

ESTUDO DO FRESAMENTO HELICOIDAL INTERPOLADO EM PEÇAS DE COMPÓSITO USANDO METODOLOGIA DE SUPERFÍCIE DE RESPOSTA

Kathlen Lopes Fazzion

Universidade Federal de São João del-Rei, Praça Frei Orlando, 170, São João del-Rei, MG, Brasil
kathlen.fazzion@hotmail.com

Jéssica Tito Vieira

Universidade Federal de São João del-Rei, Praça Frei Orlando, 170, São João del-Rei, MG, Brasil
jessica.tito@hotmail.com

Lincoln Cardoso Brandão

Universidade Federal de São João del-Rei, Praça Frei Orlando, 170, São João del-Rei, MG, Brasil
lincoln@ufs.edu.br

Samuel Alves de Freitas

Universidade Federal de São João del-Rei, Praça Frei Orlando, 170, São João del-Rei, MG, Brasil
samuelengmec@gmail.com

Waslley Amaral Coelho

Universidade Federal de São João del-Rei, Praça Frei Orlando, 170, São João del-Rei, MG, Brasil
waslleyamaral@hotmail.com

Resumo. Os compósitos cada vez mais vêm sendo utilizados na indústria aeronáutica, devido à relação custo-benefício oferecida por esses materiais. A furação de materiais compósitos laminados é um procedimento importante, pois, principalmente na indústria aeronáutica, os componentes em sua totalidade possuem furos necessários para fixação e montagem de suas partes. Porém, no processo de furação de compósitos podem ocorrer danos ao componente, como por exemplo, a delaminação na saída do furo. No presente trabalho foi estudada a influência dos parâmetros de processo como, velocidade de corte, avanço axial por dente e avanço tangencial por dente, na qualidade dos furos fabricados por fresamento helicoidal interpolado. A qualidade dos furos foi analisada mediante a medição da rugosidade média. Os experimentos foram modelados utilizando-se a metodologia de superfície de resposta e as soluções ótimas foram encontradas através de uma otimização não linear restrita. Os resultados mostraram que os fatores mais significativos para a resposta estudada foram avanço axial por dente, velocidade de corte, o termo quadrático do avanço tangencial por dente, o termo quadrático da velocidade de corte, a interação entre avanço axial por dente e avanço tangencial por dente e a interação entre avanço tangencial por dente e velocidade de corte.

Palavras chave: Fresamento Helicoidal Interpolado, Metodologia de Superfície de Resposta, Fibra de Carbono, Rugosidade média.

1. INTRODUÇÃO

Os compósitos vêm sendo utilizados em diversos setores, e principalmente no setor aeronáutico, devido ao fato de se tratar de um material de alta rigidez e baixo peso. Além disso, os compósitos são uma solução para redução de peso e consumo de combustíveis na indústria aeronáutica. Segundo Durão et al. (2013), eles consistem em um material composto de dois ou mais materiais que garantem propriedades de alto desempenho.

Os componentes aeronáuticos, em sua maioria, apresentam preferencialmente furos necessários para fixação e montagem de suas partes. Para o caso da fuselagem, é predominante o uso de rebites e não de parafusos, pois estes podem ser vulneráveis às vibrações dos sistemas (FREITAS, 2017).

Para a fixação das peças de compósitos, se faz necessária a realização de furos nesse material. O processo mais utilizado é o de furação por broca. Porém, esse processo geralmente provoca danos ao material, em sua maioria na saída do furo, tais como delaminação e arrancamento de fibras (DURÃO et al., 2013).

Segundo Haiyan et. al. (2013), uma tecnologia avançada de fabricação de furos como o fresamento helicoidal interpolado é uma boa alternativa na usinagem de materiais difíceis de cortar, como por exemplo, o plástico reforçado

com fibra de carbono. De acordo com Pereira et al. (2017), o fresamento helicoidal é um processo de fabricação de furos, no qual a ferramenta segue uma trajetória helicoidal enquanto gira em torno de seu próprio eixo.

Dessa maneira, faz-se necessário o estudo de processos alternativos para a realização de furos no material compósito, visando uma diminuição desses danos para assim garantir um acabamento melhor aos furos. Uma boa alternativa pode vir a ser a utilização do fresamento helicoidal interpolado, devido às suas características.

Cada vez mais a metodologia de superfície de resposta vem sendo associada aos processos de fabricação, trata-se de uma proposta metodológica onde deseja-se modelar e otimizar uma determinada resposta em função das variáveis de processo (MONTGOMERY, 2013).

Entre os diversos tipos de planejamentos para superfície de resposta, o planejamento composto central (*Central Composite Design* – CCD), foi então utilizado para o desenvolvimento deste trabalho, por ser um arranjo efetivo no que diz respeito a minimização do número experimentos necessários para o desenvolvimento do modelo, avaliando-se o efeito das variáveis e procurando-se pelas respostas otimizadas (SON et al., 2015).

2. PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS

Os experimentos foram realizados no Laboratório de Usinagem do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade Federal de São João del-Rei – UFSJ. Os testes foram realizados em um centro de fresamento ROMI Discovery 560 de três eixos, com velocidade de avanço rápido longitudinal e transversal de 30 m/min, rotação máxima de 10.000 rpm e potência máxima na árvore de 15 kW.

Foram fabricados corpos de prova a partir de uma placa de compósito de fibra de carbono, com espessura de 3,5 mm, os furos foram realizados com diâmetro de 10 mm utilizando-se o processo de fresamento helicoidal interpolado, onde o *set up* experimental está apresentado na Fig. 1. Foi utilizado uma fresa de topo com 6 mm de diâmetro e 6 dentes, inteiriça e de metal duro o que leva a porcentagem de 60% do diâmetro final do furo. Os furos foram realizados a seco, ou seja, sem a utilização de fluidos refrigerantes.

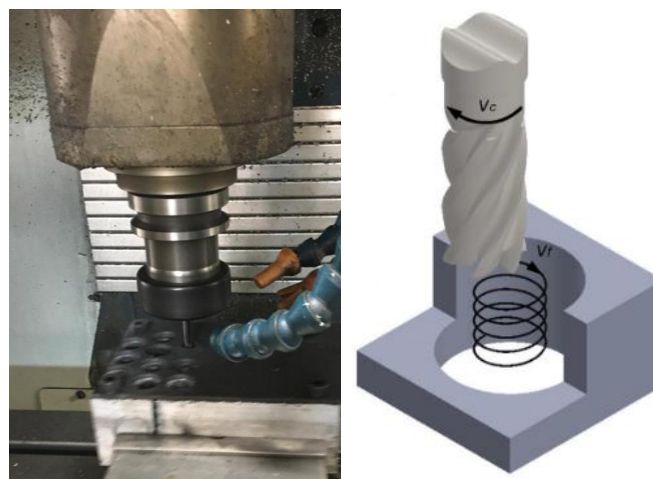


Figura 1. *Set up* experimental e representação do fresamento helicoidal interpolado (Pereira et al. 2017).

Os parâmetros de corte foram definidos de acordo com o catálogo do fabricante da ferramenta, utilizando-se aqueles que são recomendados para a usinagem de materiais não metálicos. Os parâmetros de entrada foram a velocidade de corte com dois níveis, avanço axial por dente com dois níveis e avanço tangencial por dente com dois níveis. A Tabela 1 mostra os níveis e os respectivos valores que foram empregados nos experimentos.

Tabela 1. Parâmetros de entrada.

Parâmetros de entrada	Níveis	
	-1	1
velocidade de Corte - v_c [m/min]	75	150
avanço axial por Dente – f_{za} [μ m/dente]	0,08	0,2
avanço tangencial por Dente - f_{zt} [mm/dente]	0,08	0,2

A resposta analisada foi de rugosidade média (R_a). A resposta foi obtida através de um medidor de rugosidade e perfil Surf Taylor 131 da empresa Taylor Hobson. Os experimentos foram modelados por meio da metodologia de superfície de resposta, gerando um CCD utilizando o software Minitab.

O modelo de resposta que foi obtido por mínimos quadrados ordinários (OLS) não apresentou um bom ajuste para a resposta. O teste de homocedasticidade das variâncias foi realizado, justificando o uso do método de mínimos quadrados ponderados (WLS), garantindo um bom ajuste para o modelo de regressão da resposta. O nível de

significância adotado nas análises foi de $\alpha=0,05$. O algoritmo do gradiente reduzido generalizado (GRG) presente na ferramenta solver do MS-Excel foi utilizado para realizar a otimização não linear restrita.

3. RESULTADOS

A Tabela 2 apresenta o planejamento experimental e as respostas de rugosidade média obtidas.

Tabela 2. Planejamento CCD com as repostas de rugosidade média.

Ordem Padrão	f_{za} [$\mu\text{m}/\text{dente}$]	f_{zt} [mm/dente]	v_c [m/min]	R_a [μm]
1	0,080	0,080	75,00	0,5216
2	0,200	0,080	75,00	0,9769
3	0,080	0,200	75,00	0,5567
4	0,200	0,200	75,00	0,5195
5	0,080	0,080	150,00	0,5132
6	0,200	0,080	150,00	1,1477
7	0,080	0,200	150,00	0,9831
8	0,200	0,200	150,00	0,9787
9	0,039	0,140	112,50	0,7415
10	0,241	0,140	112,50	0,7865
11	0,140	0,039	112,50	0,8048
12	0,140	0,241	112,50	0,5684
13	0,140	0,140	49,43	0,5963
14	0,140	0,140	175,57	0,8759
15	0,140	0,140	112,50	0,9838
16	0,140	0,140	112,50	0,8461
17	0,140	0,140	112,50	0,5803
18	0,140	0,140	112,50	0,7531
19	0,140	0,140	112,50	1,0226
20	0,140	0,140	112,50	1,3199

A Tabela 3 apresenta a análise de variância para a resposta R_a . Note que o avanço axial por dente, a velocidade de corte, o termo quadrático do avanço tangencial por dente, o termo quadrático da velocidade de corte, a interação entre avanço axial por dente e avanço tangencial por dente e a interação entre avanço tangencial por dente e velocidade de corte, foram estatisticamente significativos.

Tabela 3. Análise de variância para a resposta R_a .

Fonte	GL	Adj SS	Adj MS	F-Valor	P-Valor
Modelo	9	617,255	68,584	39,89	0,000
Linear	3	63,539	21,18	12,32	0,001
f_{za}	1	22,492	22,492	13,08	0,005
f_{zt}	1	4,462	4,462	2,60	0,138
v_c	1	54,366	54,366	31,62	0,000
Quadrático	3	14,582	4,861	2,83	0,093
$f_{za} * f_{za}$	1	6,206	6,206	3,61	0,087
$f_{zt} * f_{zt}$	1	13,222	13,222	7,69	0,020
$v_c * v_c$	1	7,935	7,935	4,62	0,057
Interação	3	107,584	35,861	20,86	0,000
$f_{za} * f_{zt}$	1	50,242	50,242	29,22	0,000
$f_{za} * v_c$	1	1,323	1,323	0,77	0,401
$f_{zt} * v_c$	1	25,446	25,446	14,80	0,003
Erro	10	17,194	1,719		
Lack-of-Fit	5	11,211	2,242	1,87	0,254
Erro simples	5	5,983	1,197		
Total	19	634,45			

A Figura 2 apresenta os gráficos dos efeitos principais e as interações para a resposta R_a . Na interação entre o avanço axial por dente e o avanço tangencial por dente os menores valores de rugosidade média obtidos, foi quando se utilizou o menor valor de f_{za} e o menor valor de f_{zt} . Na interação entre a velocidade de corte e o avanço axial por dente,

os menores valores de rugosidade média encontrados foi com v_c em seu nível mais baixo e f_{za} também em seu nível mais baixo. Já a interação entre a velocidade de corte e o avanço tangencial por dente, o nível mais alto de f_{zt} e o nível mais baixo de v_c geraram os menores valores de R_a .

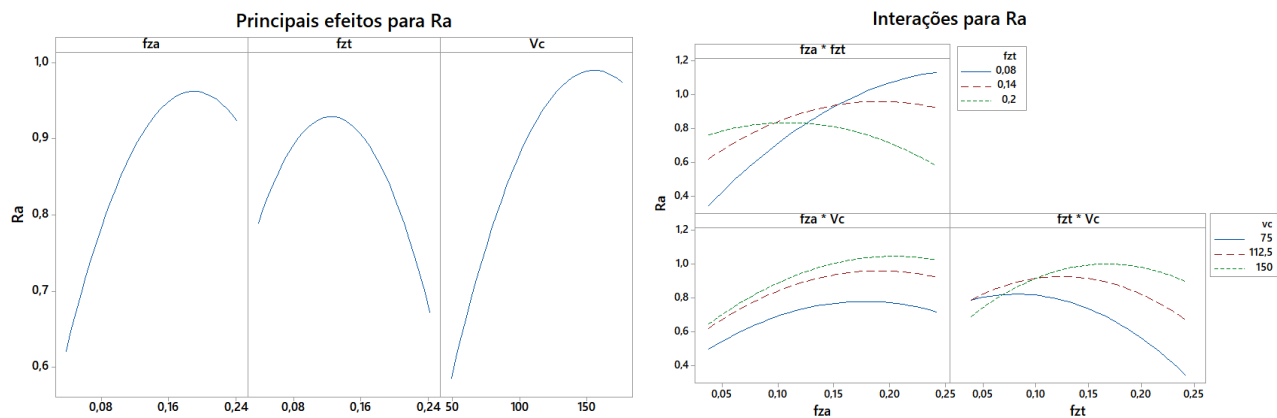


Figura 2. Gráficos de efeitos principais e interações para R_a .

A Tabela 4 apresenta os valores ótimos decodificados encontrados na otimização não linear restrita através do algoritmo do gradiente reduzido generalizado presente no solver do MS-Excel. Dessa maneira, definiu-se os valores ótimos dos parâmetros variados nesse estudo, sendo estes: velocidade de corte de 146,63m/min, avanço axial por dente de 0,20 μ m/dente e avanço tangencial por dente de 0,08mm/dente.

Tabela 4. Níveis ótimos para R_a .

R_a	
Vc [m/min]	146,63
fza [μ m/dente]	0,20
;fzt [mm/dente]	0,08

4. CONCLUSÕES

Os resultados mostraram que os fatores mais significativos para R_a foram avanço axial por dente, velocidade de corte, o termo quadrático do avanço tangencial por dente, o termo quadrático da velocidade de corte, a interação entre avanço axial por dente e avanço tangencial por dente e a interação entre avanço tangencial por dente e velocidade de corte.

Através do algoritmo GRG foi minimizada a rugosidade média R_a , podendo essa ser uma causa para diminuição da formação de delaminação na saída dos furos pelo processo de fresamento helicoidal interpolado. Foram obtidos como valores ótimos dos parâmetros variados nesse estudo, velocidade de corte de 146,63m/min, avanço axial por dente de 0,20 μ m/dente e avanço tangencial por dente de 0,08mm/dente.

5. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à FAPEMIG pelo apoio financeiro na realização desta pesquisa.

6. REFERÊNCIAS

- Durão, L.M.P., Gonçalves, D.J.S., Tavares, J. M. R. S., Albuquerque, V.H.C., Baptista, A.M., 2013. Dano na furação de placas carbono/epóxico. *Revista*, 17, 27–38.
- Freitas, S.A., 2017. Estudo Experimental do Rosqueamento de Materiais Aeronáuticos. *Dissertação (Mestrado)*. Universidade Federal de São João Del Rei, São João Del Rei.
- Haiyan, W., Xuda, Q., Hao, L., Chengzu, R. , 2013. Analysis of cutting forces in helical milling of carbon fiber–reinforced plastics. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, v. 227, n. 1, p. 62–74.
- Montgomery, Douglas C., 2013. *Design and Analysis of Experiments*.
- Pereira, R. B. D., Leite, R. R., Alvim, A. C., Paiva, A. P., Ferreira, J. R., Davimi, J. P., 2017. Multi-objective robust optimization of the sustainable helical milling process of the aluminum alloy Al 7075 using the augmented-enhanced normalized normal constraint method. v. 152, p. 474–496.

- Pereira, R. B. D., Brandão, L. C., Paiva, A. P., Ferreira, J. R., Davim, J. P., 2017. A review of helical milling process. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, v. 120, n. May, p. 27–48.
- Son, J., Vavra, J., Li, Y., Seymour, M., Forbes, V., 2015. Interactions between suspension characteristics and physicochemical properties of silver and copper oxide nanoparticles: A case study for optimizing nanoparticle stock suspensions using a central composite design. *Chemosphere* 124, pp. 136-142.

7. RESPONSABILIDADE PELAS INFORMAÇÕES

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

Study of Helicoidal Milling Process in Composite Parts Using Response Surface Methodology

Kathlen Lopes Fazzion

Department of Mechanical Engineering – Industrial Engineering, Federal University of São João del Rei (UFSJ), 170 Frei Orlando Square, São João del Rei, MG 36880-000, Brazil
kathlen.fazzion@hotmail.com

Jéssica Tito Vieira

Department of Mechanical Engineering – Industrial Engineering, Federal University of São João del Rei (UFSJ), 170 Frei Orlando Square, São João del Rei, MG 36880-000, Brazil
jessica.tito@hotmail.com

Lincoln Cardoso Brandão

Department of Mechanical Engineering – Industrial Engineering, Federal University of São João del Rei (UFSJ), 170 Frei Orlando Square, São João del Rei, MG 36880-000, Brazil
lincoln@ufs.edu.br

Samuel Alves de Freitas

Department of Mechanical Engineering – Industrial Engineering, Federal University of São João del Rei (UFSJ), 170 Frei Orlando Square, São João del Rei, MG 36880-000, Brazil
samuelengmec@gmail.com

Waslley Amaral Coelho

Department of Mechanical Engineering – Industrial Engineering, Federal University of São João del Rei (UFSJ), 170 Frei Orlando Square, São João del Rei, MG 36880-000, Brazil
waslleyamaral@hotmail.com

Abstract. Composites have been widely used in the aeronautical industry due to the cost-benefit ratio offered by these materials. The drilling of laminated composite materials is a very important procedure because, mainly in the aeronautical industry, the components in their entirety have holes required for fixing and assembling their parts. In the process of drilling this material, part damage can occur, such as delamination at the exit of the hole. In this work the influence of cutting process parameters, axial feed per tooth and tangential feed per tooth was studied in the quality of the holes manufactured by interpolated helical milling in carbon fiber composite. The quality of the holes was analyzed by measuring the roughness average. The experiments were modeled using the Response Surface Methodology and the optimal responses were found through a Nonlinear Restricted Optimization. The results showed that the most significant factors were the axial advance per tooth, cutting speed, the quadratic term of tangential feed per tooth, the quadratic term of the cutting speed, the interaction between axial feed per tooth and tangential feed per tooth, and interaction between tangential feed per tooth and cutting speed.

Keywords: Helical Milling, Response Surface Methodology, Carbon Fiber, Roughness average.

RESPONSIBILITY NOTICE

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