

## Estudo sobre a integridade superficial no fresamento frontal do aço ABNT H13

Michele Lisboa Silveira

Anderson Junior dos Santos

Paulo Eustáquio de Faria

Alexandre Mendes Abrão

Universidade Federal de Minas Gerais, Avenida Antônio Carlos, 6627, Pampulha, Belo Horizonte MG, CEP 31270-901

michelesilveira1991@gmail.com, ndersonsantos@hotmail.com, paulofaria@ufmg.br, abrao@demec.ufmg.br

**Resumo.** Aços ferramenta como o ABNT H13 são utilizados na fabricação de moldes e matrizes para forjamento e fundição. Estes moldes e matrizes exigem alta qualidade e precisão para serem aplicados na indústria de bens de consumo duráveis. Uma das formas de processamento destes materiais é por meio do fresamento, operação realizada para definir forma, dimensões e acabamento empregando ferramentas rotativas. Em decorrência da operação de usinagem, a integridade superficial passa a ser uma característica de qualidade crítica para o desempenho do componente produzido, principalmente quando se trata de materiais a serem aplicados sob condições severas. O presente trabalho consiste no estudo da influência das condições de fresamento sobre a rugosidade e as tensões residuais do aço ABNT H13. Buscou-se variar os parâmetros velocidade de corte, avanço por dente, profundidade de usinagem e utilização de fluido de corte utilizando insertos de metal duro. A rugosidade foi avaliada por meio da medição do desvio aritmético médio do perfil avaliado ( $R_a$ ) e as tensões residuais foram medidas na direção de avanço e interpretadas quanto à sua natureza e intensidade. Os resultados indicaram que o parâmetro mais influente sobre a rugosidade foi o avanço por dente e que tensões residuais compressivas ou de tração de menor intensidade são induzidas empregando-se baixa velocidade de corte, baixo avanço por dente, baixa profundidade de usinagem e corte a seco.

**Palavras chave:** Aços-ferramenta, Usinagem, Rugosidade, Tensões residuais.

### 1. INTRODUÇÃO

Na indústria metal mecânica estão disponíveis diversos tipos de materiais que se diferenciam uns dos outros pelo custo de fabricação, desempenho, composição química, formas de processamento e microestrutura. A escolha de materiais ocorre devido às características físicas e químicas, bem como pela aplicação desejada. Dentre os aços classificados como aços ferramentas, ou seja, aços utilizados para fabricar ferramentas, a Associação Brasileira de Normas Técnicas classifica como ABNT H13 uma classe de aço da família H, assim denominado por serem aços para trabalho a quente (*hot working*). Dessa forma, uma propriedade importante para aços desta classe é a alta resistência mecânica sob temperaturas elevadas. Propriedades como resistência à erosão e desgaste, baixa plasticidade e aptidão para alcançar baixa rugosidade tornaram o aço ABNT H13 o material preferido para a fabricação de matrizes para fundição de ligas de alumínio e magnésio. Outras aplicações típicas do aço ABNT H13 incluem matrizes de fundição, matrizes de extrusão, insertos, machos, pinos ejetores, êmbolos, lâminas, matrizes de forjamento e moldes para injeção de plástico (ASM, 1990).

Dentre as operações de usinagem existentes, o fresamento é a mais utilizada para a geração de cavidades em moldes. Isto se deve ao fato de a fresa poder apresentar as mais variadas formas e dimensões, dando à operação de fresamento uma maior versatilidade na geração de superfícies (DINIZ *et al.*, 2012). O conhecimento das condições ideais de corte e dos materiais adequados para as ferramentas aplicadas ao fresamento de material endurecido pode proporcionar a obtenção de superfícies de melhor qualidade e controle dimensional, além de uma redução significativa nos tempos e custos de fabricação.

A integridade superficial descreve os atributos de uma superfície e influencia significativamente no desempenho funcional de uma peça de trabalho. Nesta pesquisa, buscou-se a avaliação da integridade superficial por meio da rugosidade e das tensões residuais.

Ding *et al.* (2010) realizaram o fresamento do ABNT H13 e identificaram que a rugosidade da superfície sob alguns parâmetros de corte foi menor que 0,25  $\mu\text{m}$ , fato que indica o fresamento deste aço ferramenta como uma excelente operação de acabamento para moldes e matrizes. Devido à busca por melhores acabamentos, estudos têm demonstrado que os parâmetros de corte influenciam sobre a rugosidade. No estudo de Ding *et al.* (2010), os autores identificaram que os parâmetros mais influentes sobre a rugosidade foram o avanço por dente e a profundidade de usinagem. Hassanpour *et al.* (2016) estudaram o acabamento superficial de um aço AISI 4340 durante o fresamento. Observaram que o parâmetro mais influente foi o avanço e explicaram que o aumento do avanço aumenta a espessura dos cavacos, e conseqüentemente a rugosidade aumenta devido a maiores esforços e vibrações. Os resultados dos autores citados corroboram com o que é ditado pela literatura na área da usinagem.

Ao avaliar a integridade superficial e a qualidade superficial de uma superfície usinada, as tensões residuais são geralmente consideradas os parâmetros mais importantes (OUTEIRO *et al.*, 2008). A tensão residual pode ser entendida como a tensão que permanece dentro de um material após a fabricação e processamento do material na ausência de forças externas (incluindo a gravidade) ou gradientes térmicos (WITHERS, *et al.* 2008). Quanto à sua natureza, podem ser classificadas como tensões residuais de tração, quando assumem valores positivos, ou tensões residuais de compressão, para valores negativos. Tensões residuais compressivas tendem a ser benéficas, uma vez que tendem a interromper a nucleação e/ou propagação de trincas, além de melhorar características de fadiga e vida em fadiga e reduzir a corrosão no material usinado (WU; MATSUMOTO, 1990). Já as tensões residuais de tração exercem influência contrária, facilitam a nucleação e propagação de trincas e reduzem o desempenho do material, sendo, portanto, indesejadas (OLIVEIRA, 2011).

Tensões residuais são o resultado tanto do efeito térmico durante a usinagem, quanto do trabalho mecânico realizado na superfície e subsuperfície dos materiais. Mais precisamente, as tensões residuais na usinagem são induzidas como consequência de deformação plástica não homogênea induzida por cargas mecânicas e térmicas associadas ao processo de formação de cavacos e a interação entre a ferramenta e superfície recém-usinada nas proximidades da aresta de corte da ferramenta (EZUGWU; WANG; MACHADO, 1999)

Diversas pesquisas têm sido realizadas buscando investigar a influência de parâmetros de corte sobre as tensões residuais. A influência dos parâmetros de usinagem na tensão residual superficial não é generalizada, como foi demonstrado em algumas pesquisas como as de El-Khabeery e Fattouh (1989) e Wan *et al.* (2013). Assim, os dados em diferentes pesquisas podem levar a diferentes entendimentos, ou às vezes conclusões opostas, sobre o efeito de algum parâmetro na tensão residual (MA, *et al.*, 2016), sendo, portanto, cada estudo realizado importante para gerar contribuições para o meio acadêmico.

De acordo com Axinte e Dewes (2002), o aumento da velocidade de corte e avanço por dente faz com que a tensão residual de compressão diminua, provavelmente devido a um efeito térmico mais alto na superfície da peça de trabalho. Para El-Khabeery e Fattouh, (1989), maior profundidade de corte e avanço por dente no fresamento apresentaram efeitos prejudiciais ao gerar maiores tensões residuais de tração. Na pesquisa de Thakur e Gangopadhyay (2016), a aplicação de fluidos de corte foi benéfica para a redução da tensão residual de tração, devido à penetração do fluido de corte na interface ferramenta e superfície usinada.

Reimer e Luo (2018) realizaram o fresamento do aço ABNT H13 e identificaram que o avanço por dente teve o efeito mais influente sobre as tensões residuais, seguido da velocidade de corte e profundidade de usinagem. Maiores valores para velocidade de corte e profundidade de usinagem aumentaram a tensão residual de tração até um certo ponto, até que a tensão residual de tração diminuiu. O incremento do avanço por dente diminuiu a tensão residual de tração até um ponto ótimo, e posteriormente a tensão residual aumentou novamente.

O objetivo desta pesquisa foi a caracterização da superfície resultante da operação de fresamento frontal do aço ABNT H13. Aplicou-se um planejamento experimental variando –se velocidade de corte, avanço por dente, profundidade de usinagem e utilização ou não de fluido de corte e observou-se a influência destes parâmetros sobre a rugosidade e tensões residuais.

## 2.METODOLOGIA

O material usado como corpo de prova foi o aço ABNT H13 submetido ao tratamento térmico de recozimento para alívio das tensões, o que resultou em uma dureza média de 188 HV. Os testes de fresamento, Fig.1 (a), foram realizados em um centro de usinagem ROMI modelo Discovery 560, equipado com comando numérico computadorizado SIEMENS 810D, com potência de 9kW e rotação máxima de 7500 rpm. Para os testes sob lubri-refrigeração foi utilizado o fluido de corte Petronas Mecafluid S 3000 diluído a 10%. Antes da execução dos ensaios de fresamento, foi realizada uma operação de pré-usinagem utilizando-se condições brandas (velocidade de corte de 100 m/min, avanço por dente de 0,05 mm/dente e profundidade de corte de 0,5 mm, sem a presença de fluido de corte) com o objetivo de eliminar todos os resíduos superficiais e garantir a homogeneização dos experimentos, afetando minimamente a integridade estrutural dos corpos de prova. Foi utilizada uma fresa frontal de 50 mm de diâmetro com três dentes e ângulo de posição principal de 45° (código Sandvik Coromant ASX 445-050A03R). O inserto de metal duro utilizado foi Mitsubishi SEMT13T3AGSN-JM MP 6120, ângulo de ponta entre as arestas de 90°, ângulo de folga de 20°, classe ISO P. Para avaliar a influência dos fatores: velocidade de corte, avanço por dente, profundidade de usinagem e utilização do fluido de corte (Tab. 1) sobre rugosidade e tensões residuais do aço ABNT H13, utilizou-se um planejamento fracionário Plackett-Burman, classificado como delineamento fatorial fracionado de dois níveis, ou simplesmente, planejamento do tipo 2<sup>k</sup> (nível de significância de 5%). Este planejamento é frequentemente aplicado quando muitos fatores são considerados e o objetivo é identificar os mais importantes no início da fase de experimentação (MONTGOMERY, 2004). Optou-se pela aplicação do planejamento Plackett Burmann com 12 testes. Foram adicionados 4 pontos centrais com réplicas (1 repetição para cada ponto central), totalizando 16 condições de usinagem.

Tabela 1 - Parâmetros de corte utilizados nos ensaios e seus níveis de variação

Fatores	Símbolo	Nível Inferior (-1)	Ponto central (0)	Nível Superior(+1)
Velocidade de corte (m/min)	$v_c$	100	150	200
Avanço por dente (mm/dente)	$f_z$	0,05	0,10	0,15
Profundidade de usinagem (mm)	$a_p$	0,5	1	1,5
Fluido de corte	$FC$	Sim	---	Não

Para medição do desvio aritmético médio do perfil ( $R_a$ ), utilizou-se um rugosímetro Taylor Hobson, modelo Surtronic 3+, a configuração do experimento é mostrada na Fig. 1 (b). O procedimento consistiu em realizar o ajuste do equipamento antes das medições. Em seguida, as medições foram realizadas em três pontos igualmente distribuídos ao longo de uma reta paralela à direção do avanço na região central do corpo de prova e utilizando-se comprimento de amostragem de 0,8 mm.

As tensões residuais foram medidas conforme a norma ASTM E837 (2007), que rege a medição de tensões residuais pelo método do furo cego incremental, a configuração do sistema de medição foi apresentada na Fig. 1 (c). Utilizou-se o equipamento RS-200 Milling Guide, fabricado pela Vishay Precision Group. O método consistiu em usinar o ABNT H13 até a profundidade de 1 mm, utilizando uma microfresa Jet FG38 (diâmetro de 1,59 mm). Utilizou-se uma roseta extensométrica Excel PA 06 060 RF 120 para registro das variações dimensionais decorrentes do alívio das tensões nas direções principais da superfície (eixos x e y), sendo o eixo x a direção do avanço e y a direção perpendicular ao avanço. Os dados obtidos em cada teste foram tratados no *software* H-Drill (Hole-Drilling Residual Stress Calculation Program, Vishay Precision Group). As tensões residuais foram avaliadas para a profundidade de 0,475 mm.

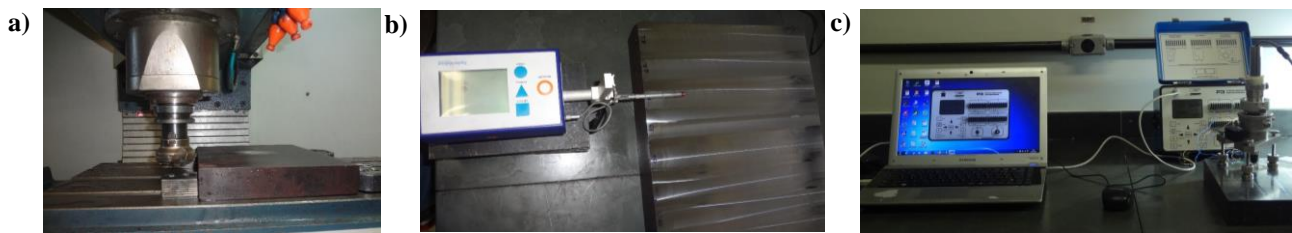


Figura 1. Configuração dos experimentos a) fresamento b) medição da rugosidade c) medição das tensões residuais.

### 3. RESULTADOS

Primeiramente serão apresentados os resultados do desvio aritmético médio do perfil ( $R_a$ ), e em seguida o comportamento das tensões residuais.

#### 3.1 Rugosidade da superfície fresada

Após verificação dos resíduos, que seguiram uma distribuição normal, foi feita a análise de variância para o desvio aritmético médio ( $R_a$ ). A Tabela 2 apresenta os resultados.

Tabela 2 -Valores p da ANOVA para o desvio aritmético médio ( $R_a$ ) gerado pelos insertos de metal duro.

Parâmetros do modelo		Valor p	Contribuição
Fatores	$v_c$ (m/min)	0,455	
	$f_z$ (mm/dente)	<u>0,023</u>	28,7%
	$a_p$ (mm)	0,072	
	$F_C$	0,173	

Constatou-se que o único parâmetro significativo foi o avanço por dente, com uma contribuição de 28,7% para o modelo. Maiores valores de avanço por dente implicaram em maior rugosidade, o que corrobora a literatura, já que a rugosidade pode ser explicada como marcas do avanço na superfície da peça. A Figura 2 apresenta o efeito principal da velocidade de corte, avanço por dente e profundidade de usinagem sobre ( $R_a$ ).

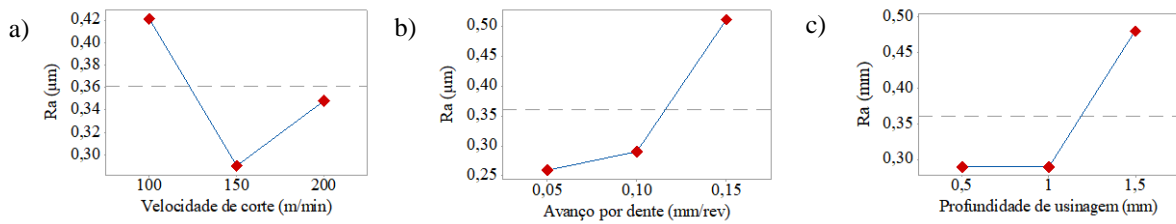


Figura 2. Efeitos principais sobre Ra a) velocidade de corte b) avanço por dente c) profundidade de usinagem

### 3.2 Tensões residuais

Após verificação dos resíduos, que seguiram uma distribuição normal, foi feita a análise de variância para as tensões residuais e observou-se que o fluido de corte foi o fator mais influente sobre as tensões residuais. A Tabela 3 apresenta os resultados.

Tabela 3 -Valores p da ANOVA para as tensões residuais induzidas pelos insertos de metal duro

Parâmetros do modelo		Valor p	Contribuição
Fatores	$v_c$ (m/min)	0,112	
	$f_z$ (mm/dente)	0,728	
	$a_p$ (mm)	0,258	
	FC	0,009	39%

Para avaliar os efeitos dos parâmetros de corte sobre as tensões residuais, selecionou-se entre os 16 testes aqueles com condições de usinagem semelhantes, em que apenas um parâmetro de corte variasse. Para a condição apresentada na Fig. 3(a), foram mantidos os parâmetros  $f_z$ ,  $a_p$  e fluido de corte, enquanto a velocidade de corte foi modificada. Observa-se que o aumento da velocidade de alterou as tensões residuais, que passaram de compressão para tração. Assim, pode-se dizer que o aumento da velocidade de corte pode ter levado ao aumento da temperatura na superfície do material, provocando deformação plástica não homogênea, assim como aconteceu com o efeito da não utilização do fluido de corte.

Na Figura 3(b), os parâmetros  $v_c$ ,  $a_p$  e fluido de corte foram mantidos, enquanto variou-se o avanço por dente. Embora as duas condições tenham apresentado tensões residuais de compressão, o aumento do avanço diminuiu o caráter compressivo da tensão residual. Este fato pode ter acontecido devido ao menor tempo de contato entre a peça e a ferramenta e consequentemente a deformação plástica também ocorreu em um menor tempo. Resultados semelhantes foram obtidos por Zhang, Ding e Li (2012) durante o fresamento do aço ABNT H13.

Na Figura 3(c), foram comparados dois testes com as mesmas condições de  $v_c$ ,  $f_z$  e fluido de corte, variando-se apenas a profundidade de usinagem. Para as duas situações a tensão residual foi de tração, entretanto o aumento de  $a_p$  aumentou a tração no material. Resultados semelhantes foram obtidos por Reimer e Luo (2018) e por Ma et al. (2016).

Na Figura 3(d) comparou-se dois testes em que foram utilizados os mesmos valores de  $v_c$ ,  $f_z$  e  $a_p$ , enquanto variou-se a presença ou não do fluido de corte. Observou-se que a presença do fluido de corte mudou a tensão residual de tração para compressão, o que foi benéfico para o material. Devillez et al. (2011) apresentaram resultados semelhantes, e explicaram que a redução da tensão residual de tração com a utilização do fluido de corte ocorre devido à sua função refrigerante, reduzindo a temperatura de superfície do material usinado. Dessa forma, na condição em que foi utilizado o fluido de corte, o efeito da temperatura sobre a tensão residual de tração foi amenizado, levando a uma tensão residual de compressão.

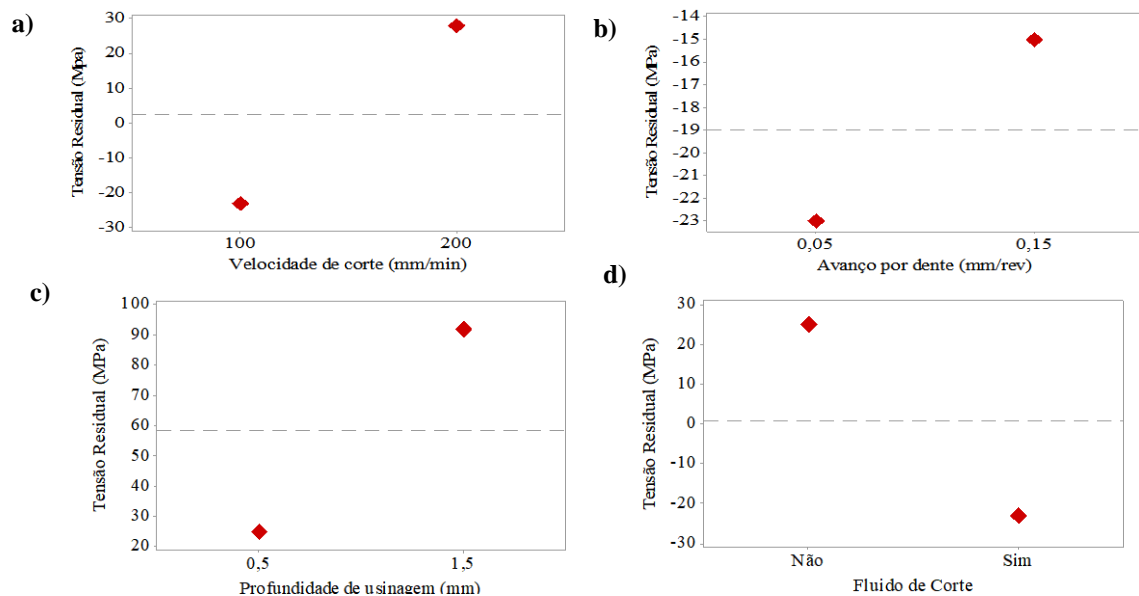


Figura 3. Efeito dos parâmetros de corte sobre a tensão residual a) velocidade de corte b) avanço por dente c) profundidade de usinagem e d) fluido de corte

#### 4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A partir dos resultados e discussões a respeito da integridade superficial do ABNT H13 após o fresamento apresentados neste trabalho, algumas considerações podem ser feitas. Para a rugosidade, o fator mais influente foi o avanço por dente. Valores mais elevados de avanço por dente aumentaram a rugosidade superficial do aço ABNT H13, o que já era esperado. No entanto, nenhum dos demais fatores avaliados (velocidade de corte, profundidade de usinagem e uso de fluido corte) apresentou influência estatisticamente significativa sobre o desvio médio aritmético. De maneira geral, pode-se dizer que à medida em que os parâmetros de corte aumentam e, conseqüentemente, os esforços e as vibrações no sistema, bem como a quantidade de material retirada na operação, o acabamento superficial tende a deteriorar.

As tensões residuais foram analisadas considerando-se a variação de um parâmetro de corte por vez, enquanto os demais foram mantidos constantes. A análise foi feita no sentido de identificar qual parâmetro gerou maior benefício para a superfície usinada, cuja condição ideal seria maiores tensões residuais de compressão, ou uma redução na tensão residual de tração. Observou-se que a presença do fluido de corte, velocidade de corte, avanço por dente e profundidade de usinagem em níveis baixos foram as condições de usinagem que propiciaram tensões residuais compressivas ou de tração de menor intensidade.

#### 6. REFERÊNCIAS

- ASM International. Handbook Committee. “*Properties and selection– irons, steels, and highperformance alloys*”. ASM handbook, v. 10, Nº 1, ASM International, 1990.
- ASTM Standard E 837, “*Determining residual stresses by the hole-drilling strain-gage method*”, 2008.
- Axinte, D.a; Dewes, R.c. “Surface integrity of hot work tool steel after high speed milling-experimental data and empirical models.” *Journal Of Materials Processing Technology*, v. 127, n. 3, p.325-335, out. 2002. Elsevier BV.
- Devillez, A. et al. “Dry machining of Inconel 718, workpiece surface integrity.” *Journal Of Materials Processing Technology*, v. 211, n. 10, p.1590-1598, out. 2011. Elsevier BV.
- Ding, T, et al. “Empirical models and optimal cutting parameters for cutting forces and surface roughness in hard milling of AISI H13 steel. *The International Journal Of Advanced Manufacturing Technology*, v. 51, n. 1-4, p.45-55, 18 mar. 2010. Springer Nature.
- Diniz, A.E., Marcondes, F. C., Coppini, N. “*Tecnologia da Usinagem dos Materiais*”. 8ª edição. São Paulo: Artliber, 270 p., 2012.
- El-Khabeery, M.M.; Fattouh, M. “Residual stress distribution caused by milling.” *International Journal Of Machine Tools And Manufacture*, v. 29, n. 3, p.391-401, jan. 1989.
- Ezugwu, E.O.; Wang, Z.M.; Machado, A.R. “The machinability of nickel-based alloys: a review.” *Journal Of Materials Processing Technology*, v. 86, n. 1-3, p.1-16, fev. 1999.
- Hassanpour, H. et al. “Investigation of surface roughness, microhardness and white layer thickness in hard milling of AISI 4340 using minimum quantity lubrication.” *Journal Of Cleaner Production*, v. 120, p.124-134, 2016. Elsevier

BV.

- Ma, Y. *et al.* "Prediction of surface residual stress after end milling based on cutting force and temperature." *Journal Of Materials Processing Technology*, v. 235, p.41-48, set. 2016. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2016.04.002>.
- Montgomery, D.C. "*Design and Analysis of Experiments*". New York: John Wiley; 2004.
- Oliveira, T.L.L.; Neves, F.O.; Braga, D.U.; Rezende A.C. "Efeito do tratamento térmico sobre tensões residuais em produtos de aço forjados a frio" In: Congresso Brasileiro de Engenharia de Fabricação, 6, 2001, Caxias do Sul. Anais. Caxias do Sul, Rio Grande do Sul, 2011.
- Outeiro, J.c. *et al.* "Analysis of residual stresses induced by dry turning of difficult-to-machine materials." *Cirp Annals*, v. 57, n. 1, p.77-80, 2008. Elsevier BV.
- Reimer, A.; Luo, X. "Prediction of residual stress in precision milling of AISI H13 steel." *Procedia Cirp*, v. 71, p.329-334, 2018. Elsevier BV.
- Thakur, A.; Gangopadhyay, S. "State-of-the-art in surface integrity in machining of nickel-based super alloys." *International Journal Of Machine Tools And Manufacture*, v. 100, p.25-54, jan. 2016. Elsevier BV.
- Wan, y *et al.* "An experiment-based investigation on surface corrosion resistance behaviors of aluminum alloy 7050-T7451 after end milling." *Proceedings Of The Institution Of Mechanical Engineers, Part J: Journal of Engineering Tribology*, v. 227, n. 11, p.1297-1305, 25 jun. 2013. SAGE Publications.
- Withers, P.J. *et al.* "Recent advances in residual stress measurement." *International Journal Of Pressure Vessels And Piping*, v. 85, n. 3, p.118-127, mar. 2008. Elsevier BV.
- Wu, D. W.; Matsumoto, Y. "The Effect of Hardness on Residual Stresses in Orthogonal Machining of AISI 4340 Steel." *Journal Of Engineering For Industry*, v. 112, n. 3, p.245-252, 1990. ASME International.
- Zhang, S.; Ding, T. C.; Li, J. F. "Determination of surface and in-depth residual stress distributions induced by hard milling of H13 steel." *Production Engineering*, v. 6, n. 4-5, p.375-383, may 2012. Springer Nature.

## 7. RESPONSABILIDADE PELAS INFORMAÇÕES

Os autores são os únicos responsáveis pelas informações incluídas neste trabalho.

### Study on surface integrity in the front milling of AISI H13 steel

Michele Lisboa Silveira

Anderson Junior dos Santos

Paulo Eustáquio de Faria

Alexandre Mendes Abrão

Universidade Federal de Minas Gerais, Avenida Antônio Carlos, 6627, Pampulha, Belo Horizonte MG, CEP 31270-901

michelesilveira1991@gmail.com, ndersonsantos@hotmail.com, paulofaria@ufmg.br, abrao@demec.ufmg.br

#### Abstract.

*Tool steels like ABNT H13 are used in the manufacture of molds and dies for forging and casting. These molds and dies require high quality and precision to be applied in the durable consumer goods industry. One of the ways of processing these materials is through milling, operation performed to define shape, dimensions and finish employing rotating tools. As a result of the machining operation, surface integrity becomes a characteristic of critical quality for the performance of the component produced, especially when it comes to materials to be applied under severe conditions. The present work consists in the study of the influence of the conditions of milling on the roughness and residual stresses of AISI H13 steel. It was sought to vary the parameters cutting speed, feed per tooth, machining depth and use of cutting fluid using carbide inserts. The roughness was evaluated by measuring the mean arithmetic deviation of the evaluated profile (Ra), and the residual stresses were measured in the direction on feed, and interpreted for their nature and intensity. The results indicated that the most influential parameter on the roughness was the feed per tooth and that residual compression stresses or residual tensile stresses of lesser intensity are induced by employing low cutting speed, low feed per tooth, low machining depth and dry cutting.*

**Keywords:** *Tool steels. Machining. Roughness. Residual stresses.*

#### RESPONSIBILITY NOTICE

The authors are the only responsible for the printed material included in this paper.