

Otimização da Furação Orbital para Obtenção de Furos em Polímero Reforçado por Fibra de Carbono

Gabriela Pereira Barros

Carlos Henrique Lauro

Lincoln Cardoso Brandao

Robson Bruno Dutra Pereira

Universidade Federal de São João del-Rei (UFSJ) – Departamento de Engenharia Mecânica e Produção (DEMEP) – Praça Frei Orlando, 170 – Centro - Campus Santo Antônio, 36307-352 - São João del-Rei, MG – Brasil

gabrielapbarros15@gmail.com

carloslauro@ufsj.edu.br

lincoln@ufsj.edu.br

robsondutra@ufsj.edu.br

Resumo. Os compósitos de plástico reforçados por fibra de carbono (CFRP) tem diversas propriedades mecânicas que são atrativas para a indústria aeroespacial e aeronáutica. Entretanto, são materiais de difícil usinabilidade. Especificamente em relação à obtenção de furos nestes materiais, o processo de furação convencional apresenta diversos problemas devido sua cinemática. Diversos estudos têm proposto o processo de furação orbital como alternativa à furação convencional, apresentando melhores níveis de qualidade. O presente trabalho apresenta a modelagem e otimização da furação orbital em CFRP. Foi utilizado um planejamento composto central, considerando como fatores de controle os avanços axial e tangencial por volta e a velocidade de corte do processo. As respostas consideradas foram a rugosidade dos furos e a taxa de remoção de material (MRR), sendo obtido um modelo de regressão para a rugosidade, enquanto a taxa de remoção de material foi calculada de forma determinística. Foi realizada também a otimização bi-objetivo das respostas, através dos métodos MOPSOCD e NSGA-II, sendo que o método NSGA-II superou o MOPSOCD. Deste modo, foram obtidos valores de rugosidade entre 0,99 e 2,84 μm e para MRR entre 52224,38 e 2056012,54 mm^3/min . Assim, foram obtidas várias combinações dos níveis dos parâmetros do processo para otimização das respostas.

Palavras chave: Furação orbital, CFRP, Otimização bi-objetivo

1. INTRODUÇÃO

Compósitos de plástico reforçados por fibra de carbono (*carbon fiber reinforced plastic* - CFRP) são amplamente utilizados como materiais estruturais na indústria aeroespacial e aeronáutica (Tanaka *et al.*, 2012; Ohta *et al.*, 2012). Tal aplicabilidade se justifica devido suas propriedades mecânicas, por exemplo, alta resistência e rigidez específicas (Wu *et al.*, 2016). Entretanto, o CFRP consiste em um material de difícil usinabilidade (Tanaka *et al.*, 2012; Ohta *et al.*, 2012).

Especificamente em relação à obtenção de furos nestes materiais, o processo de furação convencional com broca helicoidal apresenta diversos problemas devido sua cinemática, acarretando delaminação e geração de rebarbas (Sadek *et al.*, 2012). Diversos estudos tem proposto o processo de furação orbital (*orbital drilling* – OD) como alternativa à furação convencional para realizar furos em CFRP, apresentando menores níveis de delaminação e danos ao material (Denkena *et al.*, 2008; Voss *et al.*, 2016).

Este estudo é realizado a fim investigar os efeitos dos parâmetros no processo de furação orbital do CFRP, além de modelá-los e fazer sua otimização de forma a obter furos com alta qualidade e produtividade, ou seja, com baixa rugosidade e alta taxa de remoção de material, e assim, que atendam de forma ainda mais confiável suas aplicações.

2. FURAÇÃO ORBITAL

No processo de furação orbital, a ferramenta de corte é presa em um eixo de rotação da ferramenta excentricamente ao eixo de revolução planetária e gira independentemente, podendo ser executada por perfuradores orbitais robóticos e por unidades de furação orbital (Tanaka *et al.* 2012). Outra opção para a furação orbital é realizar o processo no centro de torneamento com a ferramenta de corte acionada, sendo esta, explorada no presente trabalho. Já no processo de fresamento helicoidal, executado por centros de usinagem, o percurso helicoidal é gerado pela alimentação axial do eixo z do CNC sincronizado com o movimento circular gerado por números interpolação dos eixos x e y, além da rotação da ferramenta em torno de seu próprio eixo (Fang *et al.* 2015; Tanaka *et al.* 2012).

A cinemática da furação orbital, segundo Denkena *et al.* (2008), é descrita da seguinte maneira: a fresa realiza um movimento orbital em torno do eixo do furo de diâmetro Db [mm], através de uma trajetória helicoidal de diâmetro Dh [mm], com avanço axial simultâneo a uma velocidade vf [mm.min⁻¹]. A velocidade de corte é dada por vc [mm.min⁻¹] e a profundidade de corte axial por ap [mm], sendo este parâmetro o passo da hélice do percurso helicoidal.

A cinemática da furação orbital também pode ser descrita pela decomposição da trajetória helicoidal. A velocidade de avanço (vf) pode ser decomposta em velocidade de avanço tangencial da hélice (vf_{ht}) em [mm/min] e velocidade de avanço axial da hélice (vf_{ha}) em [mm/min], este cálculo está representado na Eq. 1 (Pereira *et al.*, 2017b). Na trajetória linear, a velocidade de avanço axial (vf_{ha}) pode ser descrita pelo avanço axial por dente (f_{za}) em [mm/dente], o número de dentes (z) da fresa e a rotação do *spindle* (n) em [rpm], como representado na Eq. 2. Na trajetória circular, a velocidade de avanço tangencial (vf_{ht}), a qual expressa-se pela velocidade do centro da fresa durante o movimento circular deste em relação ao diâmetro da hélice (Dh) em [mm], pode ser descrita considerando a velocidade tangencial (v_{ft}) em [mm/min], relacionada ao diâmetro do furo (Db) em [mm], como representado na Eq. 3. E a velocidade tangencial (v_{ft}) é matematicamente expressa em função do avanço tangencial por dente (f_{zt}) em [mm/dente], o número de dentes (z) e a velocidade de rotação do *spindle* (n), como representado na Eq. 4 (Pereira *et al.*, 2017b; Denkena, 2008). É importante trabalhar o percurso circular a partir da velocidade tangencial, uma vez que esta considera o avanço por dente do corte tangencial no ponto de mais alta solicitação da ferramenta.

$$V_f = \sqrt{V_{fha}^2 + V_{fht}^2} \quad (1)$$

$$V_{fha} = f_{za} \cdot z \cdot n \quad (2)$$

$$V_{fht} = V_{ft} \frac{D_h}{D_b} \quad (3)$$

$$V_{ft} = f_{zt} \cdot z \cdot n \quad (4)$$

A furação convencional ainda é abordada como a operação tradicional para obtenção de furos em CFRP, contudo, no caso de materiais compósitos, a furação convencional pode levar a defeitos específicos como delaminação, esgotamento da matriz e rebarbas de fibras (Sadek *et al.*, 2012). Os estudos de furação orbital foram realizados para obter condições de corte que alcancem um processo sem vibrações, apresentando grande potencial na usinagem de materiais compósitos, devido à redução da temperatura e das forças de corte. A cinemática do processo, bem como a geometria da ferramenta corroboram para os bons resultados na obtenção de furos nesses materiais.

Voss, *et al.* (2016) realizaram uma comparação entre a furação convencional e a furação orbital em CFRP, destacando as diferenças entre esses dois processos. Foi constatado que a furação orbital gera uma melhor qualidade de furo com forças de processo mais baixas, mas necessita de um processo, máquinas e ferramentas mais complexas/dinâmicas e tempos de processo mais longos. Assim, a furação orbital é a escolha certa quando se deseja obter furos de maior qualidade, pois mesmo após a otimização da geometria, altos níveis de qualidade não podem ser alcançados com a furação convencional (retrabalho necessário).

Já Amini, *et al.* (2019) avaliaram os efeitos dos parâmetros de usinagem incluindo a velocidade de corte e a taxa de avanço na qualidade dos furos usinados em CFRP. No estudo foi verificado que o aumento da velocidade de corte reduziu as tolerâncias geométricas. Para obter furos de alta qualidade na furação convencional, a taxa de avanço é o parâmetro mais influente. Em oposição a isso, no processo de fresamento helicoidal, a velocidade de corte foi o mais importante, o que facilita taxas de avanço mais altas. Esta oportunidade é especialmente útil em termos de aspectos industriais e monetários. Também em oposição à furação convencional, nenhuma trinca foi observada na parede do furo pelo processo de fresamento helicoidal.

3.METODOLOGIA

Os experimentos planejados de furação orbital foram realizados no laboratório de processos de fabricação do DEMEP/UFSJ em um centro de torneamento ROMI® GL 240M. A ferramenta de corte utilizada foi uma fresa modelo CoroMill® Plura compression router (2P460-OA) da Sandvik®, com diâmetro de 6 mm e que conta com 6 arestas.

Foram usinados 22 corpos de prova de CFRP com 5 mm de espessura fornecidos pela ALLTEC Compósitos, com o objetivo de se obter furos passantes de 10mm de diâmetro. Os parâmetros de controle da furação orbital considerados no estudo foram f_{za} , f_{zt} e vc . Sendo que f_{za} variou entre 0,039 e 0,241 µm/volta, f_{zt} entre 0,039 e 0,241 mm/volta e vc entre 19,773 e 70,227 m/min. Para realizar os experimentos no centro de torneamento, foi desenvolvido um suporte de ABS para fixação dos corpos de prova na máquina. Na Figura 1 são apresentados alguns dos corpos de prova, o suporte utilizado nos experimentos e um corpo de prova após ser usinado, respectivamente.



Figura 1. Corpos de prova, suporte desenvolvido e corpo de prova usinado

O planejamento estatístico experimental utilizado foi o composto central (*Central Composite Design - CCD*), com um total de 22 experimentos. Tal planejamento teve por finalidade a modelagem, otimização e estimativa dos efeitos das variáveis do processo nas respostas consideradas. As medições de rugosidade foram realizadas no laboratório de metrologia do DEMEP/UFSJ, sendo utilizado o rugosímetro *SJ-400* da *Mitutoyo®*, sendo feita a medição da rugosidade média (R_a) em quatro pontos distintos equidistanciados de 90° em cada corpo de prova.

Após os ensaios experimentais e medições foram utilizados métodos de regressão e inferência estatística, como o método dos mínimos quadrados ordinários, mínimos quadrados ponderados e teste t para modelagem e teste de significância dos efeitos das variáveis avaliadas na resposta de interesse. Foi obtido modelo de superfície de resposta para uma das respostas de interesse em função dos parâmetros da furação orbital. Além disso o nível de significância (α) adotado foi de 0,05.

Métodos de otimização multi-objetivo foram utilizados com a finalidade de obter níveis ótimos do processo para garantir furos com alta qualidade e produtividade em CFRP. Todas as análises estatísticas foram conduzidas no *software* livre *R* (*R CORE TEAM*, 2020), sendo utilizados os pacotes: *rsm* (Lenth, 2009), para superfície de resposta; *olsrr* (Hebbali, 2020), para teste de homoscedasticidade; *ggplot2* (Wickham, 2016) e *ggpubr* (Kassambara, 2020), para os gráficos de efeitos principais e de comparação entre as fronteiras de Pareto; *mopsocd* (Naval, 2013) e *mco* (Mersmann, 2014), para otimização multi-objetivo; e *emoa* (Mersmann, 2020), para comparação entre os métodos de otimização multi-objetivo.

4. RESULTADOS

4.1. Rugosidade

A Tabela 1 apresenta a resposta rugosidade média (R_a) para 20 experimentos. A rugosidade (R_a) dos corpos de prova teve uma variação entre 1,29 a 3,79 μm . R_a é o parâmetro de rugosidade mais utilizado em todo o mundo para caracterização do acabamento de superfície, sendo aplicável à maioria dos processos de fabricação. Representa a média aritmética dos valores absolutos das ordenadas de afastamento, dos pontos do perfil de rugosidade em relação à linha média, dentro do percurso de medição (Marco e Stockler, 2009).

Tabela 1. Planejamento experimental com resposta de Rugosidade (R_a)

Ordem de execução	Ordem padrão	f_{za} [$\mu\text{m}/\text{volta}$]	f_{zt} [mm/volta]	vc [m/min]	R_a [μm]
2	1	0,0800	0,0800	30,0000	1,5967
16	2	0,2000	0,2000	30,0000	1,5850
8	3	0,0800	0,0800	30,0000	1,8675
1	4	0,2000	0,2000	30,0000	3,5600
17	5	0,0800	0,0800	60,0000	1,8375
20	6	0,2000	0,2000	60,0000	3,1575
19	7	0,0800	0,0800	60,0000	2,1575
18	8	0,2000	0,2000	60,0000	2,8175
15	9	0,0391	0,0391	45,0000	1,2950
6	10	0,2409	0,2409	45,0000	2,4575
13	11	0,1400	0,1400	45,0000	3,7925
7	12	0,1400	0,1400	45,0000	2,3800
12	13	0,1400	0,1400	19,7731	2,4925
10	14	0,1400	0,1400	70,2269	3,1425
3	15	0,1400	0,1400	45,0000	1,7225

11	16	0,1400	0,1400	45,0000	1,8400
14	17	0,1400	0,1400	45,0000	1,4900
9	18	0,1400	0,1400	45,0000	1,9700
5	19	0,1400	0,1400	45,0000	1,7600
4	20	0,1400	0,1400	45,0000	1,4950

Ao realizar a análise foi verificado através do teste de homocedasticidade que os dados são heterocedásticos, portanto foi realizada a modelagem através dos mínimos quadrados ponderados (*weighted least squares* - WLS) na qual os resultados que apresentam erros maiores são menos considerados no modelo. A Tabela 2 apresenta a análise dos resultados obtidos e o teste t, sendo que x_1 é fza , x_2 é fzt e x_3 é vc .

Tabela 2. Teste t para os coeficientes do modelo de rugosidade

	Estimate	Std. Error	t value	Pr(> t)
(Intercept)	1,7243	0,0074	233,1959	2,2e-16
x_1	0,4261	0,0272	15,6694	8,0e-10
x_2	0,0061	0,0554	0,1104	0,9137
x_3	0,1852	0,0530	3,4905	0,0040
x_2^2	0,2922	0,0738	3,9586	0,0016
x_3^2	0,3799	0,0432	8,7866	7,9e-07
$x_2:x_3$	-0,1823	0,0661	-2,7608	0,0162

Pelo coeficiente de determinação ajustado R^2_{aj} , o modelo para rugosidade explica 98,24% da variabilidade dos dados. O modelo codificado de regressão que descreve R_a considerando os níveis testados é dado pela Eq. 5.

$$\widehat{Ra} = 1,724 + 0,426x_1 + 0,006x_2 + 0,185x_3 + 0,292x_2^2 + 0,380x_3^2 - 0,1824x_2x_3 \quad (5)$$

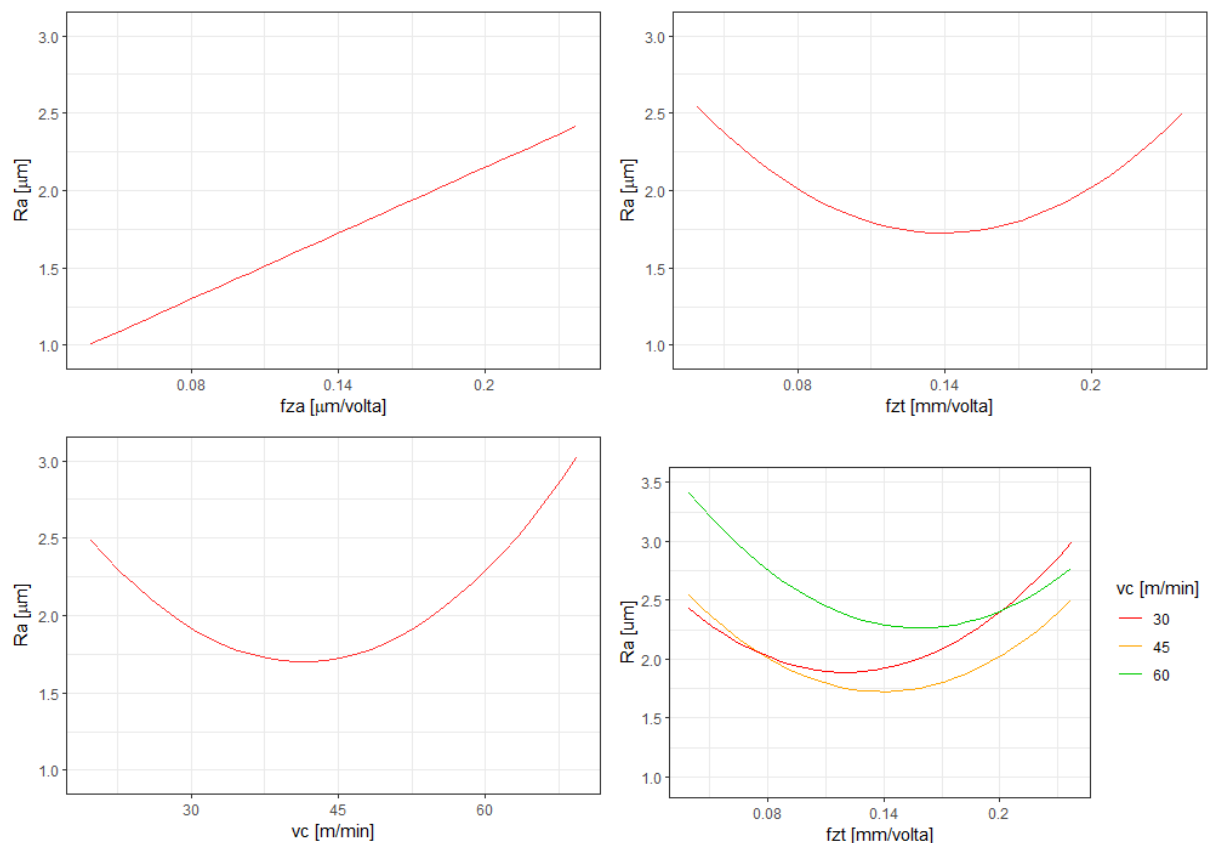


Figura 2. Gráficos dos efeitos principais e da interação entre fzt e vc em R_a .

Os gráficos dos efeitos principais em Ra são apresentados na Fig. 2. O efeito positivo de f_{za} em Ra é explicado devido ao aumento da remoção de material com incremento de ap^* , resultando em deterioração da superfície do furo. Como Ra diminui com a redução da profundidade do corte ap^* , confirma-se que Ra é inversamente proporcional a f_{zt} , já que $ap^* = \frac{f_{za} \cdot \pi \cdot D_b}{f_{zt}}$. Isso pôde ser observado nos resultados do extremo inferior de f_{zt} até um nível central. Já o aumento de vc , gera melhora em Ra até um certo nível. Após esse ponto, a rugosidade começa a piorar, sendo um dos fatores que pode explicar esse comportamento a ocorrência de vibrações. Além disso, como pôde ser verificado na Tab. 2, f_{za} foi o parâmetro mais significativo para a rugosidade, apesar de os parâmetros f_{zt} e vc terem apresentado termos quadráticos e interação. A representação gráfica dessa interação pode ser observada também na Fig. 2.

4.2 Taxa de Remoção de Material

A taxa de remoção de material (*material removal rate* - MRR) é uma resposta de produtividade avaliada através de um modelo determinístico. No processo de furação orbital, MRR pode ser avaliado através da Eq. 6 em mm³/min. Considerando a cinemática do processo, uma manipulação aritmética básica pode ser aplicada para expressar MRR em função dos parâmetros de corte específicos f_{za} , f_{zt} e vc , como expresso na Eq. 7 (Pereira *et al.*, 2017a).

$$MRR = a_p^* \cdot a_e \cdot v_f \quad (6)$$

$$MRR = 250 \cdot z \cdot \frac{D_B^3}{D_h \cdot D_t} \cdot v_c \cdot \frac{f_{za}}{f_{zt}} \cdot \sqrt{f_{za}^2 + \left(f_{zt} \cdot \frac{D_h}{D_B}\right)^2} \quad (7)$$

4.3 Otimização bi-objetivo

Para otimizar o processo de furação orbital é necessário minimizar Ra, a fim de obter um bom acabamento superficial e maximizar MRR, pois uma alta taxa de remoção de material garante mais produtividade ao processo. Entretanto, os níveis dos parâmetros do processo que minimizam Ra não são os mesmos que maximizam MRR, gerando um conflito entre as soluções ótimas dessas duas funções. Para gerenciar esse conflito é realizada então, a otimização bi-objetivo, em que a solução ótima não é única, mas consiste em um conjunto de soluções chamadas de soluções Pareto ótimas dando ao investigador uma gama de possibilidades para o planejamento do processo.

A otimização bi-objetivo foi realizada através de dois métodos no *software R*, sendo posteriormente realizada uma comparação. O primeiro método utilizado foi o *Multi-objective Particle Swarm Optimization with Crowding Distance* (MOPSOCD). Esse algoritmo é inspirado na coreografia de um bando de pássaros. O algoritmo considera um enxame de partículas e cada movimento da partícula no espaço de busca é determinado por sua experiência individual, considerando sua melhor posição armazenada e pelas informações sociais considerando a melhor posição de todas as partículas. Um arquivo externo é usado para armazenar as soluções não dominadas encontradas em cada iteração. A nova posição de cada partícula é atualizada considerando a última posição e sua velocidade atual. A velocidade atual de cada partícula considera a velocidade anterior multiplicada por um coeficiente de inércia e dois componentes de melhor posição individual e melhor global. Esses componentes são multiplicados pelos coeficientes de aceleração e por um tamanho de passo definido aleatoriamente nessas direções. Se a posição atual for melhor do que a melhor posição da partícula, isso deve ser atualizado. A posição global também é atualizada se superada considerando as melhores posições de todas as partículas. As soluções não dominadas no arquivo são classificadas considerando a distância de aglomeração e podem ser substituídas pela posição atual das partículas se estas superarem as do arquivado. O MOPSOCD também apresenta um operador de mutação que impede o algoritmo de convergir prematuramente para uma solução local (Raquel e Naval, 2005).

O segundo método utilizado foi o *Non-dominated Sorting Genetic Algorithm* (NSGA-II). Nele uma população inicial P_0 de tamanho N é gerada aleatoriamente. Então, uma população descendente inicial Q_0 também de tamanho N é gerada através das operações genéticas de *crossover* e mutação, assim como nos algoritmos genéticos. Em seguida a população R_0 de tamanho $2N$ é formada por $P_0 \cup Q_0$. Essa população é classificada considerando a não dominância, garantindo o elitismo. Os elementos dos conjuntos $F_1, F_2, \dots, F_l$ são ordenados considerando as melhores soluções na população combinada R_0 . Essas soluções ordenadas são selecionadas para a nova população $P_{(t+1)}$ através do operador de distância de aglomeração, medindo a densidade de soluções na vizinhança, respeitando o tamanho N . A distância de aglomeração seleciona as soluções que estão posicionadas nas regiões menos aglomeradas. Essa seleção é realizada por meio de torneio, ou seja, comparação de algumas soluções selecionadas aleatoriamente. Portanto, a nova população é $P_{(t+1)}$ é formada considerando as soluções melhores classificadas e bem distribuídas na fronteira. O procedimento é repetido até o alcance de algum critério de parada (Tsou, 2015).

Para comparação entre os dois métodos foram considerados o número de soluções geradas, o número de soluções Pareto ótimas e o hiper volume. Segundo Hao, *et al.* (2012), o hiper volume é o espaço n-dimensional que é dominado pelos pontos (soluções) em uma fronteira. Uma fronteira com um hiper volume maior provavelmente apresentará um conjunto de opções melhores para o usuário do que uma fronteira com um hiper volume menor. Além disso o hiper

volume serve para medir o espaçamento entre as soluções na fronteira visto que uma fronteira com soluções melhores distribuídas apresenta maior hiper volume. O hiper volume foi medido no espaço normalizado com os ótimos individuais iguais a 0 e o piores resultados de cada função, chamados de pseudo-nadir, iguais a 1. A Tabela 3 apresenta os resultados para os dois métodos e a Fig. 3, a comparação entre as fronteiras de Pareto obtidas.

Tabela 3. Comparação entre MOPSOCD e NSGA-II

	MOPSOCD	NSGA-II
Número de Soluções	196	200
Número de Soluções Pareto Ótimas	131	182
Hiper volume	0,4511	0,4939

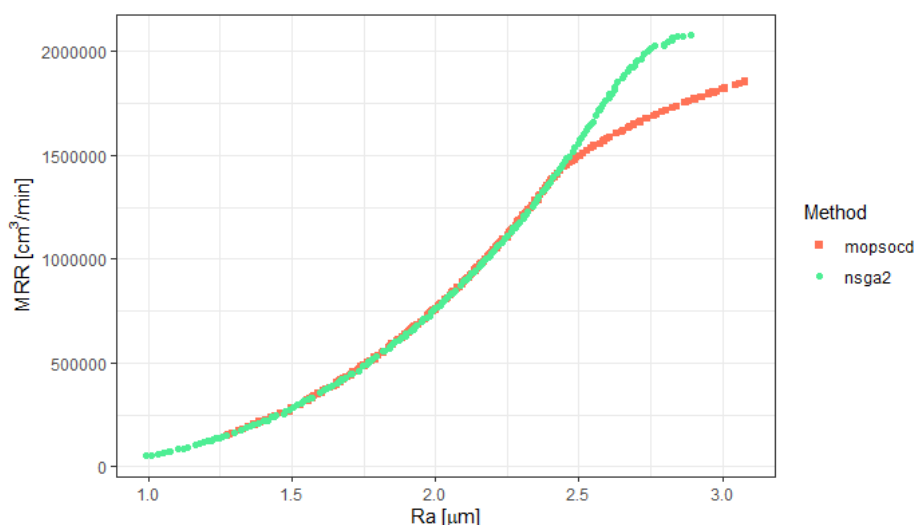


Figura 3. Comparação entre fronteiras de Pareto.

Como pôde ser observado através da Tab. 3 e da Fig. 3, o método NSGA-II apresentou um resultado melhor, pois no extremo superior apresenta menores valores para Ra e maiores valores para MRR, dominando algumas soluções do MOPSOCD e no extremo inferior apresenta uma região que não é explorada pelo outro método. Nesse sentido o NSGA-II apresentou um hiper volume que é superior. Entretanto, em uma parte da região central da fronteira de Pareto, o MOPSOCD apresenta algumas soluções que dominam as obtidas pelo outro método. Porém essa diferença na parte central é irrisória.

Deste modo, foram estabelecidas várias combinações dos níveis dos parâmetros do processo na otimização. A escolha dos níveis será feita, portanto, com base nas respostas desejadas no processo. Caso seja desejada uma menor rugosidade, será necessário operar com uma pequena taxa de remoção de material ou caso se esteja buscando maior produtividade, serão obtidos maiores valores de Ra, além de ser possível também, trabalhar com níveis intermediários. Assim, a Tabela 4 traz algumas opções de níveis ótimos retirados da fronteira de Pareto.

Tabela 4 – Níveis ótimos do processo

Método	<i>fza</i> [μm/volta]	<i>fzt</i> [mm/volta]	<i>vc</i> [m/min]	Ra [μm]	MRR [mm³/min]
NSGA-II	0,24	0,14	42,60	0,99	52224,38
NSGA-II	0,20	0,14	43,47	1,26	139629,65
MOPSOCD	0,10	0,18	42,78	2,09	871825,60
MOPSOCD	0,08	0,20	46,79	2,48	1471408,00
NSGA-II	0,09	0,23	44,10	2,65	1881771,48
NSGA-II	0,10	0,22	48,90	2,84	2056012,54

5. CONCLUSÕES

Neste estudo foram conduzidos experimentos utilizando o planejamento estatístico composto central, sobre os parâmetros controlados de *fza*, *fzt* e *vc* em CFRP, a fim de medir a resposta de rugosidade (*Ra*), além do cálculo determinístico da taxa de remoção de material. Posteriormente foi realizada a otimização bi-objetivo dessas duas respostas visando determinar os níveis ótimos para os parâmetros do processo.

Os valores de rugosidade medidos variaram entre 1,29 a 3,79 μ m. A análise de *Ra* mostrou que os dados são heterocedásticos, portanto através da redução do modelo por mínimos quadrados ponderados foi obtido um coeficiente de determinação ajustado R^2_{aj} de 98,24%. Foi possível observar o efeito positivo de *fza* em *Ra*, sendo este o parâmetro mais significativo na rugosidade, e, como *Ra* diminui com a redução da profundidade do corte ap. Isso pôde ser observado nos resultados do extremo inferior de *fzt* até um nível central. Já o aumento de *vc*, gera melhora em *Ra* até um certo nível. Após esse ponto, a rugosidade começa a piorar, sendo um dos fatores que pode explicar esse comportamento a ocorrência de vibrações.

Com relação à otimização, foi considerado minimizar *Ra* e maximizar MRR e utilizados dois métodos para realizar a otimização bi-objetivo dessas duas funções, além de ser realizada uma comparação entre eles. O resultado obtido por NSGA-II foi melhor, dando ao experimentador opções diversas de planejamento para obter furos com boa qualidade e produtividade.

6. AGRADECIMENTOS

Agradecemos ao técnico Camilo Lelis de Souza (UFSJ) pela confecção e doação do suporte para realização dos experimentos e ajuda com a condução desses no laboratório, ao professor Lincoln Cardoso Brandão (UFSJ) pela doação do material dos corpos de prova e da fresa utilizados e ao CNPq pela bolsa de fomento ao projeto.

7. REFERÊNCIAS

- Amini, S., Baraheni, M. e Hakimi, E., 2019. "Enhancing dimensional accuracy and surface integrity by helical milling of carbon fiber reinforced polymers". *International Journal of Lightweight Materials and Manufacture*, Vol. 2, p. 362-372.
- Denkena, B, Boehnke, D., Dege, J.H., 2008. "Helical milling of CFRP-titanium layer compounds". *CIRP Journal of manufacturing Science and Technology*, v. 1, n. 2, p. 64-69.
- Fang Q., Pan Z., Fei S., Xie X. e Ke Y, 2015. "Helical milling end-effector and its application". *IEEE-ASME Trans. Mech*, v. 20, p. 3112-3122.
- Hao, J., Zeng, R. e Basseur, M., 2012. "Hypervolume-based multi-objective local Search". *Neural Comput & Applic*, v. 21, p.1917-1929.
- Hebbali, A., 2020. "olsrr: Tools for Building OLS Regression Models". *R package version 0.5.3*. Jun. 2020 <<https://CRAN.R-project.org/package=olsrr>>.
- Kassambara, A., 2020. "ggpubr: 'ggplot2' Based Publication Ready Plots". *R package version 0.4.0*. Jun. 2020 <<https://CRAN.R-project.org/package=ggpubr>>.
- Lenth, R.V., 2009. "Response-Surface Methods in R, Using rsm". *Journal of Statistical Software*, 32(7), 1-17. Jun. 2020 <<http://www.jstatsoft.org/v32/i07/>>.
- Marco, F. e Stockler, J., 2009. "Apostila de Metrologia" *UFRJ*.
- Mersmann, O., 2020. "emoa: Evolutionary Multiobjective Optimization Algorithms". *R package version 0.5-0.1*. Jun. 2020 <<https://CRAN.R-project.org/package=emoa>>.
- Mersmann, O., 2014. "mco: Multiple Criteria Optimization Algorithms and Related Functions". *R package version 1.0-15.1*. Jun. 2020 <<https://CRAN.R-project.org/package=mco>>.
- Naval, P., 2013. "Multi-objective Particle Swarm Optimization with Crowding Distance". *R package version 0.5.1*. Jun. 2020 <<https://CRAN.R-project.org/package=mopsocd>>.
- Ohta, K., Tanaka, H. e Takizawa, R., 2012. "Development of tilted planetary drilling system". *Procedia CIRP*, v. 1, p. 681-682.
- Pereira R., Leite R., Alvim A., Paiva A., Ferreira J. e Davim J., 2017a. "Multi-objective robust optimization of the sustainable helical milling process of the aluminium alloy Al 7075 using the augmented-enhanced normalized normal constraint method". *J. Clean. Prod*, v. 152, p.474-496.
- Pereira, R., Brandão L., Paiva A., Ferreira J. e Davim J., 2017b. "A review of helical milling process". *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, v.120, p. 27-48.
- R CORE TEAM, 2020. "R: A language and environment for statistical computing". *R Foundation for Statistical Computing*, Vienna, Austria. Jun. 2020 <<https://www.R-project.org/>>.
- Raquel, C. e Naval, P., 2005. "An effective use of crowding distance in multiobjective particle swarm optimization". *GECCO 2005 - Genet Evol Comput Conf*, 257-264. Jul. 2020 <<https://doi.org/10.1145/1068009.1068047>>.

- Sadek, A., Meshreki, M. e Attia, M. H., 2012. "Characterization and optimization of orbital drilling of woven carbon fiber reinforced epoxy laminates". *CIRP annals*, v. 61, n. 1, p. 123-126.
- Tanaka, H., Otha K., Takizawa, e Yanagi K., 2012. "Experimental study on tilted planetary motion drilling for CFRP". *Procedia CIRP*, v. 1, p. 443-448.
- Tsou, C., 2015 "Elitist Non-dominated Sorting Genetic Algorithm" based on R. *R package version 1.0*.
- Voss, R., Henerichs, M. e Kuster, F., 2016. "Comparison of conventional drilling and orbital drilling in machining carbon fibre reinforced plastics (CFRP)". *CIRP Annals*, v. 65, n. 1, p. 137-140.
- Wickham, H., 2016. "ggplot2: Elegant Graphics for Data Analysis". *Springer-Verlag New York*.
- Wu, Y.B., Wang, Q. e Nomura, M., 2016. "Proposal of tilt helical milling method for hole creation of carbon fiber reinforced plastic (CFRP)". In: *Advanced Materials Research*, Trans Tech Publications, p. 190-195.

7. RESPONSABILIDADE PELAS INFORMAÇÕES

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

Orbital Drilling Optimization for Obtainment of Holes in Carbon Fiber Reinforced Plastic

Gabriela Pereira Barros
Carlos Henrique Lauro
Lincoln Cardoso Brandao
Robson Bruno Dutra Pereira

Universidade Federal de São João del-Rei (UFSJ) – Departamento de Engenharia Mecânica e Produção (DEMEP) – Praça Frei Orlando, 170 – Centro - Campus Santo Antônio, 36307-352 - São João del-Rei, MG – Brasil
gabrielapbarros15@gmail.com
carloslauro@ufsj.edu.br
lincoln@ufsj.edu.br
robsondutra@ufsj.edu.br

Abstract. The carbon fiber reinforced plastic (CFRP) has some mechanical properties that are attractive to the aerospace and aeronautics industry. However, they are difficult-to-cut material. Specifically about the hole obtainment in these materials, the conventional hole-making process presents several problems due to its kinematics. Various studies have proposed the orbital drilling process as an alternative to conventional drilling, showing better quality levels. This work presents a modeling and optimization approach of orbital drilling in CFRP. A central composite design was used, considering axial and tangential feeds per turn and the cutting speed of the process as control factors. The responses considered were the roughness of the holes and the material removal rate (MRR), obtaining a regression model for the roughness, while the material removal rate was calculated deterministically. Bi-objective optimization of the responses was also performed using the MOPSOCD and NSGA-II methods, so the NSGA-II method overcome MOPSOCD. In that way, were obtained values of roughness between 0.99 e 2.84 μ m and for MRR between 52224.38 and 2056012.54mm³/min. Therefore, several combinations of the process parameters levels for responses optimization were obtained.

Keywords: orbital drilling, CFRP, bi-objective optimization

RESPONSIBILITY NOTICE

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