

INFLUÊNCIA DOS PARÂMETROS DE CORTE NO DESVIO GEOMÉTRICO DE PERPENDICULARIDADE NO FRESAMENTO DE UM AÇO AISI H13

Ricardo Augusto Gonçalves

Universidade Federal dos Vales do Jequitinhonha e Mucuri - Campus JK - Rodovia MGT 367 - Km 583, nº 5000, Alto da Jacuba - Diamantina/MG

ricardo.augusto@ict.ufjm.edu.br

Igor César Pereira

Universidade Federal de Ouro Preto, Campus Morro do Cruzeiro, S/N, Bauxita, 35400-000. Ouro Preto/MG, Brasil

igor.pereira@ufop.edu.br

Resumo: O fresamento de cavidades é uma operação muito importante na fabricação de matrizes, sendo uma operação relativamente complexa devido ao comprimento em balanço da ferramenta, tolerâncias geométricas e acabamento superficial que esses componentes necessitam. As tolerâncias geométricas são pontos críticos nesses componentes, devido às partes necessárias para a montagem de uma matriz. Desta forma, a qualidade final da peça usinada neste processo é indispensável, não apenas referente ao acabamento superficial, mas sobretudo em relação aos desvios geométricos das superfícies geradas, como a perpendicularidade. Vários parâmetros envolvidos nos processos de usinagem irão influenciar estes desvios geométricos. Assim, o objetivo principal deste trabalho é investigar a influência dos parâmetros de corte, avanço por dente e penetração de trabalho no desvio geométrico de perpendicularidade durante o fresamento de superfícies a 90° de um aço AISI H13 com fresa de topo inteiriça de metal duro. Os resultados mostraram que o avanço por dente foi o parâmetro mais influente no desvio de perpendicularidade, sendo que o aumento do avanço levou a redução significativa do desvio de perpendicularidade.

Palavras-chave: Desvio de Perpendicularidade; Fresamento; Aço AISI H13; Parâmetros de Corte.

1. INTRODUÇÃO

O aço AISI H13 endurecido tem sido amplamente aplicado no setor de fabricação de moldes e matrizes. Esses aços endurecidos têm boa estabilidade dimensional combinada com alta dureza e resistência mecânica, boa resistência ao choque térmico e fadiga térmica (Li *et al.*, 2018). Entretanto, na usinagem estes materiais são considerados materiais de difícil corte e cuidados devem ser tomados ao selecionar as condições de corte corretas (Chinchani e Choudhury, 2015).

As tolerâncias geométricas têm papel fundamental na montagem e desempenho dos componentes, dentre elas está a perpendicularidade. De acordo com Agostinho *et al.* (2020), a diferença de posição perpendicular, determinada por uma tolerância de perpendicularismo T_{PR} é o desvio angular, tomado como referência o ângulo reto entre uma superfície, ou uma reta, supondo-se como elemento de referência uma superfície ou uma reta. Na Figura 1, de acordo com a norma ABNT NBR 6409, é apresentada a representação esquemática da medição do desvio de perpendicularidade, exemplificando o campo de tolerância que é limitado por dois planos paralelos, afastados de uma distância “t” e perpendiculares à superfície de referência. Ainda sobre a importância das tolerâncias geométricas, Ong e Hinds (2003) e Hinds e Ong (2004) assumem que a deflexão da ferramenta, peça de trabalho, fuso da máquina e fixação são fontes importantes de erros geométricos e dimensionais na usinagem.

Segundo Sheth e George (2016), aprimorar a qualidade durante a fabricação a fim de melhorar o desempenho do produto é a necessidade básica de toda indústria. Superar desafios como tolerâncias dimensionais/geométricas, bom acabamento superficial, alta taxa de produção, desgaste reduzido das ferramentas são objetivos das indústrias de produção. Segundo os autores, os desvios geométricos, ainda que dentro dos limites de tolerância, podem gerar alguns problemas na montagem entre as partes.

Amir *et al.* (2021) analisou a influência de três diferentes ligas de alumínio sobre a circularidade, cilindridade e perpendicularidade, sendo que a de maior resistência mecânica obteve os menores erros. Hazarika *et al.* (2009) analisaram a influência da rugosidade da superfície de referência sobre os desvios geométricos de paralelismo e perpendicularidade de peças fresadas. Em alguns casos uma superfície de referência de maior rugosidade fornece um melhor paralelismo e perpendicularidade. Qin *et al.* (2007) propuseram um modelo para previsão de desvio geométrico na usinagem da peça que considera o desvio de posição, as deformações elásticas da peça de trabalho e o erro de dado inconsistente.

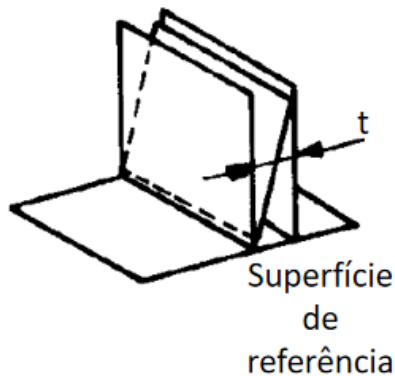


Figura 1. Representação esquemática do desvio de perpendicularidade (Adaptado de ABNT, 1997)

Desta forma, o objetivo deste trabalho é investigar os efeitos do avanço por dente e da penetração de trabalho sobre o desvio de perpendicularidade. Para essa investigação escolheu-se uma condição similar ao fresamento de cavidades com uma ferramenta longa, sendo o material da peça um aço AISI H13 e uma ferramenta de metal duro com relação comprimento/diâmetro de aproximadamente 8,3D.

2. METODOLOGIA

2.1 Materiais

O fresamento de superfícies a 90° foi realizado em um aço AISI H13 recozido para ser aplicado no trabalho a quente, com dureza média de 174 HBN e com dimensões aproximadas de 160x160x140 mm. A escolha foi em função da grande utilização deste material na fabricação de matrizes, componente esse que requer amplamente a aplicação do fresamento. A composição química do aço AISI H13 é mostrada na Tab.1.

Tabela 1. Composição química do aço ferramenta AISI H13

C	Mn	Si	Cr	Ni	Mo	V
0,32-0,45	0,20-0,50	0,80-1,20	4,75-5,50	0,3(max)	1,10-1,75	0,80-1,20

2.2 Procedimento Experimental

Os testes de fresamento foram realizados em um centro de usinagem D600 (Romi) com 11 kW de potência e rotação máxima de 7500 rpm. A velocidade de corte (v_c) = 60 m/min, profundidade de corte (a_p) = 18 mm e comprimento em balaço = 50 mm foram mantidos constantes em todos os ensaios, os parâmetros de corte que foram variados estão descritos na Tab. 2. Os valores das condições de corte variadas foram escolhidos levando em consideração as indicações do fabricante, material da peça e condições de estabilidade dinâmica. Antes de cada ensaio, a fim de manter a superfície nas mesmas condições, foi realizado um desbaste da superfície utilizando uma fresa de HSS com 12 mm de diâmetro e dois canais, os parâmetros de corte para o desbaste das superfícies foram: velocidade de corte (v_c) = 50 m/min, avanço por dente (f_z) = 0,05 mm/dente e penetração de trabalho (a_e) = 0,1 mm.

Tabela 2. Parâmetros de corte

Avanço por dente - f_z (mm/dente)	Penetração de trabalho - a_e (mm)
0,05	0,1
0,10	0,2
0,15	0,3

Na Figura 2.a é apresentada a montagem da fresa e corpo de prova na máquina-ferramenta. Para o experimento foi realizado um fresamento concordante de superfícies a 90° e cada condição foi ensaiada 3 vezes, ou seja, foram produzidas três superfícies na mesma condição. O desvio geométrico de perpendicularidade de cada superfície foi medido 3 vezes e com isso cada condição de corte gerou 9 resultados de medição. Devido à configuração do corpo de prova, quatro superfícies estavam disponíveis para usinagem a cada lote de ensaios. Na Figura 2.b são apresentadas as superfícies usinadas juntamente com o sentido de avanço da ferramenta no corte concordante. Uma fresa longa ($L/D=8,3$) de metal duro (Fig. 1.c) com 6 mm de diâmetro e dois canais da classe K40 e 20 mm de comprimento de corte foi fixada em um mandril com pinça para a realização dos ensaios de fresamento das superfícies.

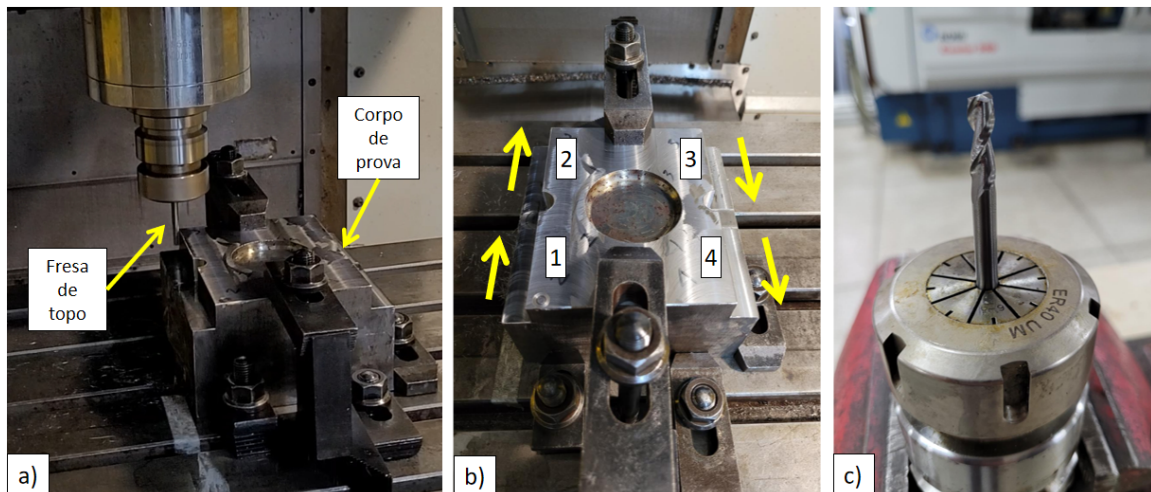


Figura 2. a) Montagem da ferramenta e corpo de prova na máquina-ferramenta, b) superfícies fresadas e sentido de avanço da fresa e c) fresa de metal duro

As medições do desvio de perpendicularidade foram realizadas em uma máquina de medir por coordenadas tridimensionais Tesa micro-hite 3D, como mostrado na Fig. 3. O desvio foi obtido entre a superfície vertical fresada e a base da máquina de medição, sendo que o plano utilizado para a medição do desvio foi obtido apalpando 5 pontos distintos da superfície usinada (Fig. 3). Os resultados do desvio de perpendicularidade apresentados nos gráficos presentes no tópico resultados e discussão equivalem aos valores médios do desvio obtidos a partir das 9 medições. Além disso, a barra de erros apresentada nestes mesmos gráficos correspondem ao intervalo de confiança de 95% acima e abaixo da média, calculado com base no desvio padrão das amostras (σ), número de amostras ($n = 9$) e nível de significância ($\alpha = 0,05$).

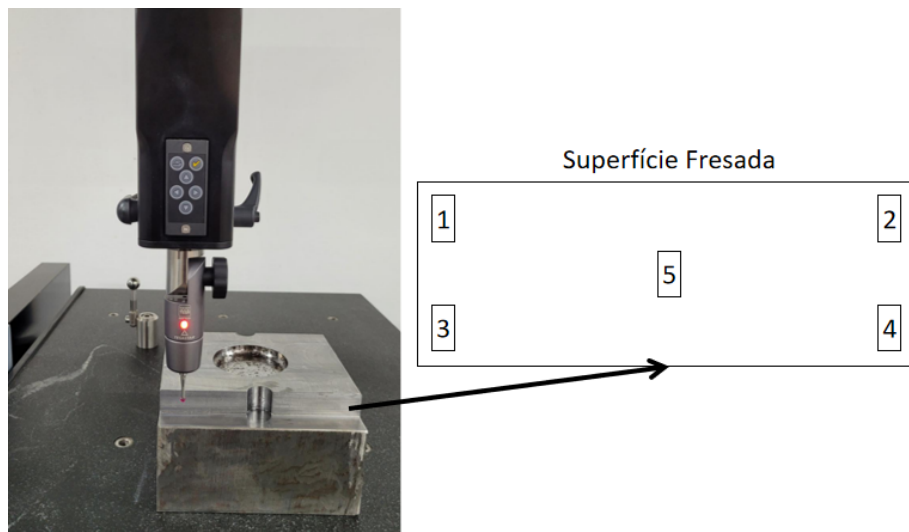


Figura 3. Medição do desvio de perpendicularidade

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Na Figura 4 é apresentado o comportamento do desvio de perpendicularidade na superfície fresada em função do avanço por dente (f_z). É possível observar uma diminuição significativa do desvio para os maiores avanços, passando em média de 0,030 mm para o menor avanço (0,05 mm/dente) para 0,004 mm para o maior avanço ensaiado (0,15 mm/dente). Esta alteração se comprova estatisticamente embasada nos intervalos de confiança das médias obtidas para o desvio, exceto para o avanço intermediário (0,10 mm/dente) no qual o intervalo de confiança apresentou um valor elevado. A redução do desvio de perpendicularidade com o aumento do avanço pode ser em função do comportamento dinâmico (vibração) em baixos avanços e a rugosidade da superfície avaliada, quanto maior o valor de rugosidade menor é o desvio.

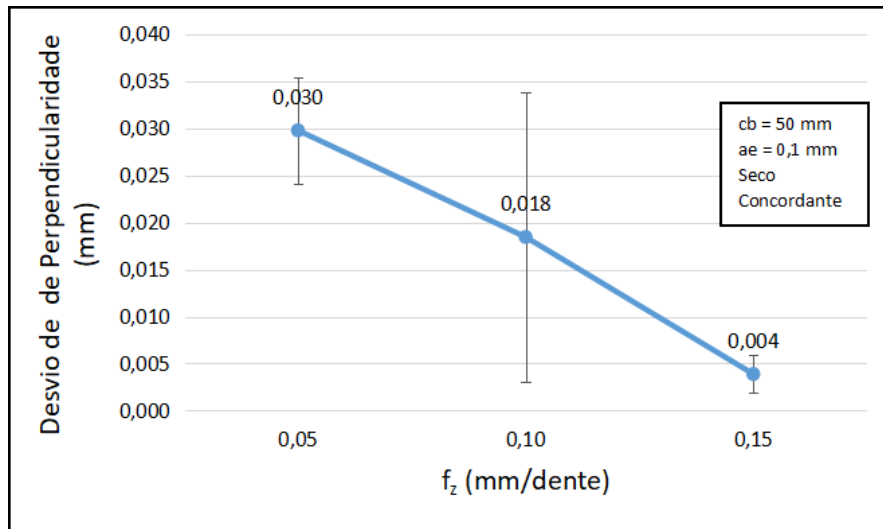


Figura 4. Desvio de perpendicularidade em função do avanço por dente

Na Figura 5 são apresentados os desvios de perpendicularidade em função da penetração de trabalho (a_e). Neste caso, diferentemente do observado com a variação do avanço por dente, não é possível identificar uma tendência na variação do desvio de perpendicularidade nas diferentes penetrações de trabalho. O maior desvio de 0,032 mm foi obtido no fresamento com a maior penetração de trabalho (0,3 mm). Por outro lado, o menor desvio de 0,012 mm foi obtido com a penetração de trabalho intermediária (0,2 mm). A diferença entre o maior e menor valor do desvio neste caso novamente se comprova estatisticamente com base nos intervalos de confiança das médias obtidas, exceto para o desvio obtido na usinagem com a menor penetração de trabalho (0,1 mm).

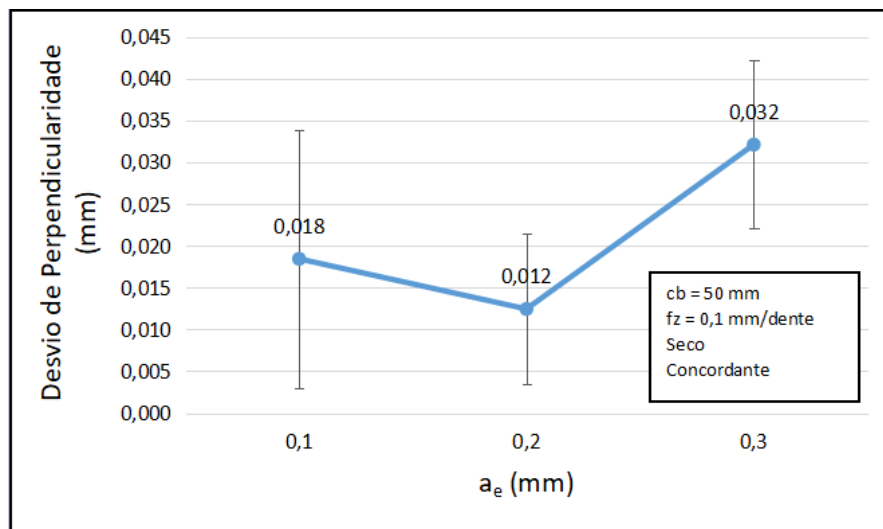


Figura 5. Desvio de perpendicularidade em função penetração de trabalho

4. CONCLUSÃO

A investigação acerca do efeito dos parâmetros de corte no desvio de perpendicularidade levou a conclusões importantes sobre o comportamento do aço AISI H13 durante os ensaios de fresamento de superfícies a 90° desenvolvidos no presente trabalho.

- Foi observada uma tendência significativa de aumento do desvio de perpendicularidade com o aumento do avanço por dente (f_z) durante o processo;
- A variação da penetração de trabalho (a_e) não causou uma tendência de aumento ou diminuição do desvio, contudo, o maior desvio foi obtido com a maior penetração ensaiada.

5. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Ouro Preto - UFOP e o Instituto de Ciência e Tecnologia da Universidade Federal dos Vales do Jequitinhonha e Mucuri - UFVJM.

6. REFERÊNCIAS

- Aamir, M., Tolouei-Rad, M., Giasin, K., Vafadar, A., Koklu, U., & Keeble, W. (2021). Evaluation of the surface defects and dimensional tolerances in multi-hole drilling of AA5083, AA6061, and AA2024. *Applied Sciences*, 11(9), 4285. <https://doi.org/10.3390/app11094285>
- ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas, “ABNT NBR 6409 - Tolerâncias geométricas - Tolerâncias de forma, orientação, posição e batimento - Generalidades, símbolos, definições e indicações em desenho.” Rio de Janeiro, p. 19, 1997.
- Agostinho, O. L., Rodrigues, A. C. dos S. e Lirani, J., 2020. Tolerâncias, ajustes, desvios e análise de dimensões: princípios de engenharia de fabricação mecânica, 2ª ed. São Paulo: Blucher.
- Chinchani, S. e Choudhury, S. K., 2015. “Machining of hardened steel—Experimental investigations, performance modeling and cooling techniques: A review,” *Int. J. Mach. Tools Manuf.*, vol. 89, pp. 95–109.
- Hazarika, M., Dixit, U. S., & Deb, S. (2010). Effect of datum surface roughness on parallelism and perpendicularity tolerances in milling of prismatic parts. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, 224(9), 1377-1388. <https://doi.org/10.1243/09544054JEM1708>
- Hinds, B. K., & Ong, T. S. (2004). End milling of circular pockets to meet geometric tolerances. *Journal of Materials Processing Technology*, 152(3), 339-345. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2004.04.375>
- Li, B., Zhang, S., Zhang, Q., Chen, J. e Zhang, J., 2018. “Modelling of phase transformations induced by thermo-mechanical loads considering stress-strain effects in hard milling of AISI H13 steel,” *Int. J. Mech. Sci.*, vol. 149, pp. 241–253.
- Ong, T. S., & Hinds, B. K. (2003). The application of tool deflection knowledge in process planning to meet geometric tolerances. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 43(7), 731-737. [https://doi.org/10.1016/S0890-6955\(03\)00027-0](https://doi.org/10.1016/S0890-6955(03)00027-0)
- Qin, G., Zhang, W., Wu, Z., & Wan, M. (2007). Systematic modeling of workpiece-fixturing geometric default and compliance for the prediction of workpiece machining error. <https://doi.org/10.1115/1.2336260>
- Sheth, S., & George, P. M. (2016). Experimental investigation, prediction and optimization of cylindricity and perpendicularity during drilling of WCB material using grey relational analysis. *Precision Engineering*, 45, 33-43. <https://doi.org/10.1016/j.precisioneng.2016.01.002>

7. RESPONSABILIDADE PELAS INFORMAÇÕES

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

INFLUENCE OF CUTTING PARAMETERS ON THE GEOMETRIC ERROR OF PERPENDICULARITY IN THE MILLING OF AISI H13 STEEL

Ricardo Augusto Gonçalves

Federal University of Vales do Jequitinhonha e Mucuri - Campus JK - Rodovia MGT 367 - Km 583, nº 5000, Alto da Jacuba - Diamantina/MG

ricardo.augusto@ict.ufvjm.edu.br

Igor César Pereira

Federal University of Ouro Preto, Campus Morro do Cruzeiro, S/N, Bauxita, 35400-000.Ouro Preto/MG, Brasil

igor.pereira@ufop.edu.br

Abstract. The milling of cavities is an essential operation in the manufacture of dies, being a relatively complex operation due to the overhang length of the tool, geometric tolerances, and surface finish that these components require. Geometric tolerances are critical points in these components, due to the parts needed to assemble a die. In this way, the final quality of the piece machined in this process is essential, not only in terms of surface finish but above all in relation to geometric deviations of the surfaces generated, such as perpendicularity. Several parameters involved in machining processes will influence these geometric deviations. Thus, the main objective of this work is to investigate the influence of cutting parameters, feed per tooth, and radial depth of cut on the geometric error of perpendicularity during the milling of AISI H13 steel with a solid carbide end mill. The results showed that the feed per tooth was the most influential parameter in the perpendicularity error, and the increase in the feed rate led to a significant reduction in the error.

Keywords: *Perpendicularity error; Milling; AISI H13 Steel; Cutting Parameters.*

RESPONSIBILITY NOTICE

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