

08 a 11 de Outubro de 2018
Instituto Federal Fluminense
Búzios - RJ

ESTUDO DAS TENSÕES RESIDUAIS GERADAS NO FRESAMENTO DE TOPO DE AÇO AISI 4340

Túlio Salek Quintas – tulio_salek@id.uff.br

Marcel Freitas de Souza– marcelfreitas@id.uff.br

Mateus Campos Martins– mateuscampos@id.uff.br

Leosdan Figueredo Noris– leosdanfnoris@gmail.com

Maria Cindra Fonseca – mcindra@vm.uff.br

Universidade Federal Fluminense, Departamento de Engenharia Mecânica/PGMEC - Niterói, RJ, Brasil

Resumo. Os aços de alta resistência mecânica são amplamente empregados na fabricação de componentes mecânicos destinados a serviços que envolvam elevados níveis de carregamento. Um dos processos de usinagem usados na fabricação desses componentes é o fresamento de topo que, assim como todos os processos de fabricação, introduz tensões residuais nas peças fabricadas. Essas tensões podem gerar efeitos danosos ou benéficos aos componentes, dependendo de sua natureza, magnitude e distribuição. Neste trabalho foram analisadas as tensões residuais geradas no fresamento de topo de aço AISI 4340, levando em consideração a influência dos parâmetros de corte (velocidade de corte, avanço e profundidade de corte). As tensões residuais foram medidas por difração de raios-X, pelo método do $\sin^2 \psi$, e os resultados foram comparados com aqueles obtidos por ruído magnético Barkhausen (RMB), com o objetivo de verificar a validade do uso do RMB para esta aplicação. Os resultados revelaram a presença de tensões compressivas em todas as amostras.

Palavras-chave: fresamento de topo, tensões residuais, difração de raios-X, ruído magnético Barkhausen, aço AISI 4340.

1. INTRODUÇÃO

Tensões residuais são tensões auto-equilibradas existentes nos materiais em condições de temperatura uniforme e ausência de carregamentos externos (Macherauch e Kloos, 1987). Essas tensões são originadas por interações entre tensão, deformação, temperatura, microestrutura e tempo e podem se somar a tensões aplicadas, causando efeitos benéficos ou deletérios ao material, dependendo de sua natureza, magnitude e distribuição (Bhadeshia, 2002). Sabe-se que tensões tratativas, associadas aos efeitos térmicos, são deletérias ao material, pois comprometem propriedades como resistência à fadiga e à corrosão. Por outro lado, as tensões residuais

compressivas, associadas aos efeitos mecânicos, são benéficas, pois melhoram essas propriedades (Barsoum, 2008).

As tensões residuais são geradas em todos os processos mecânicos de fabricação, dos quais podem-se destacar os processos de usinagem, por serem amplamente empregados em diversos ramos da indústria metal-mecânica. Esses processos envolvem a deformação da peça por meio da remoção de material, geração de calor na zona de deformação e podem envolver transformações de fase do material (Kandil *et al.*, 2001). Sob essas condições os componentes fabricados por usinagem sempre apresentam tensões residuais.

O fresamento de topo é um dos processos de usinagem mais utilizados na indústria metal-mecânica, sendo fortemente empregado nas indústrias automobilística, aeroespacial e naval, nas quais são fabricados componentes mecânicos como engrenagens, eixos, cilindros e trem de pouso. Esses componentes e diversos outros produtos da indústria metal mecânica são fabricados com aços de ultra-alta resistência, o que justifica o estudo do comportamento das tensões residuais geradas no fresamento desses aços (Abdalla *et al.*, 2010).

Sob a perspectiva apresentada neste trabalho foram analisadas as tensões residuais geradas no fresamento de topo de aço AISI 4340, com o objetivo de avaliar a influência dos parâmetros de corte na geração dessas tensões. As tensões residuais foram medidas pelo método de difração de raios-X e os resultados foram comparados com aqueles obtidos pelo método do ruído magnético Barkhausen (RMB), para construir uma relação entre os sinais de RMB e as tensões residuais, podendo-se, assim, validar o método RMB para qualificar tensões residuais.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

O material de estudo utilizado neste trabalho foi o aço AISI 4340, fornecido no formato de um semi-disco de 227 mm de diâmetro e 15 mm de espessura. A Tabela 1 apresenta as propriedades mecânicas da amostra.

Tabela 1 – Propriedades mecânicas do aço AISI 4340.

σ_{LE} (MPa)	σ_{LR} (MPa)	Dureza Vickers (HV)
800	1200	360

Foram usinados oito canais, por fresamento de topo, utilizando o centro de usinagem MV – 760 ECO, da marca VEKER, disponibilizado pelo Laboratório de Tecnologia Mecânica (LTM/UFF) da Universidade Federal Fluminense. A ferramenta utilizada foi uma fresa que consiste em dois insertos de metal duro com recobrimento de TiAlN montados em um suporte para dois insertos. O fresamento dos canais foi realizado com aplicação de fluido de corte em jorro. O comprimento de usinagem dos canais 1, 2 e 3 foi de 61 mm, enquanto que o comprimento dos canais 4, 5, 6, 7 e 8 foi de 52 mm. Para cada canal foi adotada uma combinação diferente dos parâmetros de corte avanço por dente (f), velocidade de corte (V_c) e profundidade de corte (a_p). A Tabela 2 apresenta essas combinações.

Tabela 2 – Combinações dos parâmetros de corte.

Canal	Vc (m/min)	ap (mm)	f (mm/dente)
1	100	0,5	0,02
2	100	0,5	0,06
3	100	1,5	0,02
4	100	1,5	0,06
5	300	0,5	0,02
6	300	0,5	0,06
7	300	1,5	0,02
8	300	1,5	0,06

Após a usinagem dos canais as tensões residuais foram medidas em um ponto no centro de cada canal, nas direções longitudinal e transversal, pelo método de difração de raios-X. A Fig. 1a ilustra os pontos de medição nos canais fresados. O equipamento utilizado para medir as tensões residuais foi o analisador de tensões XStress3000, da marca Stresstech, que realiza a medição pelo método do $\text{sen}^2\psi$.

Após a medição das tensões residuais foi realizada a medição do sinal de ruído magnético Barkhausen (RMB) em três pontos de cada canal fresado, como ilustra a Fig. 1b. Os pontos foram divididos em ponto 1, ponto 2 e ponto 3, sendo que o ponto 2 coincide com o ponto utilizado para a medição das tensões residuais por difração de raios-X. O equipamento utilizado para medir o sinal RMB foi o Barktech, desenvolvido por uma equipe de professores da Universidade de São Paulo.

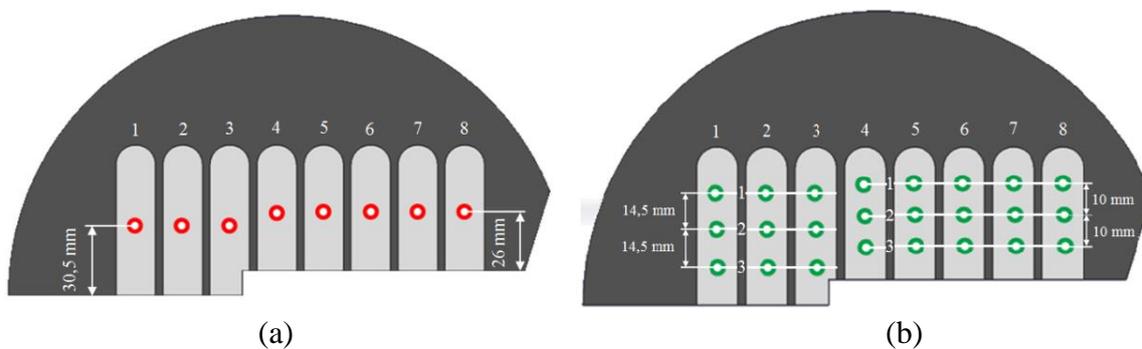


Figura 1 – Pontos de medição: a) das tensões residuais por difração de raios-X; (b) dos sinais de ruído magnético Barkhausen.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Tabela 3 apresenta o resultado das medições das tensões residuais (TR) em cada canal fresado, nas direções longitudinal (L) e transversal (T), pelo método de difração de raios-X.

Tabela 3 – Tensões residuais medidas por difração de raios-X.

Canal		1	2	3	4	5	6	7	8
TR (MPa)	L	-550 ± 12	-460 ± 13	-510 ± 10	-715 ± 11	-905 ± 11	-590 ± 14	-870 ± 8	-830 ± 4
	T	-537 ± 11	-445 ± 19	-575 ± 15	-670 ± 1	-750 ± 15	-361 ± 2	-654 ± 26	-147 ± 8

Os resultados revelam que todas as tensões residuais medidas foram compressivas, o que significa que houve predominância dos efeitos mecânicos sobre os efeitos térmicos (Yuan *et al.*, 2016). Isso se justifica pelas condições de corte empregadas e pelo uso de fluido de corte com alto poder refrigerante em jorro, que minimiza ou extingue os efeitos térmicos do corte. Visto que todas as tensões medidas foram compressivas, este seria um caso de efeito benéfico das tensões residuais geradas no fresamento de topo. A partir dos valores apresentados na Tabela 3 foram construídos gráficos, utilizando o *software* OriginPro 8, a fim de permitir uma análise qualitativa dos resultados. A Fig. 2 ilustra os resultados para os grupo de canais com $V_c = 100$ m/min e com $V_c = 300$ m/min.

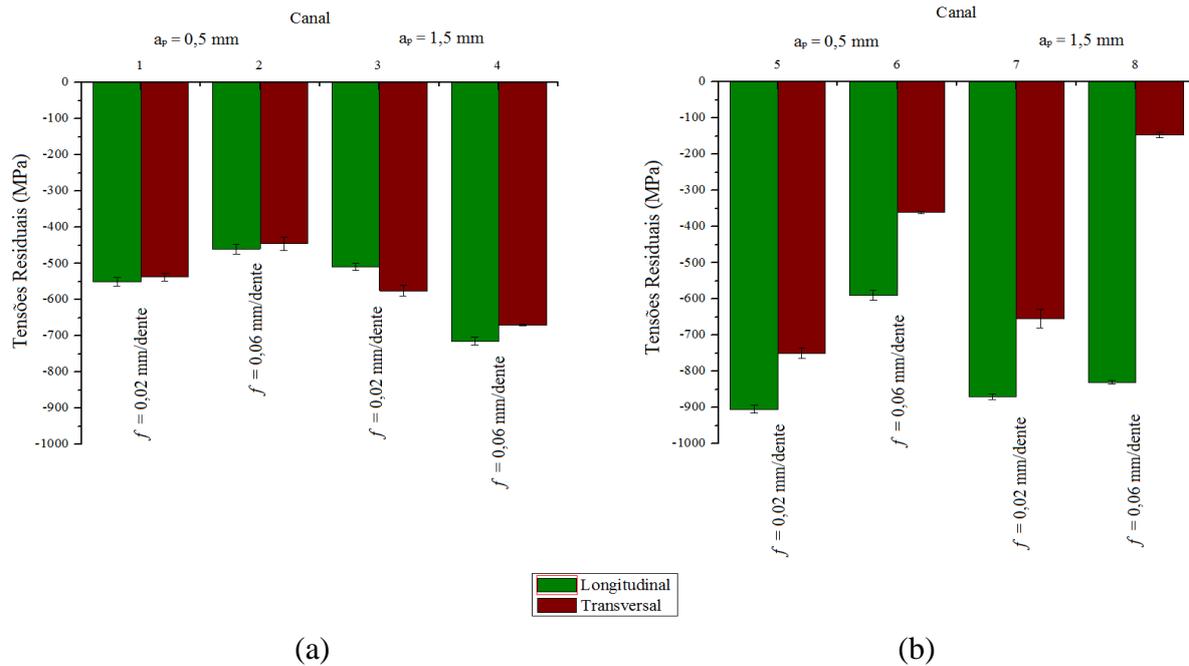


Figura 2 – Tensões residuais dos canais com $V_c = 100$ m/min (a) e dos canais com $V_c = 300$ m/min (b).

A partir da Fig. 2a e dos dados apresentados na Tabela 3 pode-se verificar que do canal 1 para o canal 3 ($f = 0,02$ mm/dente) as tensões residuais longitudinais se tornaram menos compressivas, enquanto que as tensões residuais transversais se tornaram mais compressivas. Do canal 2 para o canal 4 ($f = 0,06$ mm/dente) as tensões residuais nas duas direções se tornaram mais compressivas. O único parâmetro de corte que variou entre os canais 1 e 3 e entre os canais 2 e 4 foi a profundidade de corte (a_p). Do canal 1 para o canal 2 ($a_p = 0,5$ mm) as tensões residuais longitudinais e transversais se tornaram menos compressivas, enquanto que do canal 3 para o canal 4 ($a_p = 1,5$ mm) as tensões residuais nas duas direções se tornaram mais compressivas. O avanço (f) foi o único parâmetro que variou entre os canais 1 e 2 e entre os canais 3 e 4. Observando a Tabela 3 percebe-se que entre os canais 1 e 3 as tensões residuais em ambas as direções não sofreram grandes variações, o que indica que elas não foram influenciadas de forma expressiva pela profundidade de corte. Por outro lado, entre os canais 2 e 4 ocorreram variações mais significativas, o que indica maior influência da profundidade de corte nesse caso. Entre os canais 1 e 2 e entre os canais 3 e 4 as tensões residuais sofreram variações consideráveis, o que indica maior influência do avanço nessas condições.

A partir da Figura 2b e dos dados apresentados na Tabela 3 é possível observar que do canal 5 para o canal 7 as tensões residuais nas duas direções se tornaram menos compressivas.

Do canal 6 para o canal 8 as tensões residuais transversais também se tornaram menos compressivas, enquanto que as tensões residuais longitudinais se tornaram mais compressivas. O único parâmetro de corte que variou entre os canais 5 e 7 e entre os canais 6 e 8 foi a profundidade de corte a_p . Do canal 5 para o canal 6 e do canal 7 para o canal 8 as tensões residuais nas duas direções se tornaram menos compressivas. O avanço foi o único parâmetro de corte que variou entre os canais 5 e 6 e entre os canais 7 e 8. As TR, nas duas direções, não sofreram variações expressivas entre os canais 5 e 7, indicando a baixa influência da profundidade de corte. Por outro lado, as TR variaram significativamente entre os canais 6 e 8, revelando maior influência da profundidade de corte nesse caso. Entre os canais 5 e 6 e entre os canais 6 e 8 as TR sofreram variações consideráveis, o que indica uma forte influência do avanço.

Com base nas informações apresentadas percebe-se que o avanço influenciou mais na geração das TR do que a profundidade de corte. Comparando-se o grupo de canais com $V_c = 100$ m/min com o grupo de $V_c = 300$ m/min, percebe-se uma tendência à geração de TR menos compressivas quando se utiliza avanço mais alto. O comportamento das TR em relação à variação da profundidade de corte se mostrou oposto entre os grupos. Além disso, as TR nas duas direções se tornaram mais compressivas na maioria dos canais do grupo com maior V_c , o que indica que o aumento da velocidade de corte tendeu a gerar tensões residuais compressivas.

Comportamentos similares para as tensões residuais geradas no fresamento já foram observadas em trabalhos anteriores. Masmiati e Sarhan (2014) realizaram um estudo no qual otimizaram os parâmetros de corte do processo de fresamento para minimizar as tensões residuais geradas. Os resultados experimentais revelaram a presença de tensões compressivas, sob condições de corte próximas às usadas neste trabalho. Além disso, o comportamento observado para as tensões residuais em relação aos parâmetros de corte foi semelhante ao comportamento esperado neste trabalho. Junteng Wang *et al.* (2017) analisaram as tensões residuais geradas no fresamento de topo de incoel 718 e também observaram a presença de tensões compressivas.

A Tabela 4 apresenta os resultados obtidos na medição dos sinais do ruído magnético Barkhausen (RMB).

Tabela 4 – Sinais de ruído magnético Barkhausen.

Canal	Sinal RMB (mV)							
	L			T			Média	
	Ponto 1	Ponto 2	Ponto 3	Ponto 1	Ponto 2	Ponto 3	L	T
1	0,69	0,45	0,38	0,5	0,53	0,58	$0,51 \pm 0,16$	$0,53 \pm 0,04$
2	0,34	0,31	0,34	0,34	0,36	0,38	$0,33 \pm 0,02$	$0,36 \pm 0,02$
3	0,36	0,32	0,36	0,29	0,3	0,34	$0,35 \pm 0,03$	$0,31 \pm 0,03$
4	0,32	0,11	0,19	0,32	0,29	0,36	$0,2 \pm 0,11$	$0,32 \pm 0,03$
5	0,25	0,26	0,26	0,25	0,25	0,27	$0,26 \pm 0,01$	$0,26 \pm 0,01$
6	0,29	0,28	0,27	0,24	0,24	0,26	$0,28 \pm 0,01$	$0,25 \pm 0,01$
7	0,24	0,24	0,28	0,25	0,24	0,26	$0,25 \pm 0,02$	$0,25 \pm 0,01$
8	0,26	0,26	0,27	0,25	0,25	0,25	$0,26 \pm 0,01$	$0,25 \pm 0,01$

A partir dos resultados foi construída uma correlação entre as medições feitas pelos dois métodos, com o objetivo de possibilitar a visualização da relação entre os sinais de ruído magnético Barkhausen (RMB), dados em mV, e os valores de tensão residual, dados em MPa.

A Fig. 3 ilustra a correlação obtida utilizando as medições nas direções longitudinal e transversal, dada pela Eq. (1). Os valores de sinal RMB usados são referentes ao ponto 2 de cada canal, correspondente ao ponto de medição das tensões residuais por difração de raios-X. Dois pontos foram desconsiderados por se tratarem de *outliers*.

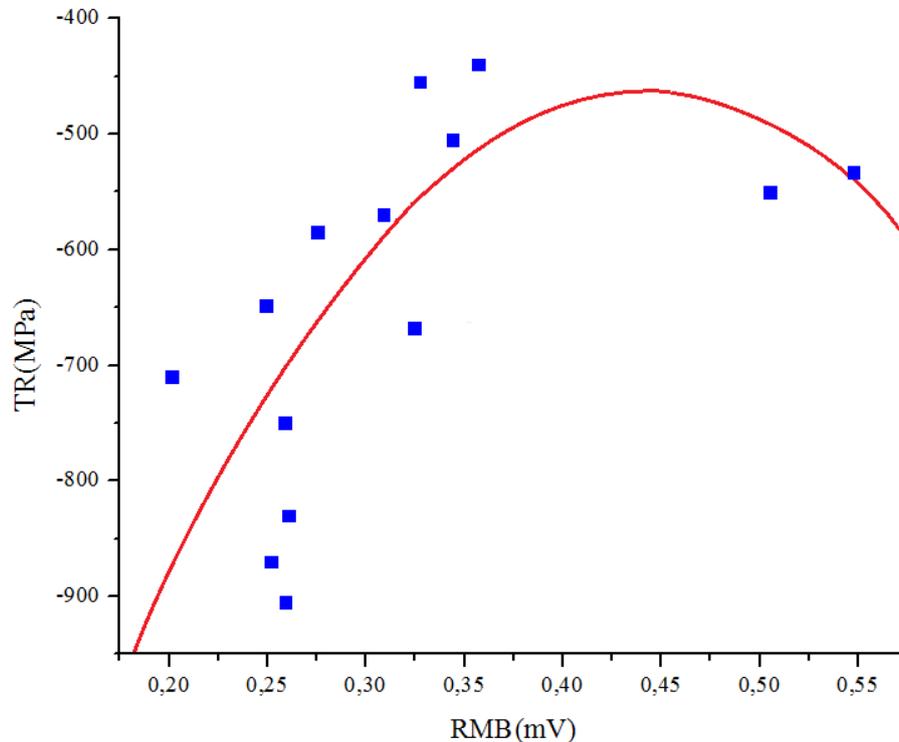


Figura 3– Correlação entre as medidas de tensão residual obtidas por difração de raios-X e as medidas de sinal RMB.

$$y = a + bx + cx^2 \quad (1)$$

Sendo $a = -1,96932422432 \times 10^3$, $b = 6,84347268466 \times 10^3$ e $c = -7,83416203686 \times 10^3$. A curva obtida sugere que, para um certo intervalo, a intensidade do sinal de RMB aumenta à medida que as tensões residuais se tornam menos compressivas, correspondendo ao comportamento esperado descrito na literatura (Serrão, 2014). Entretanto, o coeficiente de ajuste r foi de 0,74 e, observando-se a Fig. 3, percebe-se que os resultados não seguem adequadamente o comportamento sugerido pela curva. Pode-se observar que dois pontos causaram um desvio da curva que não corresponde ao comportamento esperado. Analisando as Tabelas 3 e 4 percebe-se que do canal 1 para o canal 2 as tensões residuais se tornaram menos compressivas em ambas as direções. O esperado seria que a intensidade do sinal RMB aumentasse nesse caso, porém, os sinais medidos diminuíram em ambas as direções. O mesmo ocorre para as medições nos canais 5 e 6, na direção transversal. As tensões se tornam menos compressivas, mas o sinal RMB sofre uma ligeira queda, ao invés de aumentar.

Esses casos em que a relação entre as tensões residuais e os sinais RMB apresentaram um comportamento oposto ao esperado colaboraram para a dispersão do gráfico obtido, influenciando o valor do coeficiente de ajuste r . Uma das razões que pode ser citada para o ocorrido nesses casos é o fato de o sinal RMB ser extremamente sensível ao campo de tensões. Dependendo da magnitude das tensões agindo no ponto a medição do sinal RMB naquele ponto pode não ser precisa. A fim de se obter uma correlação mais adequada seria necessário coletar mais dados, isto é, realizar um maior número de medições em cada canal, para os dois métodos.

A partir dos resultados obtidos foram construídos dois gráficos com o objetivo de avaliar o efeito dos parâmetros de corte sobre os sinais de RMB. A Figura 4a apresenta o gráfico obtido para os canais com $V_c = 100$ m/min, enquanto que a Figura 4b apresenta o gráfico obtido para os canais com $V_c = 300$ m/min.

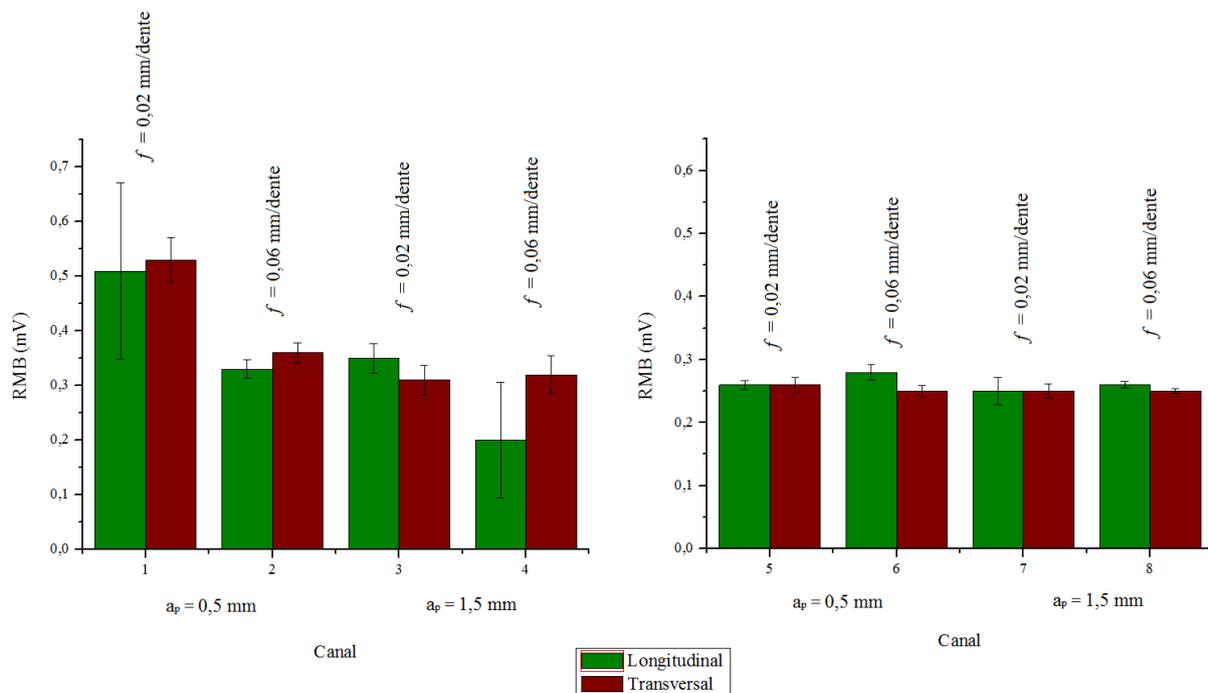


Figura 4 – Sinais de RMB:(a) com $V_c = 100$ m/min;(b) com $V_c = 300$ m/min.

A partir da Tabela 4 e da Figura 4a pode-se observar que do canal 1 para o canal 3 o valor médio do sinal RMB reduziu nas duas direções. Do canal 2 para o canal 4 o valor médio também reduziu nas duas direções, o que pode ser entendido como uma tendência das tensões residuais à compressão, quando se aumenta a profundidade de corte. Do canal 1 para o canal 2 o comportamento do valor médio foi o mesmo para as duas direções. Do canal 3 para o canal 4 o sinal aumentou na direção transversal, entretanto, foi uma variação muito pequena, podendo ser desprezada. Na direção longitudinal o sinal diminuiu, como nos outros casos. Assim, o comportamento esperado para as tensões residuais também é de tender à compressão quando se aumenta o avanço.

A Figura 7b indica que do canal 5 para o canal 7 e do canal 6 para o canal 8 o sinal RMB diminuiu nas duas direções, porém, as variações foram muito pequenas, o que indica uma fraca tendência da profundidade de corte de gerar tensões compressivas sob as condições aplicadas. Por outro lado, do canal 5 para o canal 6 e do canal 7 para o canal 8 o sinal aumentou nas duas direções, o que indica que as tensões residuais se tornaram menos compressivas quando se elevou o avanço. Este comportamento está de acordo com a análise apresentada para o método de difração de raios-X. Em um trabalho recente, Lasaosa *et al.* (2018) utilizaram um modelo de espectro de ruído magnético Barkhausen para estimar quantitativamente as tensões residuais geradas na usinagem de aço baixo carbono e obtiveram o mesmo comportamento para a relação entre os sinais de RMB e as tensões residuais.

A fim de verificar a validade dos resultados obtidos e visualizar a relação dos parâmetros de corte com os sinais de RMB medidos foi realizada uma análise estatística dos resultados,

utilizando a análise de variância (ANOVA). A Fig. 5 e a Fig. 6 ilustram os gráficos de efeito obtidos com a ANOVA, para as medições realizadas nas direções longitudinal e transversal, respectivamente. Esses gráficos representam a relação entre os parâmetros de corte e os sinais de RMB.

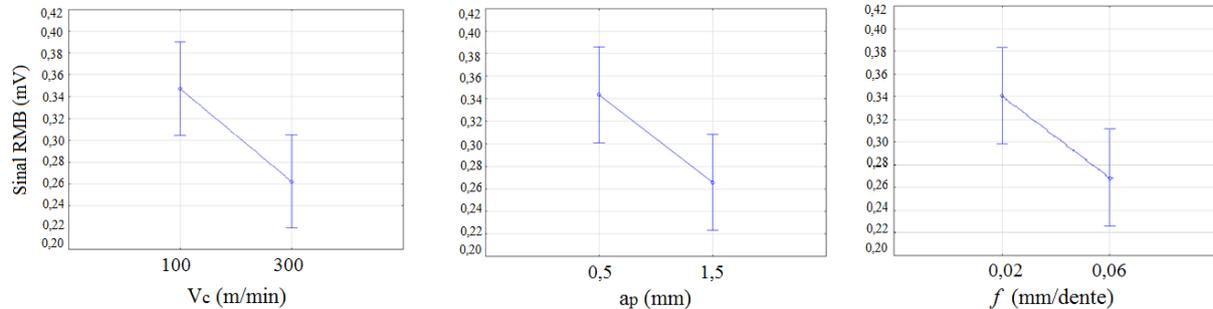


Figura 5–Influência dos parâmetros de corte sobre os sinais de RMB medidos na direção longitudinal.

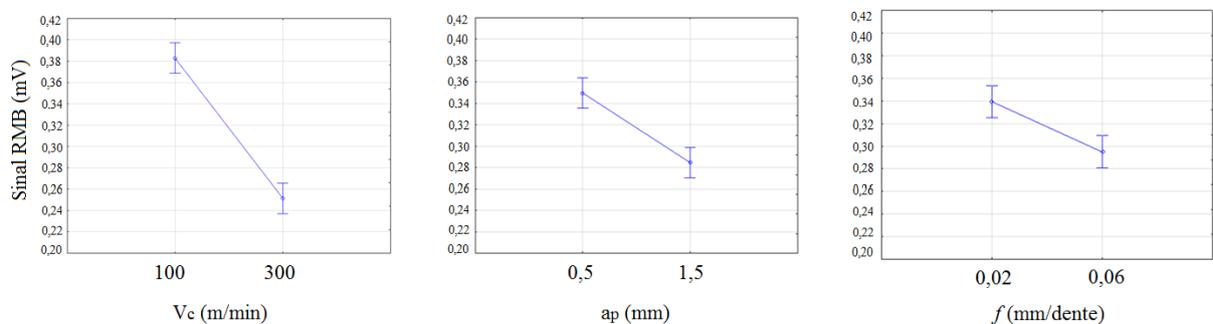


Figura 6 – Influência dos parâmetros de corte sobre os sinais de RMB medidos na direção transversal.

Os gráficos sugerem que, para as duas direções, à medida em que se aumentam os três parâmetros de corte os sinais RMB diminuem, ou seja, as tensões residuais geradas tendem à compressão. As relações conhecidas para a variação dos parâmetros de corte e as tensões residuais sugerem que com o aumento da velocidade de corte as tensões residuais se tornem mais compressivas, o que pode ser observado nas relações obtidas nas Fig. 5 e 6. Para um aumento no avanço o esperado seria que as tensões residuais se tornassem menos compressivas. Entretanto, o comportamento sugerido pelas Fig. 5 e 6 é oposto ao esperado. O mesmo ocorre para a profundidade de corte. Analisando os resultados obtidos pelo método de difração de raios-X, percebe-se que, no geral, as tensões residuais se tornaram menos compressivas com o aumento do avanço, o que é esperado. A mesma discussão feita para a correlação obtida entre os métodos pode ser feita para esse caso. Novamente, seria necessário um maior número de medidas para se obter um resultado mais confiável.

4. CONCLUSÕES

Os resultados obtidos no presente trabalho, que teve como objetivo a análise do comportamento das tensões residuais geradas no fresamento de topo de aço AISI 4340, permitem as seguintes conclusões:

1. Os efeitos mecânicos foram mais intensos que os efeitos térmicos, sob as condições de corte usadas, visto que todas as tensões residuais medidas foram compressivas.

2. O aumento da velocidade de corte tendeu a gerar tensões residuais compressivas enquanto que o aumento do avanço por dente tendeu a gerar tensões menos compressivas. A variação da profundidade de corte influenciou de forma menos expressiva a geração das tensões residuais, tendendo a gerar tensões compressivas.
3. A velocidade de corte mostrou maior influência sobre as tensões geradas na direção transversal.
4. A relação obtida entre a velocidade de corte e as tensões residuais, medidas por difração de raios-X e comparadas aos valores de ruído magnético Barkhausen, está de acordo com a literatura.

Agradecimentos

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

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Abdalla, A. J., Baggio-Scheid, V. H., Hashimoto, T. M., Ranieri, A. (2010), Influência da nitrocarbonetação a plasma nas propriedades de fadiga de um aço 4340 com diferentes microestruturas, 19º Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais – CBECiMat, Campos do Jordão, SP, Brasil.
- Barsoum, Z. (2008), Residual stress analysis and fatigue of multi-passwelded tubular structures. *Engineering Failure Analyses*, vol. 15, 863-874.
- Bhadeshia, K.D.H. (2002) “Material Factors”. *Handbook of Residual Stress and Deformation of Steel*, ASM International, 3-10.
- Junteng Wang, Dinghua Zhang, Baohai Wu, Ming Luo (2017), Numerical and empirical modelling of machining-induced residual stresses in ball end milling of Inconel 718. *Procedia CIRP*, vol. 58, 7-12.
- Kandil, F. A., Lord, J. D., Fry, A. T. and Grant, P. V. (2001), *A Review of Residual Stress Measurement Methods - A Guide to Technique Selection*. NPL Materials Centre.
- Lasaosa, A., Gurruchaga, K., Arizti, F. and Martínez-de-Guerenu, A. (2018), Quantitative estimation of nonmonotonic residual stress depth-profiles using an extended Kypris-Jiles model of the magnetic Barkhausen noise spectrum. *Journal of Applied Physics*, vol. 123.
- Macherauch, E. and Kloos, K. H. (1987), Origin Measurement and Evaluation of Residual Stresses. *Residual Stress in Science and Technology*, vol. 1, 3-27.
- Masmiahi, N., Sarhan, Ahmed A.D. (2014), Optimizing cutting parameters in inclined end milling for minimum surface residual stress – Taguchi approach. *Measurement*, vol. 60, 267-275.
- Serrão, F.L. (2014), “*Influência do Tratamento Térmico de Revenido nas Tensões Residuais e nas Propriedades Mecânicas do Aço AISI 4340*”, Dissertação de Mestrado, Universidade Federal Fluminense, Niterói.
- Yuan Ma, Pingfa Feng, Jianfu Zhanga, Zhijun Wu, Dingwen Yu (2016), Prediction of surface residual stress after end milling based on cutting force and temperature. *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 235, 41-48.

STUDY OF THE RESIDUAL STRESSES GENERATED IN THE FACE-MILLING OF AISI 4340 STEEL

Abstract. *High strength steels are widely used in the manufacture of mechanical components for services involving high levels of loading. End-milling process is one of the most usually machining process employed in the manufacturing of these components, generating residual stresses. These stresses can cause harmful or beneficial effects to the manufactured components, depending on their nature, magnitude and distribution, which justifies the study of their behavior in the milling processes. In this work the residual stresses generated in the face-milling of AISI 4340 steel were analyzed, taking into account the influence of the cutting parameters (cutting speed, feed rate and cutting depth). The residual stresses were measured by X-ray diffraction using the $\sin^2\psi$ method and the results were compared with those obtained*

by Barkhausen magnetic noise (RMB) method, in order to verify the validity of the RMB method in this application. The results revealed the presence of compressive stresses in all samples.

Keywords: *face-milling, residual stresses, X-ray diffraction, Barkhausen magnetic noise, AISI 4340 steel.*