

OTIMIZAÇÃO DOS PARÂMETROS DE CORTE NA FURAÇÃO DE GFRP UTILIZANDO O PROJETO DE EXPERIMENTOS BOX-BEHNKEN

Daniel Klein Malacarne¹

Cristiano Devitte²

André João de Souza³

Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Departamento de Engenharia Mecânica, Rua Sarmento Leite, nº425, Cidade Baixa, CEP 90050-170, Porto Alegre, RS

¹dk_malaca@hotmail.com; ²cristiano.devitte1@gmail.com; ³ajsouza@ufrgs.br

Resumo: O processo de furação de polímeros reforçados com fibras de vidro (GFRP) é amplamente utilizado na fabricação de componentes para a indústria aeronáutica, naval e automobilística. Associado à furação desse compósito laminado, identificam-se defeitos de qualidade, como desvio dimensional e delaminação. Assim, o trabalho apresenta, via projeto de experimentos BoxBehnken, as relações destes defeitos com os parâmetros de entrada (avanço, velocidade de corte e o ângulo de ponta da ferramenta) utilizando brocas helicoidais de aço rápido. Como variáveis de resposta, avaliou-se o desvio dimensional do furo e o fator de delaminação ajustado na entrada e saída do furo. Os resultados analisados mostraram grande influência do avanço e do ângulo de ponta na delaminação, com menor contribuição da velocidade de corte. O desvio dimensional apresenta significativa correlação com o ângulo de ponta, enquanto o avanço e a velocidade de corte possuem menor significância. Utilizando-se MSR sob um arranjo BBD, conseguiu-se, por otimização, a seguinte combinação de parâmetros: $\sigma = 105^\circ$, $vc = 50$ m/min e $f = 0,05$ mm/rev.

Palavras-chave: polímero reforçado com fibra de vidro, projeto de experimentos Box-Behnken, furação com broca helicoidal de aço rápido, fator de delaminação ajustado.

1. INTRODUÇÃO

Os compósitos de matriz polimérica reforçada por fibras (FRP) são alternativas cada vez mais comuns aos metais, principalmente na indústria aeronáutica, naval, automobilística e eletrônica, visto o baixo peso combinado à boa resistência mecânica, baixa condutividade térmica e elétrica (Abrão *et al.*, 2007). Diversas são as opções de reforço disponíveis para compor as placas laminadas, sendo as de carbono (CFRP – *carbon fiber reinforced plastic*) e as de vidro (GFRP – *glass fiber reinforced plastic*) as mais utilizadas na indústria aeronáutica (Ning *et al.* 2015; Kumar e Sing 2017; Khashaba e El-Keran 2017). As propriedades mecânicas de compósitos de fibra de carbono (CFRP) são superiores aos de fibra de vidro (GFRP). Entretanto, a usinabilidade de ambos é equivalente (Lazar e Xirouchakis 2011). Porém, o GFRP apresenta baixo custo associado a alta resistência mecânica e química, além de excelentes propriedades de isolamento (Mallick, 2007), o que favorece sua aplicação nos diversos setores supracitados.

A furação de compósitos laminados com brocas helicoidais é suscetível a diversos tipos de defeitos que, segundo Lachaud *et al.* (2001) e Piquet *et al.* (2000), podem ser classificados em quatro categorias principais:

- Defeitos na entrada do furo: ocasionados pelo descolamento das fibras na primeira camada da placa pela aresta principal de corte da broca, causando delaminação.
- Defeitos na saída do furo: se devem à tensão provocada pela força de avanço (F_f) nas últimas camadas da placa; quando a tensão excede o limite de adesão entre fibra e matriz, trincas surgem e se propagam, causando a delaminação.
- Defeitos dimensionais: são consequência da variação do ângulo da fibra em relação à aresta de corte no momento do cisalhamento – fibras cortadas a 90° sofrem maior deformação elástica, reduzindo diâmetro final do furo nesta direção.
- Defeitos térmicos: originados do atrito entre broca e peça, e podem afetar a integridade da matriz polimérica, além de prejudicar o acabamento da parede do furo.

De acordo com Liu *et al.* (2012), as delaminações na entrada e na saída da broca afetam diretamente a qualidade da montagem de estruturas e diminui o desempenho mecânico das peças, principalmente quando submetidas a cargas cíclicas (fadiga). Já Miranda (2003) define o desvio dimensional (ΔD) como sendo a diferença entre a medida efetiva do furo (D_e) em relação à sua medida nominal ou geométrica (D).

Chen (1997) propôs o conceito do fator de delaminação (F_d) como sendo a razão entre o máximo diâmetro da zona danificada (D_d) e o diâmetro nominal (D). Davim *et al.* (2007) definiram um fator de delaminação ajustado (F_{da}), que considera F_d e uma componente que compara área danificada (A_d) com a área da circunferência cujo diâmetro corresponde ao D_d (A_{max}) e a área nominal do furo (A_o).

Segundo Abrão *et al.* (2007), para brocas HSS (*High, a velo-Speed Steel*) a velocidade de corte (v_c) varia usualmente entre 10 e 50 m/min e o avanço (f) pode atingir no máximo 0.3 mm/rev. No que tange a geometria das brocas, Chen (1997) avaliou a influência do ângulo de ponta σ ($90^\circ \sim 140^\circ$) na F_f durante a furação de CFRP. Enemuoh *et al.* (2001), utilizaram brocas HSS com $\sigma = 75^\circ \sim 160^\circ$ enquanto Kilickap (2010) testou $\sigma = 118^\circ \sim 135^\circ$ na furação de GFRP.

Para obter a relação entre parâmetros de entrada e saída do processo, possibilitando sua otimização, pesquisadores têm utilizado os diversos modelos do projeto de experimentos. Dentre estes, a metodologia de superfície de resposta (MSR) consiste na modelagem das variáveis de resposta através de um modelo de regressão não linear quadrático (Baumgaertner Filho, 2017). Box-Behnken Design (BBD) é um tipo de MSR, de segunda ordem, onde são utilizados três níveis para cada fator combinados em fatoriais incompletos. Um ponto importante é que não são realizados testes com todos os fatores simultaneamente em seus máximos ou mínimos, o que é uma vantagem quando condições extremas podem ter consequências prejudiciais ou custo elevado. Isto é particularmente importante quando corpos de prova apresentam alto valor agregado (Ferreira *et al.*, 2007).

Segundo Baumgaertner Filho (2017), o BBD pode ser utilizado para otimização, análise dos efeitos principais, interações entre fatores, além do efeito quadrático entre parâmetros e variáveis de saída. Consideram-se como fatores significativos estatisticamente aqueles que apresentarem probabilidade de significância (p-valor) menores que o nível de significância (α), geralmente 0,05. O valor do coeficiente de determinação (R^2) representa a medida da variação explicada pelo modelo de regressão. Quanto mais próximo R^2 estiver de 1, melhor o ajuste entre os valores estimados pela equação de regressão e os obtidos experimentalmente.

Assim, pretende-se determinar, através do BBD, a combinação dos parâmetros de entrada do processo de furação (ângulo de ponta da broca helicoidal de aço rápido σ , velocidade de corte v_c e avanço f) que otimizem a qualidade do furo realizado em uma placa GFRP bidirecional. Como fatores de qualidade, serão avaliados o desvio dimensional e a presença de delaminação na região da periferia na entrada e saída do furo.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

A placa de GFRP é composta de uma camada de fibra de vidro, bidirecional, trançado simples, em uma matriz de resina epóxi. Possui 2 mm de espessura e área utilizável para a furação que desconsidera 20 mm de cada lado do corpo de prova, onde a fibra e a resina não são uniformes, e um círculo central de 30 mm, referente ao local de injeção da resina.

Os furos foram realizados no centro de usinagem ROMI Discovery 308 com comando Mach 8, rotação máxima de 4000 rpm e potência máxima de 5,5 kW. As brocas utilizadas são helicoidais de aço rápido (HSS) tipo N com $\varnothing 10$ mm de diâmetro e comprimento total 133 mm (87 mm de comprimento útil) modelo Lenox-Twill DIN 338 TW104. As brocas foram afiadas com ângulos de ponta $\sigma = 90^\circ$, 118° e 146° . Para medição do erro de batimento da broca (δ), utilizou-se o relógio comparador Digimess modelo 121.304 com resolução de 10 μ m.

Para medição do diâmetro do furo foi utilizada a máquina de medição por coordenadas Mitutoyo modelo QM Measure 353, com resolução de 0,5 μ m. Já para a obtenção do fator de delaminação ajustado (F_{da}) foi aplicado o microscópio digital USB DinoLite modelo AM-413ZT. Para a obtenção da melhor combinação de parâmetros de entrada (σ , v_c e f), o BBD define que devem ser estabelecidos três níveis para cada fator, que são combinados e sequenciados aleatoriamente (ver Tab. 1). As combinações e a sequência aleatorizada dos parâmetros de entrada para a geração dos furos foram definidas através do software Minitab®17. O esquema de montagem do corpo de prova é apresentado na Fig. 1a. A cada troca de broca, o batimento (δ) foi verificado (ver Fig. 1b). A análise do fator de delaminação ajustado na entrada (F_{dai}) e na saída (F_{dao}) da broca foi realizada nos 15 furos através de imagens com ampliação de 30x. A área danificada externa ao furo (A_d) foram medidos no microscópio, conforme esquema de medição ilustrado na Fig. 1c. A fim de se obter o desvio dimensional (ΔD) das amostras, mediu-se o diâmetro de cada furo partir de três pontos internos, conforme Fig. 1d. Os valores obtidos foram analisados através do Minitab®17. A tabela de coeficientes, p-valores e R^2 foi utilizada para avaliar a adequação do modelo (R^2) e a significância estatística (p-valor) de cada parâmetro no modelo. Após a determinação do modelo, utilizou-se a ferramenta de otimização para obter a melhor combinação de parâmetros que reduz a delaminação na entrada e saída do furo. Posteriormente, o ensaio de validação da combinação ótima foi realizado.

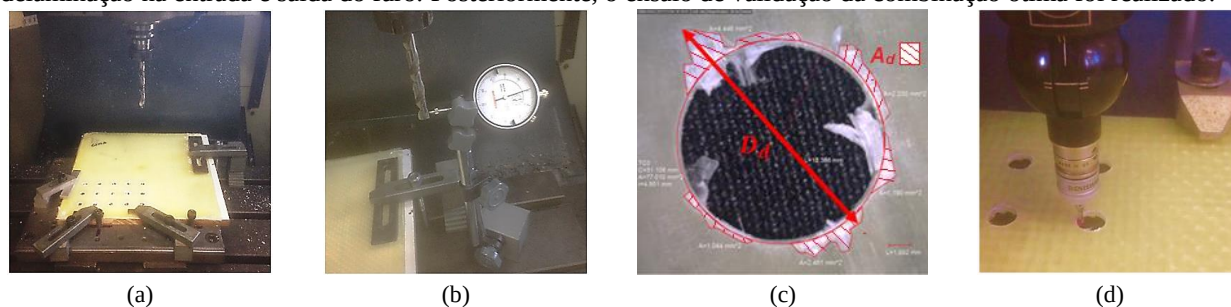


Figura 1. Setup experimental: (a) esquema de montagem da placa no centro de usinagem; (b) medição do batimento (δ) da broca; (c) esquema de obtenção de F_{da} através de D_d e A_d ; (d) medição do diâmetro efetivo D_e do furo

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

As medições de batimento (δ), diâmetro efetivo (D_e), máximo diâmetro da zona danificada (D_d) e área danificada (A_d) na entrada e saída dos furos, além dos valores de F_{dae} e F_{das} calculados para cada amostra obtida pela combinação dos parâmetros de entrada (σ , v_c e f) estão apresentados na Tab. 1.

Tabela 1. Desvio dimensional e fator de delaminação dos furos gerados.

Furo	Parâmetros de Entrada			δ [mm]	D_e [mm]	ΔD [mm]	Entrada do Furo			Saída do Furo		
	σ [°]	v_c [m/min]	f [mm/rev.]				D_d [mm]	A_d [mm²]	F_{dae}	D_d [mm]	A_d [mm²]	F_{das}
1	146	10	0,15	0,10	10,0452	0,0452	11,01	7,568	1,151	10,79	4,268	1,107
2	90	50	0,15	0,15	10,0308	0,0308	10,68	4,807	1,100	10,62	4,720	1,093
3	146	30	0,05	0,10	10,0320	0,0320	10,79	4,810	1,111	11,11	6,435	1,154
4	90	30	0,05	0,20	10,0311	0,0311	10,82	5,829	1,121	11,18	9,319	1,181
5	118	10	0,05	0,05	9,9953	-0,0047	10,81	3,539	1,104	11,04	6,292	1,146
6	118	30	0,15	0,05	10,0060	0,0060	11,17	5,499	1,154	10,67	4,670	1,098
7	90	30	0,25	0,15	9,9900	-0,0100	11,00	9,142	1,161	10,61	4,272	1,089
8	118	50	0,05	0,05	9,9925	-0,0075	10,52	3,374	1,074	10,84	5,795	1,122
9	146	30	0,25	0,05	10,0365	0,0365	11,72	6,722	1,218	12,82	9,619	1,351
10	90	10	0,15	0,15	10,0597	0,0597	10,72	6,557	1,115	11,24	7,293	1,173
11	146	50	0,15	0,15	10,0563	0,0563	13,28	11,645	1,413	10,78	6,314	1,120
12	118	30	0,15	0,05	10,0073	0,0073	11,14	6,285	1,156	10,64	3,359	1,086
13	118	10	0,25	0,05	9,9924	-0,0076	10,78	6,049	1,118	10,57	2,964	1,076
14	118	30	0,15	0,05	9,9838	-0,0162	10,84	5,241	1,119	10,65	7,442	1,114
15	118	50	0,25	0,05	10,0034	0,0034	12,39	11,371	1,319	13,33	11,306	1,415

A Figura 2 apresenta as superfícies de resposta do desvio dimensional (ΔD), e dos fatores de delaminação ajustados na entrada (F_{dae}) e na saída do furo (F_{das}) em função dos parâmetros de entrada (σ , v_c e f). Para a geração dos gráficos, os pontos centrais foram fixados. Como resultado, nota-se uma resposta quadrática para os três parâmetros.

Avaliando-se σ (Fig. 2a), verifica-se que valores intermediários apresentam os menores valores de ΔD . Isso é explicado pela contraposição dos efeitos da força passiva (F_p) (que cresce com a redução de σ e da centralização do furo (que é favorecida por ângulos mais agudos). A v_c apresenta tendência moderada de reduzir ΔD à medida que é aumentada, principalmente pela redução nos esforços de corte. Da mesma forma f , se avaliado isoladamente, também tem pouca influência em ΔD , sendo que um aumento de f reduz ΔD , por reduzir a vibração da broca. Porém, as influências de v_c e f são menores quando comparadas à influência de σ . Não há influência significativa dos parâmetros lineares ou dos fatores interativos, o que pode ser verificado pela curvatura relativamente estável das superfícies, bem como analisando os valores-p obtidos. $R^2 = 90,6\%$, o que sinaliza que o modelo explica bem os dados obtidos.

Nota-se pela Fig. 2b que com o aumento de f e σ , há um aumento significativo de F_{dae} . Para σ maiores, a aresta de corte tende a cortar a fibra mais horizontalmente, o que causa um efeito de descascamento que gera maior F_{dae} . Para f maiores, há um aumento da força de corte (F_c), o que causa delaminação na entrada. Para menores valores de f , v_c tem um efeito moderado de redução do F_{dae} . Uma possível explicação é que há uma redução nos esforços pelo efeito do aumento da temperatura na matriz polimérica, causado pela maior v_c . Com o aumento de f , porém, o tempo de interação ferramenta/peça é menor e não há aumento significativo da temperatura. Por outro lado, o aumento das forças de avanço (F_f) e corte (F_c), devido ao aumento de f , gera um grande aumento no F_{dae} . Quando combinada com σ e f , a v_c tende a potencializar o efeito dos demais parâmetros de entrada em F_{dae} . Essa potencialização é a influência dos fatores de interação $v_c \times f$ e $v_c \times \sigma$. A curvatura das superfícies é proveniente, principalmente, destes fatores de interação, já que os fatores quadráticos de cada parâmetro têm pouco efeito na resposta. Os valores-p de cada fator corroboram essas tendências. $R^2 = 87,5\%$, o que sinaliza que o modelo explica bem os dados obtidos.

Percebe-se pela Fig. 2c que o aumento de f propicia o crescimento significativo de F_{das} devido ao aumento de F_f . Analisando o efeito de σ , pode-se perceber que o aumento de σ é diretamente proporcional ao de F_{das} também pelo efeito de F_f que cresce com o aumento de σ . Na região em que σ é pequeno e f é grande, o F_{das} é moderado, pois há um efeito oposto de cada parâmetro na F_f . Assim como ocorreu na entrada do furo com o F_{dae} , o aumento de v_c reduz o F_{das} para pequenos valores de f devido ao aumento da temperatura na região de corte. Porém, para maiores valores de f , o aumento da temperatura não é significativo, e o aumento da F_f é determinante para o F_{das} . O coeficiente de determinação $R^2 = 78\%$, o que sinaliza que o modelo explica relativamente bem os dados obtidos. Os valores-p de cada fator confirmam isso.

Considerando a Fig. 4b, tem-se um pico de F_{das} para baixo f e baixo σ . Este ponto contradiz a literatura e a tendência do do gráfico, e pode ser decorrente da falta de ajuste do modelo. Aconselha-se mais medições com essa configuração.

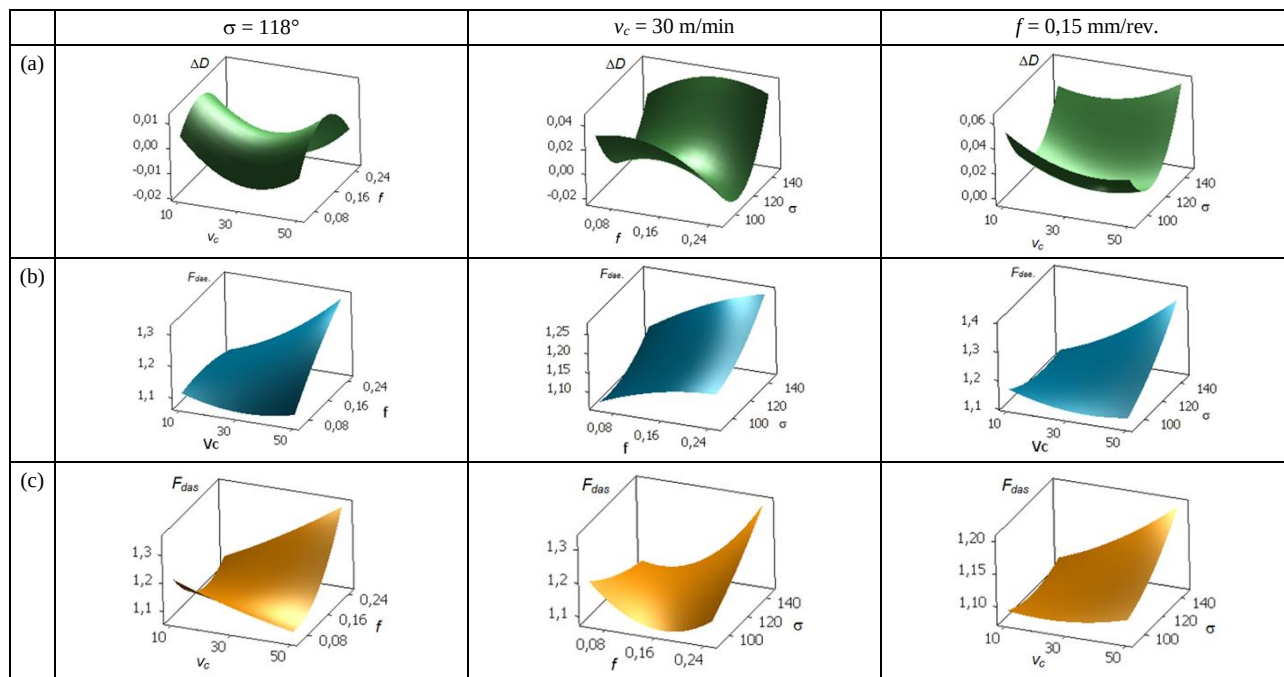


Figura 2. Superfícies de resposta em função dos parâmetros de entrada: (a) ΔD ; (b) F_{dae} ; (c) F_{das}

O modelo obtido visando a otimização simultânea de ΔD , F_{dae} e F_{das} sugere a seguinte combinação de parâmetros: $\sigma = 105^\circ$, $v_c = 50 \text{ m/min}$ e $f = 0,05 \text{ mm/rev}$. Segundo o modelo, essa combinação gera respostas de $\Delta D = 0 \text{ mm}$, $F_{dae} = 1,05$ e $F_{das} = 1,10$. Vale dizer que a ausência de delaminação corresponde a $F_{da} = 1$.

O experimento de validação da otimização, realizado com os níveis citados, resultou nos valores de $\Delta D = 0,03 \text{ mm}$, $F_{dae} = 1,04$ e $F_{das} = 1,09$. O erro associado aos valores obtidos em relação aos previstos pelo modelo é de menos de 1% para F_{dae} e F_{das} . O valor de $0,03 \text{ mm}$ para ΔD é menor que o valor do batimento da broca (δ). Dentre os níveis escolhidos para a análise, o valor ótimo de f é no seu mínimo, visto que o seu aumento influencia significativamente F_{da} . Da mesma forma, o ângulo σ é mantido em valores reduzidos, pois reduz os valores de F_{da} e ΔD . A v_c é mantida no seu valor máximo, visto que, para baixos f , há uma influência positiva da v_c na delaminação.

4. CONCLUSÕES

Baseado nos modelos obtidos a partir do BBD foi possível definir as relações entre os parâmetros de entrada e saída, sendo o ângulo de ponta da broca (σ) o principal parâmetro que influencia o desvio dimensional (ΔD). Valores intermediários de σ apresentam os melhores resultados. O aumento da velocidade de corte (v_c) e do avanço (f) reduzem ΔD , mas com uma significância menor que σ .

As análises das superfícies de resposta e de variância mostram que f tem grande influência nos fatores de delaminação ajustados na entrada (F_{dae}) e na saída (F_{das}) dos furos, sendo que aumento de f gera um aumento da delaminação. Da mesma forma, o aumento de σ prejudica F_{dae} e F_{das} . v_c tem uma influência moderada em F_{dae} e F_{das} , sendo que o aumento de v_c para pequenos valores de f gera redução da delaminação. Porém, para maiores valores de f , o efeito é suprimido.

A otimização dos parâmetros de corte realizada via BBD sugere a utilização de $\sigma = 105^\circ$, $v_c = 50 \text{ m/min}$ e $f = 0,05 \text{ mm/rev}$. Os testes de validação comprovaram a eficácia desta metodologia.

5. REFERÊNCIAS

- Abrão, A.M., Faria, P.E., Rubio, J.C.C., Reis, P., Davim, J.P., 2007. "Drilling of reinforced plastics: A review". *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 186, No. 1-3, p. 1-7.
- Baumgaertner Filho, A., 2017. *Análise dos parâmetros da polaridade negativa na curva de corrente de soldagem MIG/MAG polaridade variável aplicados à soldagem para revestimento*. Dissertação de Mestrado, DEMEC-UFRGS, Porto Alegre.
- Chen, W.-C., 1997. "Some experimental investigations in the drilling of carbon fiber reinforced plastic (CFRP) composite laminates". *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, Vol. 37, No. 8, p. 1097-1108.

- Davim J.P., J. Campos Rubio b, A.M. Abrao. A novel approach based on digital image analysis to evaluate the delamination factor after drilling composite laminates. *Composites Science and Technology* 67 (2007) 1939–1945
- Enemuoh, E.U., El-Gizawy, A.S., Okafor, A.C., 2001. “An approach for development of damage-free drilling of carbon fiber reinforced thermosets”, *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, Vol. 41, No. 12, p. 1795-1814.
- Ferreira, S.L.C., Bruns, R.E., Ferreira, H.S., Matos, G.D., David, J.M., Brandão, G.C., da Silva, E.G.P., Portugal, L.A., dos Reis, P.S., Souza, A.S., dos Santos, W.N.L., 2007. “Box-Behnken design: An alternative for the optimization of analytical methods”, *Analytica Chimica Acta*, Vol. 597, No. 2, p. 179-186.
- Khashaba, U.A. e El-Keran, A.A., 2017. “Drilling analysis of thin woven glass-fiber reinforced epoxy composites”. *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 249, p. 415-425.
- Kilickap, E., 2010. “Optimization of cutting parameters on delamination based on Taguchi method during drilling of GFRP composite”. *Expert Systems with Applications*, Vol. 37, No. 8, p. 6116-6122.
- Kumar, D. e Sing, K.K., 2017. “Experimental analysis of delamination, thrust force and surface roughness on drilling of glass fibre reinforced polymer composites material using different drills”. *Materials Today: Proceedings*, Vol. 4, No. 8, p. 7618-7627.
- Lachaud, F., Piquet, R., Collombet, F., Surcin, L., 2001. “Drilling of composite structures”, *Composite Structures*, Vol. 52, No.3-4, p. 511-516.
- Lazar, M.-B. e Xirouchakis, P., 2011. “Experimental analysis of drilling fiber reinforced composites”. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, Vol. 51, No. 12, p. 937–946.
- Liu, D.F., Tang, Y.J. e Cong, W.L., 2012. “A review of mechanical drilling for composite laminates”. *Composite Structures*, Vol. 94, No. 4, p. 1265-1279.
- Mallick, P.K., 2007. *Fiber-Reinforced Composites: Materials, Manufacturing and Design*, Taylor & Francis, 3rd Edition.
- Miranda G., 2003. *Uma contribuição ao processo de furação sem fluido de corte com broca de metal duro*. Tese de Doutorado, FEM-DEF-UNICAMP, Campinas, 2003.
- Ning, H., Li, Y., Hu, N., Arai, M., Takizawa, N., Liu, Y., Wu, L., Li, J. e Mo, F., 2015. “Experimental and numerical study on the improvement of interlaminar mechanical properties of Al/CFRP laminates”. *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 216, p. 79-88.
- Piquet, R., Ferret, B., Lachaud, F., Swider, P., 2000. “Experimental analysis of drilling damage in thin carbon/epoxy plate using special drills”, *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, Vol. 31, No. 10, p. 1107-1115.

6. RESPONSABILIDADE PELAS INFORMAÇÕES

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

DRILLING PARAMETERS OPTIMIZATION FOR QUALITY HOLES IN GFRP VIA BOX-BEHNKEN DESIGN

Daniel Klein Malacarne¹

Cristiano Devitte²

André João de Souza³

Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Departamento de Engenharia Mecânica, Rua Sarmento Leite, nº425, Cidade Baixa, CEP 90050-170, Porto Alegre, RS

¹dk_malaca@hotmail.com; ²cristiano.devitte1@gmail.com; ³ajsouza@ufrgs.br

Abstract: Drilling of glass fiber reinforced plastics (GFRP) is an essential process in the manufacture of components for aircraft, naval and automotive industries. Associated with this laminate composite drilling process, quality defects, such as dimensional deviation and delamination, are identified, which impair the performance of the parts. Hence the paper presents, via BoxBehnken design, the relation between these defects and the input parameters of the drilling process with HSS twist drills, such as feed-rate, cutting speed and drill tip angle. As response variables dimensional deviation of the obtained hole was evaluated, as well as adjustable delamination factor at the hole entrance and hole exit. Results show that there is a wide influence of feed-rate and tip angle in delamination, with a lower contribution of cutting speed. Dimensional deviation presents a significant correlation with point angle, whereas feed rate and cutting speed are less significant. Using MSR under a BBD arrangement, the following optimization of parameters: $\sigma = 105^\circ$, $vc = 50 \text{ m/min}$ e $f = 0,05 \text{ mm/rev.}$

Keywords: glass fiber reinforced plastic, Box-Behnken Design, drilling with HSS twist drills, adjusted delamination factor.

RESPONSIBILITY NOTICE

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