição ao raio-X: 35 s para cada ângulo Ψ . Para cada amostra foram analisadas as tensões residuais sentido longitudinal (L) e transversal (T) ao avanço, conforme detalha a Figura 2.

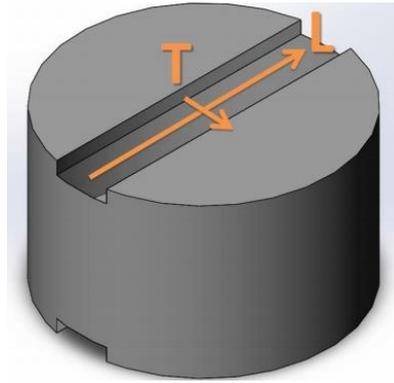


Figura 2: Direções de análise das tensões residuais nas amostras.

2.5. Análise da Rugosidade Ra

As medições de rugosidade foram realizadas utilizando o rugosímetro Taylor Hubson. A medida realizada foi a rugosidade média (Ra), com os seguintes parâmetros: comprimento de medição de $L = 4,00\text{mm}$ e comprimento de amostragem de $La = 0,8\text{mm}$. A ponta do apalpador tem raio de $5\mu\text{m}$, possibilitando a obtenção de uma resolução de $0,01\mu\text{m}$, com precisão de 2% do valor medido. A rugosidade Ra foi medida 5 vezes em cada amostra.

3. Resultados e Discussões

3.1. Tensões Residuais

As tensões residuais (TR) superficiais foram analisadas, primeiramente, nas peças após seu corte e tratamento térmico de alívio de tensões (TTAT), obtendo um valor médio de -21MPa para a tensão longitudinal e -53MPa para a tensão transversal, com erro de aproximadamente 15MPa . Após a usinagem das amostras, as tensões residuais foram medidas na longitudinal (L), sentido do avanço, e na transversal (T). A Figura 3 mostra os valores de tensões residuais na direção longitudinal. Com base no gráfico é possível observar que para maiores valores de velocidade de corte as tensões residuais tendem a ter valores maiores em tração, esse resultado diverge do encontrado na literatura (MAUROTTO *et al.*, 2014), no qual as tensões residuais diminuíram com o aumento da velocidade de corte. Possivelmente essa diferença de resultado se deve ao fato de Maurotto *et al.* (2014) terem realizado a usinagem em um material diferente (aço 304L) e utilizando fluido de corte. Uma amostra na condição 1 apresenta ainda tensões compressivas. Neste caso, o valor de profundidade de corte pode ter sido determinante.

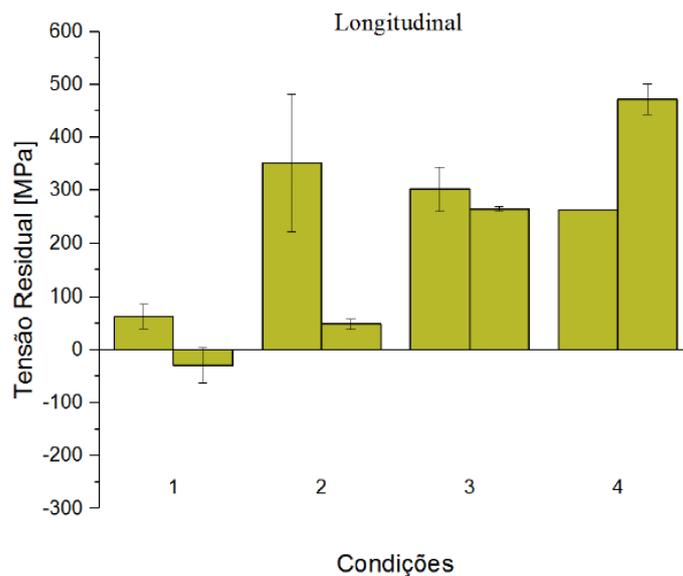


Figura 3: Tensões residuais medidas na direção longitudinal.

Analisando a Figura 4, que apresenta os dados de tensões residuais na direção transversal ao avanço da ferramenta de corte, é possível verificar novamente que a velocidade de corte é um dos principais fatores na geração de tensões residuais. Nota-se que para valores menores de velocidade (40 m/min), condições 1 e 2, a tendência é uma natureza compressiva.

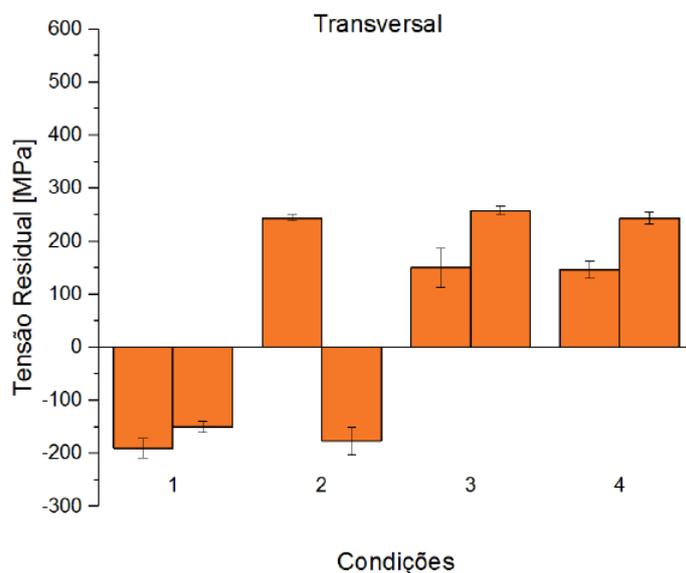


Figura 4: Tensões residuais medidas na direção transversal.

Com os valores das tensões obtidas nas medições, foi calculada a média das tensões para cada condição, tanto na direção longitudinal quanto na transversal. Os valores médios alcançados estão esquematizados nas Figuras 5 e 6, respectivamente. Na Figura 5, onde estão

marcados os valores de tensões medidos no sentido longitudinal, fica evidente que a taxa de variação de tensões é mais influenciada pela velocidade de corte do que pela profundidade, pois há certo paralelismo entre as retas. Percebe-se também que, ao reduzir a velocidade de corte de 50 m/min para 40 m/min existe menor tendência de tensão trativa na superfície das amostras. Neste caso, a velocidade de 40 m/min pode ter favorecido menores valores de TR por ser menos agressiva quanto ao arrancamento de material na geração do cavaco, resultando em menores gradientes térmicos, ou seja, minimizando o efeito trativo que o fator térmico induz nos processos de usinagem, conforme apresentado por LIMA (2008).

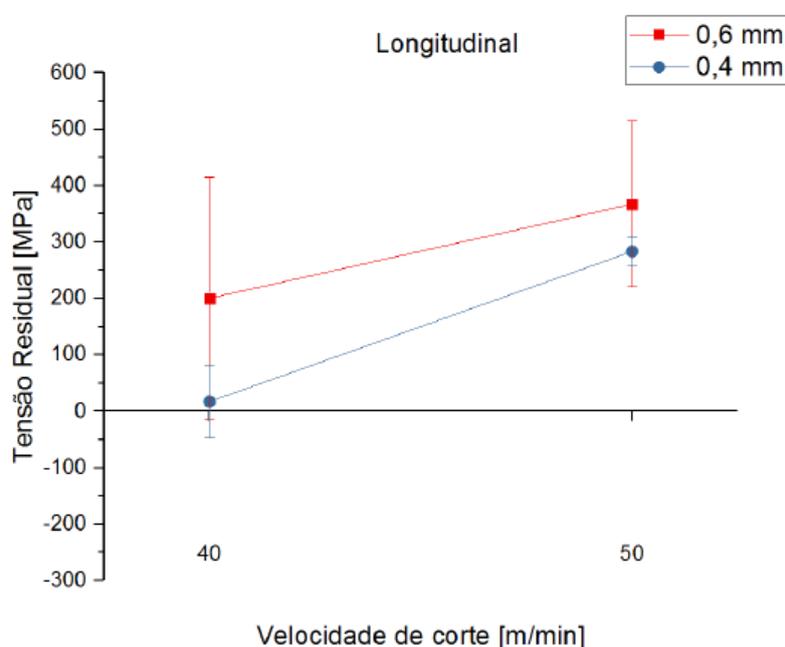


Figura 5: Valores médios das tensões residuais medidas na direção longitudinal.

Dando atenção ainda à Figura 5, os valores de tensões residuais obtidos com profundidades de corte maiores geraram tensões trativas de maior magnitude. Analisando especificamente a condição de corte 1, com velocidade de corte e profundidade de corte menores, o valor médio obtido foi de praticamente zero, o que está coerente, pois quanto menos agressivo é o processo, menores são os efeitos térmicos e há uma predominância dos efeitos mecânicos, que tendem a gerar tensões compressivas. Pode-se considerar, no entanto, esse valor nulo como sendo uma boa aproximação, em virtude das magnitudes absolutas obtidas nas amostras 1A e 1B serem pequenas.

A Figura 6 mostra os valores obtidos com as medições de tensões residuais na direção transversal ao avanço. Analisando o gráfico é possível notar que a velocidade de corte é o

parâmetro que mais influencia no processo, quanto à geração de tensões residuais. Avaliando em particular as médias dos valores das tensões com velocidade de corte em 50 m/min, verifica-se que estes são praticamente iguais e trativos, independentemente de qual profundidade de corte foi utilizada. Fixando a velocidade de corte em 40 m/min, foram obtidos valores de natureza compressiva para a menor profundidade de corte.

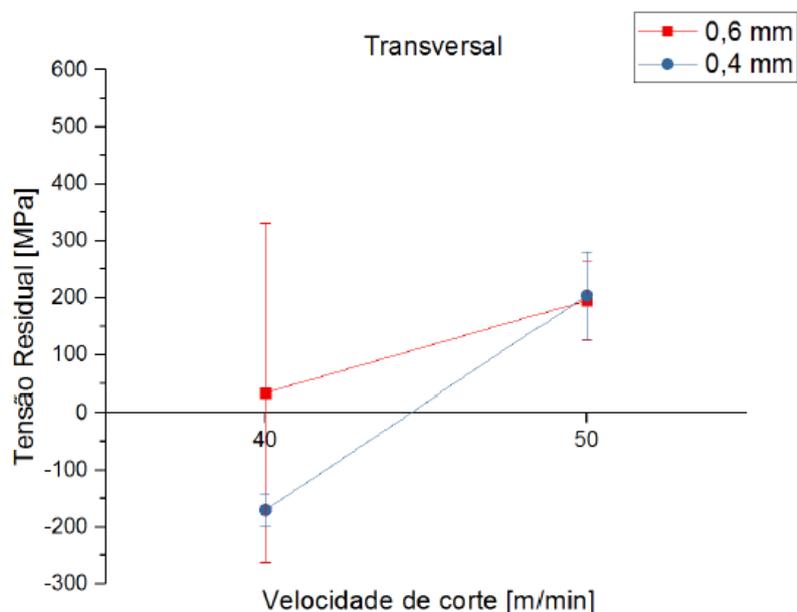


Figura 6: Valores médios de tensões residuais medidas na direção transversal.

3.2. Rugosidade Superficial Média (Ra)

A média dos valores de rugosidade Ra obtidos após a usinagem das amostras estão apresentados na Figura 7. Com base nos resultados obtidos é possível observar que maiores velocidades de corte resultaram em melhor acabamento superficial das amostras, ou seja, menor o valor médio da rugosidade.

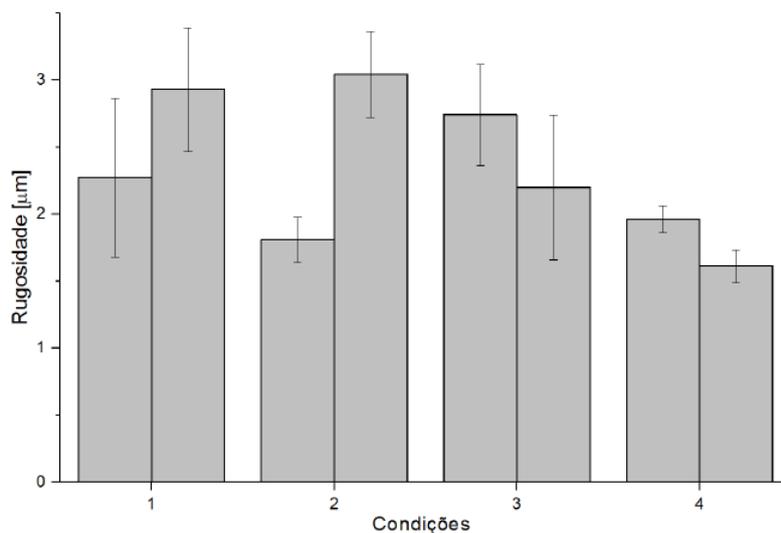
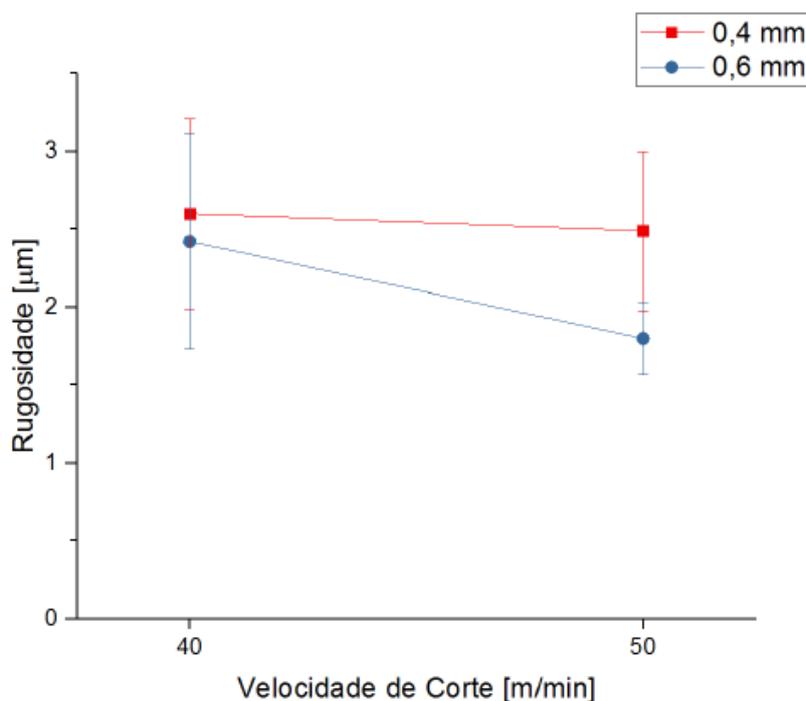


Figura 7: Valores médios de Rugosidade.

A partir dos valores de rugosidade superficial de cada uma das duas amostras na mesma condição de corte foi calculada a média para aquela condição. Isto é, foram gerados 4 valores que representam o resultado isolando cada parâmetro de corte estudado. A Figura 8 mostra os valores obtidos e a relação entre os parâmetros de corte e a rugosidade superficial.

**Figura 8:** Valores médios de rugosidade para cada condição de corte.

Pode-se observar que o valor da rugosidade superficial tem aumento com a diminuição da velocidade de corte de 50 m/min para 40 m/min para ambas as profundidades de corte analisadas. Esse resultado pode ser considerado como esperado, pois, a literatura (MAUROTTO *et al.*, 2014; LIMA, 2008) indica que maiores velocidades de corte produzem menores rugosidades superficiais, sendo normalmente empregadas em passes de usinagem para acabamento. Ao analisar a variável profundidade de corte, verifica-se que os valores de rugosidade são menores nas amostras com maiores profundidades. Esse padrão não é previsto, uma vez que se espera que menores profundidades de corte gerassem menores valores de rugosidade. Contudo, nota-se um desvio padrão muito alto, caracterizando assim que os valores são estatisticamente iguais. Então, conforme descrito na literatura (HASSANPOUR *et al.*, 2016), pode-se dizer que as variações na profundidade de corte apresentam pequena influência nas características das superfícies, como a rugosidade.

4. Conclusões

Este trabalho, que teve por objetivo analisar a influência dos parâmetros de corte na integridade superficial, em termos de tensões residuais e rugosidade (Ra) geradas no fresamento do aço SAE 4340, permite as seguintes conclusões:

O processo de fresamento a seco gera gradientes térmicos que podem resultar em tensões residuais trativas. Contudo, a determinação correta dos parâmetros de corte pode minimizar esse efeito, podendo gerar tensões compressivas nas peças fresadas, o que seria benéfico para as mesmas.

A velocidade de corte é um dos principais parâmetros de corte que influencia nos valores de tensões residuais gerados na usinagem. Entretanto, a profundidade de corte, quando combinada com os demais parâmetros, pode ser importante para a minimização dos gradientes térmicos, como foi observado na direção transversal das amostras.

A rugosidade é diretamente influenciada pelos parâmetros de corte, sendo a velocidade de corte, novamente, a que teve maior impacto nos resultados obtidos. Para maiores velocidades de corte têm-se menores valores de rugosidade.

5. Referências

CAPELLO, E. 2005. Residual Stresses in Turning Part I: Influence of Process Parameters. *Journal of Materials Processing Technology*, 160, 221-228.

CARDOSO, A. S. M. 2011. *Caracterização Mecânica e Microestrutural dos Aços SAE 4340 e 300M Após Soldagem a Laser e Tratamento Superficial de Nitretação a Plasma*. Dissertação do Mestrado em Ciências dos Materiais, Universidade de São Paulo - USP.

DINIZ A. E., MARCONDES, F. C., COPPINI, N. L. 2001. *Tecnologia da Usinagem dos Materiais*, 3ª ed., Artliber Editora.

EI-KHABEERY, M. M., FATTOUH, M. 1989. Residual Stress Distribution Caused by Milling. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 29, 391-401.

FARIAS, A. 2009. *Análise da Tensão Residual e Integridade Superficial no Processo de Torneamento em Material Endurecido do Aço ABNT 8620 cementado*. Dissertação de Mestrado em Engenharia Mecânica, Universidade de São Paulo - USP.

FELHÖ, C., KARPUSCHEWSKI, B., KUNDRÁK, J. 2015. Surface Roughness Modelling in Face Milling. *CIRP Conference on Modelling of Machining Operations*, 31, 136-141.

GORGULHO, G., LIMA, A. Avaliação do Comportamento da Integridade Superficial em Peças submetidas a Processos de Usinagem em Condições Otimizadas. 7º Congresso Brasileiro de Engenharia de Fabricação, 2013, Penedo, Itatiaia – RJ – Brasil.

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 Cleaner Production*, 120, 124-134.

LEE, W. S. E SU, T. T. 1999. Mechanical Properties and Microstructural Features of AISI 4340 High-strength Alloy Steel Under Queched and Tempered Conditions. *Materials Processing Technology*, 87, 198-206.

LIMA, A. 2008. *Análise dos Efeitos Gerados pelos Parâmetros de Corte em Processos de Usinagem, Sobre a Integridade Superficial das Peças em Aço ABNT 4340*. Tese em Engenharia de Produção, Universidade Metodista de Piracicaba.

MAUROTTO, A., TSIVOULAS, D., BURKE, M. G. 2014. Surface integrity in dry milling of 304L steel: A parametric study. *2nd CIRP Conference on Surface Integrity (CSI)*, 13, 156-162.

NAVAS, V. G., GONZALO, O., BENGOTXEA, I. 2012. Effect of Cutting Parameters in the Surface Residual Stresses Generated by Turning in AISI 4340 Steel. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 61, 48-57.

SHAW, M. C. 1994. Heat-Afected Zones in Grinding Steel. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 43, 279-282.

SEGAWA, T., SASAHARA, H., TSUTSUMI, M. 2004. Development of a New Tool to Generate Compressive Residual Stress Within a Machined Surface. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 44, 1215–1221.

VIEIRA, M., LIMA, A., LIBARDI, R., CANCELIERI, H. A. Análise da Camada Afetada pelo Calor na Superfície de Peças Retificadas. IV Seminário do Desgaste. Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais, 1998, São Paulo – Brasil.