

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

OTIMIZAÇÃO DOS PARÂMETROS DE CORTE VISANDO A OBTENÇÃO DE FUROS
DE QUALIDADE EM PLACA DE POLÍMERO REFORÇADO COM FIBRA DE VIDRO
UTILIZANDO O PROJETO DE EXPERIMENTOS BOX-BEHNKEN

por

Daniel Klein Malacarne

Monografia apresentada ao Departamento de Engenharia Mecânica da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para obtenção do diploma de Engenheiro Mecânico.

Porto Alegre, dezembro de 2017

OTIMIZAÇÃO DOS PARÂMETROS DE CORTE VISANDO A OBTENÇÃO DE FUROS
DE QUALIDADE EM PLACA DE POLÍMERO REFORÇADO COM FIBRA DE VIDRO
UTILIZANDO O PROJETO DE EXPERIMENTOS BOX-BEHNKEN

por

Daniel Klein Malacarne

ESTA MONOGRAFIA FOI JULGADA ADEQUADA COMO PARTE DOS
REQUISITOS PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO DE
ENGENHEIRO MECÂNICO
APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELA BANCA EXAMINADORA DO
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

Profa. Dra. Thamy Cristina Hayashi
Coordenadora do Curso de Engenharia Mecânica

Área de Concentração: **Projeto e Fabricação**

Orientador: Prof. Dr. André João de Souza

Comissão de Avaliação:

Prof. Arnaldo Ruben Gonzalez

Prof. Darci Barnech Campani

Prof. Patric Daniel Neis

Porto Alegre, 21 de dezembro de 2017.

AGRADECIMENTOS

À minha namorada, Renata Presta, que sempre me motiva, inspira e apoia para que eu dê o melhor de mim e busque sempre objetivos maiores.

Aos meus pais Gilberto Malacarne e Kátia Klein Malacarne, e à minha irmã Emília Klein Malacarne, que me deram a base de educação, conhecimento e caráter, e me ensinaram o valor da formação acadêmica na vida pessoal e profissional.

Aos meus sogros, Elton Presta e Marta Prytula, pelo apoio incondicional.

Ao professor André João de Souza, pelo auxílio na concepção e execução do trabalho, pelas discussões, orientações e cobranças.

Ao técnico Guilherme Vargas Schirmer, pelo incansável auxílio na execução do trabalho, pelos conselhos e ideias.

Ao mestrando Adílio Felipe e à mestranda Andressa Caroline da Silva Carvalho, pelo auxílio, orientação e prestatividade.

Ao Laboratório de Materiais Poliméricos (LaPol-DeMat-UFRGS), pela doação do corpo de prova.

MALACARNE, D. K., **Otimização dos parâmetros de corte visando a obtenção de furos de qualidade em placa de polímero reforçado com fibra de vidro utilizando o projeto de experimentos Box-Behnken**. 2017. 24 fls. Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso em Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2017.

RESUMO

A furação de polímeros reforçados com fibras de vidro (GFRP) é um processo fundamental na fabricação de componentes para a indústria aeronáutica, naval e automobilística. Associado à furação desse compósito, identificam-se defeitos de qualidade, como o desvio dimensional e a delaminação, que prejudicam o desempenho das peças. Portanto, o principal objetivo deste trabalho é encontrar as relações destes defeitos com os parâmetros de entrada do processo de furação com broca helicoidal de aço-rápido, como o avanço, a velocidade de corte e o ângulo de ponta da broca. Para isso, aplicou-se o projeto de experimentos Box-Behnken, no qual a furação é realizada pela variação aleatória de tais variáveis. Como variáveis de resposta, avaliou-se o fator de delaminação ajustado na entrada e saída do furo, assim como o desvio dimensional do furo obtido. Os resultados analisados através da probabilidade de significância (valor-p), do coeficiente de determinação (R^2) e dos gráficos de superfícies de resposta mostraram que há ampla influência do avanço e do ângulo de ponta na delaminação, com uma 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. A otimização dos parâmetros sugere a utilização de uma broca com ângulo de ponta pequeno (105°), associado a pequenos avanços (0,05 mm/rev.) e altas velocidades de corte (50 m/min).

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

MALACARNE, D. K., **Optimization of cutting parameters in order to obtain quality holes in Glass Fiber Reinforced Plastic plate using Box-Behnken design**. 2017. 24 fls. Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso em Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2017.

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 the drilling process of this composite, quality defects, such as dimensional deviation and delamination, are identified, which impair the performance of the parts. Hence, the main objective of the present paper is to find 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. In order to achieve this, Box-Behnken design is applied, in which drilling is performed by random variation of such input variables. As response variables, adjustable delamination factor at the hole entrance and hole exit is evaluated, as well as dimensional deviation of the obtained hole. Results, which were analyzed through probability of significance (p-value), coefficient of determination (R^2) and response surface graphs, 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. Parameter optimization suggests the use of a drill with small tip angle (105°), associated to small feed-rate (0.05 mm/rev.) and high cutting speed (50 m/min).

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

LISTA DE SÍMBOLOS

GFRP	Polímero reforçado com fibra de vidro
HSS	Aço-rápido
v_c	Velocidade de corte
f	Avanço
σ	Ângulo de ponta
CFRP	Polímero reforçado com fibra de carbono
DOE	Projeto de experimentos
BBD	Projeto de experimentos Box-Behnken
F_c	Força de corte
F_f	Força de avanço
F_p	Força passiva
χ_r	Ângulo de posição
h	Espessura de corte
b	Largura de corte
d	Diâmetro da broca
ΔD	Desvio dimensional
F_d	Fator de delaminação
D_d	Diâmetro da zona danificada
D	Diâmetro nominal do furo
F_{da}	Fator de delaminação ajustado
A_d	Área danificada
A_{max}	Área com diâmetro D_d
A_o	Área nominal do furo
RSM	Metodologia de superfície de resposta
Y	Variável de resposta
X_n	Fatores controláveis
b_n	Coefficientes de regressão
valor-p	Probabilidade de significância
α	Nível de significância
R^2	Coefficiente de determinação
δ	Batimento
MMC	Máquina de medir por coordenadas
F_{dae}	Fator de delaminação ajustado na entrada
F_{das}	Fator de delaminação ajustado na saída

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	1
2	OBJETIVOS	2
3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	2
3.1	Processo de Furação	2
3.2	Polímero reforçado com fibra de vidro.....	3
3.3	Defeitos na Furação de GFRP	5
3.4	Projeto de Experimento Box-Behnken.....	6
4	MATERIAIS E MÉTODOS	6
4.1	Materiais	6
4.2	Equipamentos	7
4.3	Procedimento Experimental	7
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO	9
5.1	Desvio Dimensional.....	10
5.2	Fator de Delaminação Ajustado na Entrada do Furo	11
5.3	Fator de Delaminação Ajustado na Saída do Furo	11
5.4	Otimização dos Parâmetros	12
6	CONCLUSÕES.....	13
	REFERÊNCIAS.....	13
	APÊNDICES	16
	I – Imagens obtidas por microscopia óptica dos 15 furos na entrada da broca	16
	II – Imagens obtidas por microscopia óptica dos 15 furos na saída da broca.....	17

1 INTRODUÇÃO

Placas compósitas 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, porém fibra de vidro (GFRP – *Glass Fiber Reinforced Plastic*) é a mais utilizada, visto que apresenta um baixo custo associado à alta resistência mecânica e química, além de excelentes propriedades de isolamento [Mallick, 2007]. De acordo com a ASM Handbook, 2001, existem duas categorias de GFRP: fibras de baixo custo para usos genéricos – denominado tipo E – e fibras para aplicações especiais, que possuem diferentes denominações de acordo com a aplicação. Dentre as fibras para aplicações especiais, destaca-se as do tipo R ou S, que são fibras com alta resistência mecânica, especialmente a altas temperaturas.

No que tange a fabricação de componentes compósitos, a furação é o processo mais comum, pois apesar de as peças serem produzidas com formatos próximos ao final (NNS – *Near Net Shape*), a furação ainda é necessária para junções e montagem de conjuntos [Palanikumar, 2010]. Conforme Enemuoh et al., 2001, enquanto há uma vasta literatura relacionada à usinagem de metais, ainda há pouco material desenvolvido no que diz respeito à usinabilidade e seleção de parâmetros de usinagem para compósitos poliméricos. A seleção incorreta de parâmetros pode causar diversos problemas, tanto para a peça usinada, como para a ferramenta ou o equipamento. Dentre os problemas da peça, a delaminação – que consiste na separação das camadas adjacentes na estrutura do compósito – surge como principal problema de qualidade, assim como o desvio dimensional [Ho-Cheng e Dharan, 1990]. Segundo Ho-Cheng e Tsao, 2003, a qualidade da superfície é altamente dependente dos parâmetros de entrada do processo de furação. A determinação da relação física e matemática entre eles é, portanto, de grande interesse para obtenção de furos de alta qualidade.

Piquet et al., 2000, citam que as condições gerais de usinagem aplicadas aos metais podem ser aplicadas em compósitos de matriz termorrígida, e que, portanto, brocas helicoidais de aço-rápido (HSS – *High-Speed Steel*) são possíveis escolhas. Segundo Abrão et al., 2007, para brocas HSS, 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. Nessa linha, El-Sonbaty et al., 2004, utilizaram para brocas HSS $v_c = 5 \sim 50$ m/min e $f = 0,05 \sim 0,23$ mm/rev. No que tange a geometria das brocas, Chen, 1997, avaliou a influência do ângulo de ponta (σ) na força de avanço (F_f) e usou $\sigma = 90^\circ \sim 140^\circ$ para furação de compósitos de fibra de carbono (CFRP – *Carbon Fiber Reinforced Plastic*). Enemuoh et al., 2001, utilizou brocas HSS com $\sigma = 75^\circ \sim 160^\circ$ enquanto Kilickap, 2010, testou $\sigma = 118^\circ \sim 135^\circ$ na furação de fibra de vidro.

Para obtenção da relação entre parâmetros de entrada e saída do processo de usinagem, possibilitando sua otimização, pesquisadores têm utilizado os diversos modelos do projeto de experimentos (DOE – *Design of Experiments*). Vivancos et al., 2004, utilizaram o fatorial 2k para redução da rugosidade no fresamento em alta velocidade de aços endurecidos. Feng e Wang, 2002, desenvolveram um modelo para a rugosidade no torneamento de acabamento através de um experimento fatorial fracionado. Banin, 2009, estudou a influência dos parâmetros de corte nas tensões residuais durante o fresamento de topo do aço SAE 4340 endurecido através do delineamento composto central.

Segundo Ferreira, 2007, dentre os diversos projetos de experimentos, o Box-Behnken (BBD – *Box-Behnken Design*) é mais eficiente que os fatoriais e o de composto central, considerando como eficiência a razão entre o número de coeficientes do modelo e o número de experimentos. Isto é particularmente importante quando os corpos de prova apresentam um alto valor agregado. Ainda segundo o autor, o BBD é aplicável em diversas áreas de pesquisa, como na área química, médica e farmacêutica. O mesmo consiste em um projeto de experimentos com superfície de resposta de segunda ordem, onde são utilizados três níveis (-1, 0, +1) para cada fator. Um ponto importante é que não são realizados experimentos 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.

2 OBJETIVOS

Determinar através do projeto de experimentos Box-Behnken (BBD) a combinação dos parâmetros de entrada do processo de furação (ângulo de ponta da broca helicoidal de aço-rápido, velocidade de corte e avanço) que otimizem a qualidade do furo realizado em uma placa GFRP tipo R. Como fatores de qualidade, serão avaliados o desvio dimensional e a presença de delaminação na região da periferia na entrada e saída do furo.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo são abordados os conceitos relativos ao processo de furação; as aplicações e classificações referentes a GFRP; a definição e medição dos defeitos mais comuns na furação de GFRP; os fundamentos do projeto de experimentos Box-Behnken.

3.1 Processo de Furação

Furação é um processo de usinagem onde o movimento de corte é circular, enquanto que o movimento de avanço é linear na direção do eixo da ferramenta de corte. A ferramenta utilizada para furação é chamada broca, sendo a mais utilizada a broca helicoidal de aço rápido. A geometria da broca helicoidal, as superfícies, as arestas, os ângulos e as pontas são ilustrados na Figura 3.1. Destaca-se o ângulo de ponta (σ), que corresponde ao ângulo formado pelas arestas principais de corte [Diniz et al., 2013].

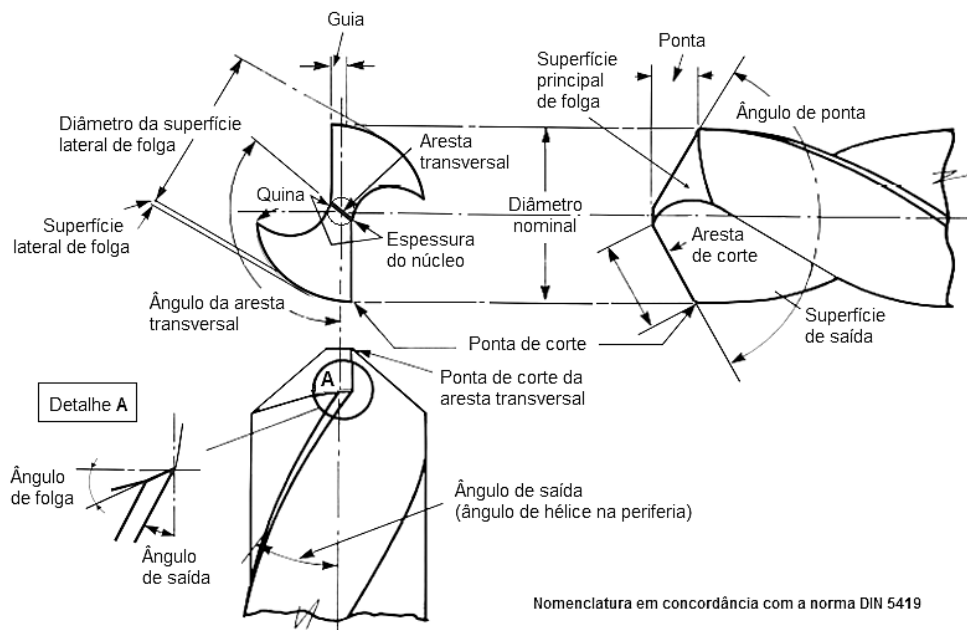


Figura 3.1 – Componentes básicos de uma broca helicoidal [adaptado de Contreras, 2014].

Ainda segundo Diniz et al., 2013, os movimentos realizados pela broca, em relação à peça considerada parada, são definidos como movimento principal de corte, de avanço e efetivo. O movimento principal de corte consiste no movimento entre ferramenta e peça, o que origina a remoção do cavaco durante a rotação da ferramenta. Sendo assim, a velocidade de corte é definida como a velocidade tangencial nas extremidades da broca. O movimento de avanço é o movimento linear da ferramenta na direção de seu eixo de rotação, sendo o avanço da ferramenta definido pelo comprimento percorrido linearmente pela broca durante uma rotação. O movimento efetivo é o movimento resultante dos dois movimentos. Associado a esses movimentos, pode-se também definir as forças ativas envolvidas na furação: força de corte (F_c) e força de avanço (F_f). Outra força envolvida é a força passiva (F_p), definida como a força

perpendicular ao eixo de rotação da ferramenta. Esta, porém, é desprezível quando comparada às outras, e normalmente é nula, considerando que a geometria da broca esteja correta. As forças que atuam sobre uma broca helicoidal durante o corte (Fig. 3.2a) geram esforços de torção (devido à rotação da broca) e esforços de compressão (devido ao avanço da broca).

Segundo Diniz et al, 2013, e Klocke, 2011, a influência do avanço (f) nas componentes da força de usinagem (F_c , F_f , F_p) ocorre devido à alteração da seção transversal de corte. Sendo assim, um incremento de f acarreta um aumento da seção transversal de corte, e por consequência, de todas componentes da força de usinagem. No entanto, este aumento é não linear, já que a pressão específica de corte diminui com o aumento de f (neste caso, o fluxo lateral do cavaco diminui, ou seja, a maior parte do material deformado se transforma em cavaco; além disso, o corte se torna mais dinâmico e o coeficiente de atrito diminui). Por outro lado, um incremento da velocidade de corte (v_c) acima da velocidade crítica (velocidade abaixo da qual ocorre a formação de aresta postiça de corte) provoca efeito contrário, ou seja, reduz as componentes da força de usinagem devido à redução do coeficiente de atrito e da dureza do material (efeito da temperatura na região de corte).

A variação da força de avanço (F_f) e da força passiva (F_p) em função do ângulo de ponta ($\sigma \leq 180^\circ$) ocorre devido à localização geométrica da aresta de corte em relação à peça (Fig. 3.2b). Sendo assim, F_{f1} e F_{f2} aumentam com o aumento do ângulo de posição ($\chi_r = \sigma/2$), enquanto que F_{p1} e F_{p2} diminuem com esse aumento. Com o aumento de χ_r , a espessura de corte (h) aumenta à mesma proporção que a largura de corte (b) diminui. Como a força de corte (F_{c1} e F_{c2}) é linearmente proporcional ao raio da broca ($d/2$) (equivalente à b) e não linearmente proporcional ao aumento do avanço por aresta ($f/2$) (equivalente a h) então a resultante destas duas varrições promove uma pequena redução de F_c com esse aumento [Klocke, 2011].

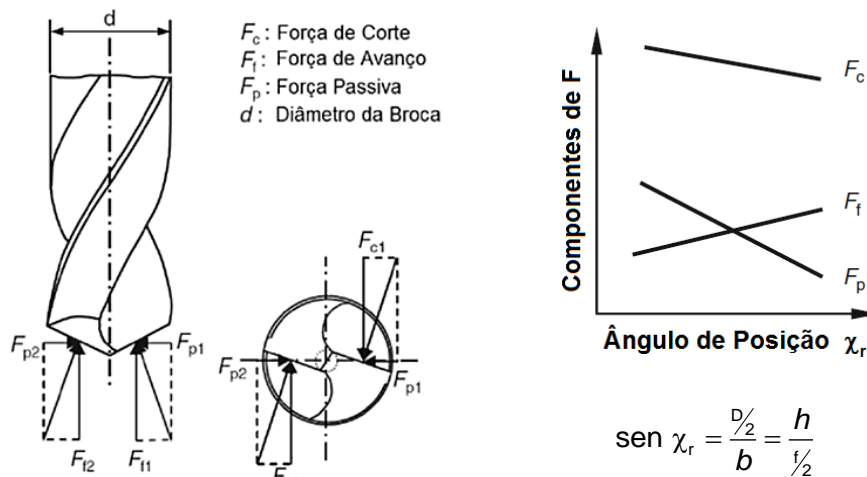


Figura 3.2 – (a) Forças de corte em furação; (b) Variação da intensidade das forças com o ângulo de posição (adaptado de Klocke, 2011).

3.2 Polímero reforçado com fibra de vidro

Segundo ASM Handbook, 2001, a fibra de vidro é um material composto principalmente por sílica, e em geral apresenta propriedades como alta dureza, transparência, resistência química, além de propriedades mecânicas desejáveis como resistência mecânica e rigidez. Dentre os usos mais comuns, destacam-se as placas de circuito impresso, componentes estruturais de aeronaves, aplicações militares e cascos de barcos. Para aplicações gerais, a fibra de vidro é comercializada em rolos de tecido ou manta, com variações quanto à sua formatação. Conforme Matheus, 2002, as formas podem ser distinguidas entre mantas, *rovings* ou tecidos. As mantas são arranjos aleatórios de pequenos filamentos de fibra, agregados por colantes. Os *rovings*, são a união de várias mechas de fibra, unidas em formato cilíndrico, sem torção. Os tecidos são obtidos através da tecelagem de *rovings*, e são aplicados quando há necessidade de alta resistência mecânica. Dependendo da disposição das fibras, pode-se dividir os tecidos

em unidirecional ou bidirecional, e isto impacta nas propriedades mecânicas, que variam de acordo com a direção analisada. A Figura 3.3 resume os tipos supracitados.

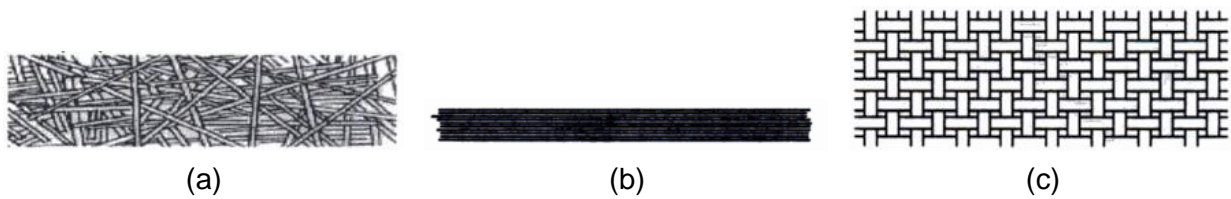


Figura 3.3 – Formas de fibra de vidro: (a) manta; (b) *roving*; (c) tecido [Matheus, 2002].

Além da formatação da fibra, ASM Handbook, 2001, também classifica as fibras de acordo com suas propriedades ou características (Tab. 3.1).

Tabela 3.1 – Denominações e propriedades das GFRP [ASM Handbook, 2001].

Denominação	Propriedade ou característica
E, elétrica	Baixa condutividade elétrica
R, S ou Te, resistência	Alta resistência mecânica
C, química	Alta durabilidade química
M, módulo	Alta rigidez
A, alcalina	Alta alcalinidade
D, dielétrica	Baixa constante dielétrica

GFRP tipo E seguem a especificação da ASTM, e representam 90% do mercado de fibras de vidro. Já as GFRP de alta resistência mecânica (tipo R, S ou Te) são fibras com crescente representatividade no mercado, visto que apresentam resistência mecânica na ordem de 4500 MPa, 30% acima da resistência da GFRP tipo E. A maior atratividade dessa classe de fibras é sua aplicabilidade a altas temperaturas, podendo chegar a 900 °C, enquanto GFRP tipo E falham próximo de 600 °C [Wallenberger e Bingham, 2010]. A Figura 3.4 apresenta um comparativo da resistência mecânica em função da temperatura para as GFRP tipo R e tipo E. O enfoque deste trabalho será nas fibras tipo R, com tecido bidirecional.

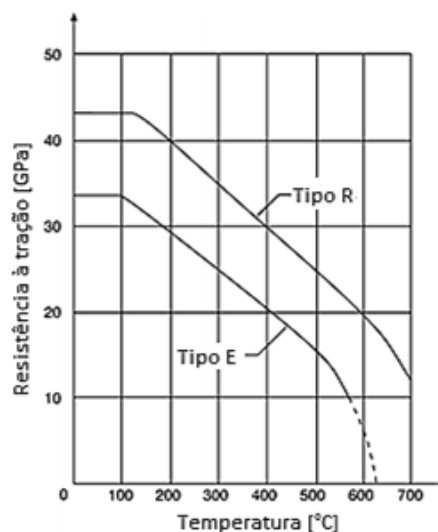


Figura 3.4 – Resistência mecânica das GFRP tipo E e R a altas temperaturas [St. Gobain, 1963¹ apud Wallenberger e Bingham, 2010].

¹ S St. Gobain, FRA Pat. 1435739, 1963

3.3 Defeitos na Furação de GFRP

A furação de compósitos laminados com brocas helicoidais é suscetível a diversos tipos de defeitos, que, segundo Lachaud et al., 2001, podem ser classificados em quatro categorias principais – defeitos na entrada do furo, defeitos na saída do furo, defeitos dimensionais e defeitos térmicos. Piquet et al., 2000, explica que defeitos na entrada do furo são ocasionadas pelo descolamento das fibras na primeira camada da placa pela aresta principal de corte da broca, que causam a delaminação. Defeitos na saída do furo se devem à tensão nas últimas camadas da placa provocada pela força de avanço (F_f). Quando a tensão excede o limite de adesão entre fibra e matriz, trincas surgem e se propagam, causando a delaminação. Defeitos térmicos são originados do atrito entre broca e peça, e podem afetar a integridade da matriz polimérica, além de prejudicar o acabamento da parede do furo. 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. Miranda, 2003, define que o desvio dimensional (ΔD) é a diferença entre a medida real do furo em relação à sua medida nominal (geométrica). A Figura 3.5 ilustra os defeitos na entrada e saída do furo, além do desvio dimensional.

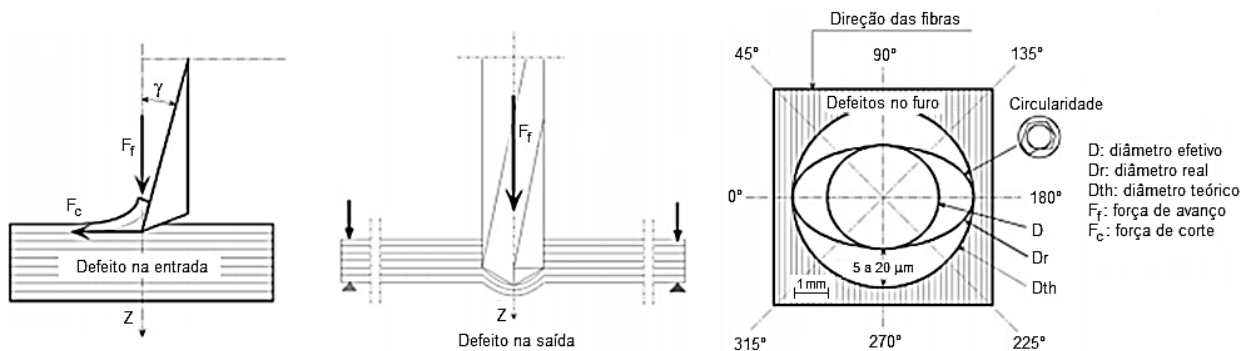


Figura 3.5 – Diferentes defeitos na furação de placas compósitas [Lachaud et al., 2001].

Segundo Davim et al., 2007, diversas técnicas têm sido utilizadas para detectar a delaminação, tanto na entrada quanto na saída do furo. Davim e Reis, 2003, utilizaram microscopia para avaliar a delaminação na furação de fibra de carbono (CFRP). A fim de obter uma quantificação e parâmetro de comparação da delaminação no processo de furação de compósitos laminados, 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 do furo (D). Davim et al., 2007, propôs um fator de delaminação ajustado (F_{da}), que considera o fator de delaminação clássico 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), conforme as Equações (3.1) a (3.4).

$$F_{da} = F_d + \left(\frac{A_d}{A_{max} - A_o} \right) (F_d^2 - F_d) \quad (3.1)$$

$$F_d = \frac{D_d}{D} \quad (3.2)$$

$$A_{max} = \frac{\pi D_d^2}{4} \quad (3.3)$$

$$A_o = \frac{\pi D^2}{4} \quad (3.4)$$

3.4 Projeto de Experimento Box-Behnken

Dentre as metodologias de projeto de experimentos (DOE), a de superfície de resposta (RSM – *Response Surface Methodology*) consiste na modelagem das variáveis de resposta através de um modelo equacional não linear quadrático. A Equação (3.5) representa o modelo, onde Y é a variável de resposta, X_1 , X_2 , X_3 os fatores controláveis, e b_n os coeficientes de regressão [Baumgaertner, 2017].

$$Y = b_0 + b_1X_1 + b_2X_2 + b_3X_3 + b_{12}X_1X_2 + b_{13}X_1X_3 + b_{23}X_2X_3 + b_{11}X_1^2 + b_{22}X_2^2 + b_{33}X_3^2 \quad (3.5)$$

O BBD é um dos tipos de RSM, onde os fatores possuem três níveis e são combinados em fatoriais incompletos, visto que não são realizados experimentos com todos os parâmetros simultaneamente em seus valores máximos ou mínimos. Portanto, para três fatores são realizados 15 experimentos, sendo 12 variando os fatores em seus três níveis e três com os três fatores em seus níveis médios (ponto central). Este caso pode ser representado pela Figura 3.6 [Ferreira et al., 2007].

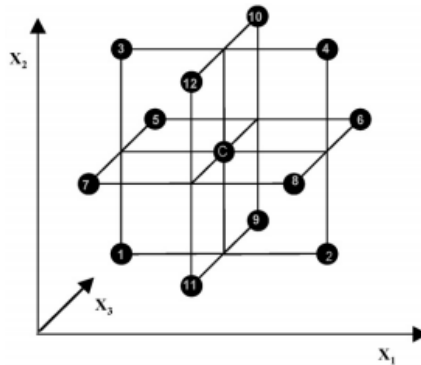


Figura 3.6 – BBD de três fatores [Ferreira et al., 2007].

Segundo Baumgaertner, 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. Para análise dessas relações, utiliza-se a tabela de coeficientes da equação de regressão e a probabilidade de significância (valor-p). O valor-p fornece a medida da significância estatística de cada fator. Consideram-se como fatores estatisticamente significativos aqueles que apresentarem valores-p menores que o nível de significância (α). Além disso, é apresentado o valor do coeficiente de determinação (R^2) que representa a medida da variação explicada pelo modelo de regressão. Seus limites variam entre 0 e 100%. Um $R^2 = 1$ significa um perfeito ajustamento; por outro lado, $R^2 = 0$, significa que não há nenhuma relação entre a variável explicativa e a variável explicada [Minitab, 2010].

4 MATERIAIS E MÉTODOS

Aqui serão caracterizados os materiais e equipamentos utilizados nos experimentos, além do procedimento usado na furação e a medição dos fatores de qualidade.

4.1 Materiais

A placa de GFRP é composta de uma camada de fibra de vidro tipo R, bidirecional, trançado simples, em uma matriz de resina epóxi. Possui 2 mm de espessura, e está esquematizada na Figura 4.1. A área utilizável para a furação está axadrezada no desenho e 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 onde ocorre a injeção da resina líquida.

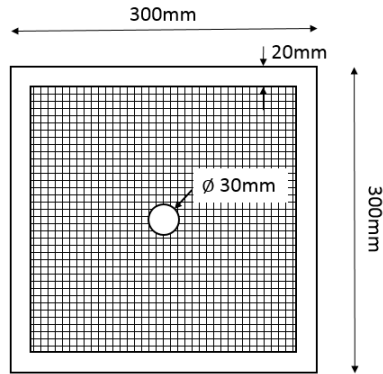


Figura 4.1 – Desenho esquemático da placa GFRP utilizada.

As brocas utilizadas para realização dos furos 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 [Lenox-Twill, 2016]. As brocas foram afiadas com ângulos de ponta $\sigma = 90^\circ$, 118° e 146° , conforme Figura 4.2.



Figura 4.2 – Brocas Lenox-Twill TW104 $\varnothing 10$ mm.

4.2 Equipamentos

Os experimentos foram conduzidos no centro de usinagem ROMI Discovery 308 com comando Mach 8, rotação máxima de 4000 rpm e potência máxima de 5,5 kW disponível no Laboratório de Automação em Usinagem (LAUS-UFRGS). Para medição do erro de batimento da broca (δ), utilizou-se o relógio comparador Digimess modelo 121.304, com resolução de $10 \mu\text{m}$. Para medição do fator de delaminação ajustado (F_{da}) foi utilizado o microscópio digital USB DinoLite modelo AM-4113ZT, com resolução de 1024×768 pixels e ampliação de até 200x. Para medição do diâmetro do furo, a MMC (máquina de medir por coordenadas) Mitutoyo modelo QM Measure 353, com resolução de $0,5 \mu\text{m}$, foi utilizada.

4.3 Procedimento Experimental

Para a obtenção da melhor combinação de parâmetros de entrada (ângulo de ponta da broca HSS, velocidade de corte e avanço), a metodologia BBD define que devem ser estabelecidos três níveis para cada fator, que são combinados e sequenciados aleatoriamente. Os parâmetros e seus níveis (baseados na literatura) são apresentados na Tabela 4.1.

Também conforme definido pela metodologia BBD, são realizados 15 furos. As combinações e a sequência aleatorizada dos parâmetros de entrada para a geração dos furos são apresentadas na Tabela 4.2 e definidos através do software *Minitab*® 16.

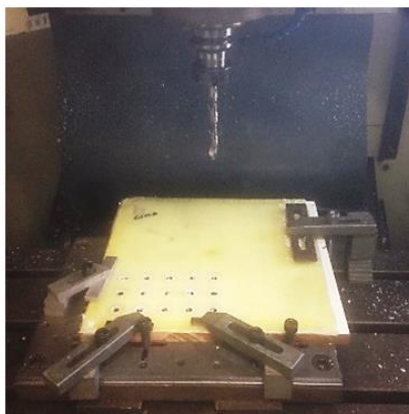
Tabela 4.1 – Três níveis dos parâmetros de entrada.

Parâmetro	Nível		
	-1	0	+1
Velocidade de corte v_c [m/min]	10	30	50
Avanço f [mm/rev.]	0,05	0,15	0,25
Ângulo de ponta σ [°]	90	118	146

Tabela 4.2 – Sequência aleatorizada dos experimentos.

Furo	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
v_c	10	50	30	30	10	30	30	50	30	10	50	30	10	30	50
f	0,15	0,15	0,05	0,05	0,05	0,15	0,25	0,05	0,25	0,15	0,15	0,15	0,25	0,15	0,25
σ	146	90	146	90	118	118	90	118	146	90	146	118	118	118	118

O esquema de montagem do corpo de prova é apresentado na Figura 4.3a. Utilizou-se um apoio em madeira com furos de diâmetro de 21 mm, concêntricos aos executados na placa GFRP, o que garante o furo passante com mesmo apoio para todos os casos. Manteve-se o espaçamento entre centros de 30 mm a fim de evitar interferência entre diferentes furações. A cada troca de broca, foi medido o batimento (δ) conforme ilustrado na Figura 4.3b.



(a)



(b)

Figura 4.3 – Experimento de furação no centro de usinagem: (a) esquema de montagem da placa; (b) medição do batimento (δ) da broca.

A análise do fator de delaminação ajustado na entrada (F_{dae}) e na saída (F_{das}) da broca foi realizada nos 15 furos através de imagens obtidas no microscópio com ampliação de 30x. O fator foi calculado segundo a Equação (3.1), sendo que o máximo diâmetro da zona danificada (D_d), e a área danificada externa ao furo (A_d) foram medidos no microscópio, conforme esquema de medição ilustrado na Figura 4.4a. A fim de se obter o desvio dimensional (ΔD) das amostras, mediu-se o diâmetro de cada furo na MMC, a partir de três pontos internos, conforme Figura 4.4b. Foram efetuadas três medições de cada furo, e calculou-se a média aritmética simples.

Os valores obtidos foram analisados através do *Minitab*® 16. A tabela de coeficientes, valores-p e R^2 foi utilizada para avaliar a adequação do modelo (R^2) e a significância estatística (valor-p) de cada parâmetro no modelo além dos coeficientes (b_n) da Equação (3.5). 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.

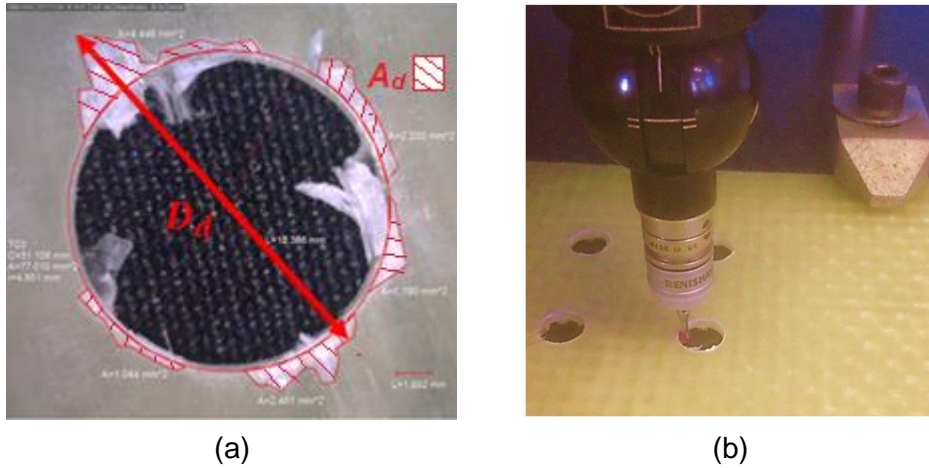


Figura 4.4 – Esquema de medição: (a) F_{da} através de D_d e A_d ; (b) diâmetro do furo.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Este capítulo apresenta os modelos para o desvio dimensional (ΔD) e para o fator de delaminação na entrada (F_{dae}) e na saída (F_{das}). Também é apresentada a otimização dos parâmetros para o ótimo global. As medições de batimento (δ), diâmetro (D), 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 estão apresentados na Tabela 5.1. As imagens onde foram obtidos os valores estão apresentadas nos Apêndices I (entrada) e II (saída).

Tabela 5.1 – Desvio dimensional e fator de delaminação dos furos gerados.

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

A Tabela 5.2 apresenta os coeficientes e os valores-p dos coeficientes da equação de cada modelo (Equação 3.5), além dos R^2 de cada modelo.

Tabela 5.2 – Coeficientes, valores-p e R^2 para ΔD , F_{dae} e F_{das} .

Fator	ΔD		F_{dae}		F_{das}	
	Coeficiente	Valor-p	Coeficiente	Valor-p	Coeficiente	Valor-p
b_0	0,781	0,905	1,926	0,000	2,144	0,000
v_c	-0,004	0,802	-0,020	0,041	-0,012	0,309
f	-0,137	0,470	-0,599	0,044	-6,405	0,194
σ	-0,012	0,173	-0,010	0,048	-0,008	0,411
v_c^2	0,000028	0,159	0,000066	0,388	0,0000255	0,810
f^2	-1,437	0,087	-1,558	0,602	8,060	0,101
σ^2	0,0000481	0,003	0,0000322	0,409	0,0000174	0,745
$v_c \times f$	0,002	0,619	0,0289	0,084	0,045	0,066
$v_c \times \sigma$	0,0000178	0,186	0,000123	0,050	0,0000413	0,575
$f \times \sigma$	0,004	0,140	0,00598	0,561	0,026	0,121
R^2	90,64%		87,51%		78,01%	

5.1 Desvio Dimensional

A Figura 5.1 apresenta as superfícies de resposta do desvio dimensional (ΔD) 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 o ângulo de ponta (σ), pode-se verificar que valores intermediários de σ apresentam os menores valores de ΔD . Isso pode ser 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 velocidade de corte (v_c) apresenta uma tendência moderada de reduzir o ΔD à medida que é aumentada, principalmente pela redução nos esforços de corte. Da mesma forma, o avanço (f), se avaliado isoladamente, também tem pouca influência no 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 .

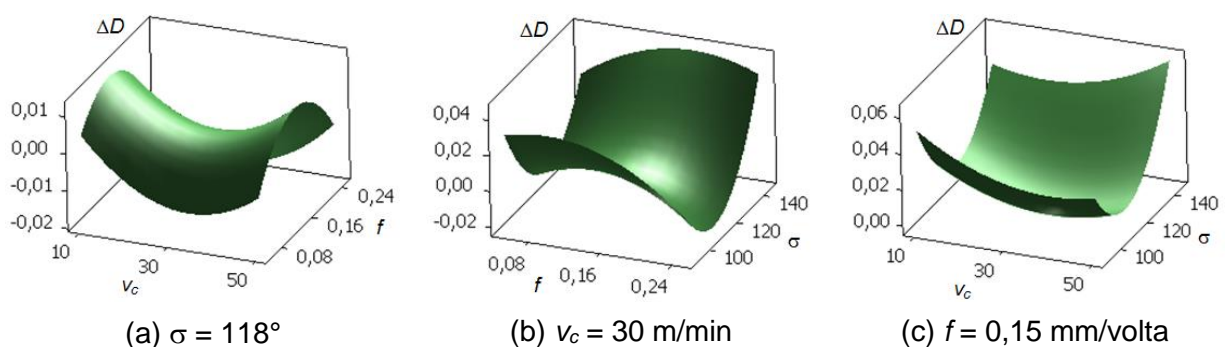


Figura 5.1 – Superfícies de resposta de ΔD em função dos parâmetros de entrada.

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 apresentados no Tabela 5.2. O R^2 é de 90,6%, o que sinaliza que o modelo explica bem os dados obtidos.

5.2 Fator de Delaminação Ajustado na Entrada do Furo

A Figura 5.2 apresenta as superfícies de resposta do Fator de Delaminação Ajustado na Entrada do Furo (F_{dae}) em função dos parâmetros de entrada (σ , v_c e f). Para a geração dos gráficos, os pontos centrais foram fixados. Pode-se notar que com o aumento de f e σ , há um aumento significativo de F_{dae} .

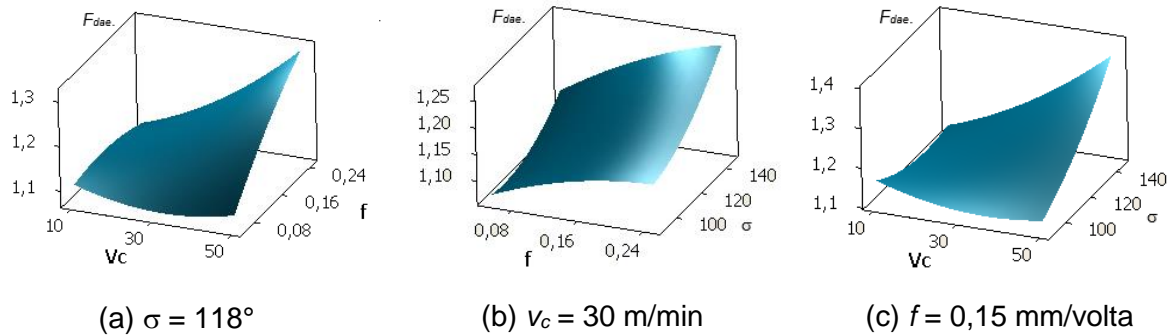


Figura 5.2 – Superfícies de resposta de F_{dae} em função dos parâmetros de entrada.

Para ângulo de ponta (σ) maiores, a aresta de corte tende a cortar a fibra mais horizontalmente, o que causa um efeito de descascamento que gera maior delaminação de entrada (maior F_{dae}). Para avanços (f) maiores, há um aumento da força de corte (F_c), o que causa delaminação na entrada.

Para menores valores de f , a velocidade de corte (v_c) tem um efeito moderado de redução do F_{dae} . Uma possível explicação é que há uma redução nas forças de usinagem pelo efeito do aumento da temperatura na matriz polimérica, causado pela maior velocidade de corte. Com o aumento de f , porém, o tempo de interação entre ferramenta e 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 tem pouco efeito na resposta. Os valores-p de cada fator corroboram essas tendências e são apresentados no Tabela 5.2. O R^2 é de 87,5%, o que sinaliza que o modelo explica bem os dados obtidos.

5.3 Fator de Delaminação Ajustado na Saída do Furo

A Figura 5.3 apresenta as superfícies de resposta do Fator de Delaminação Ajustado 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.

Pode-se notar que, com o aumento de f , cresce significativamente o F_{das} devido ao aumento da força de avanço (F_f). Analisando o efeito do ângulo de ponta (σ), pode-se perceber que o aumento de σ é diretamente proporcional ao do F_{das} também pelo efeito da força de avanço (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} .

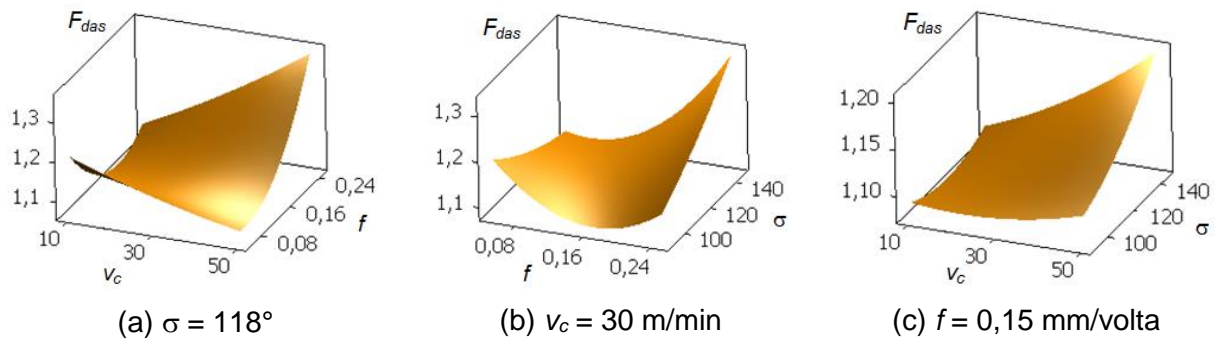


Figura 5.3 – Superfícies de resposta de F_{das} em função dos parâmetros de entrada.

O R^2 deste modelo é de 78%, o que sinaliza que o modelo explica relativamente bem os dados obtidos. A tabela de coeficientes e valores-p deste modelo é apresentada no Tabela 5.2. Considerando a Figura 5.3b, nota-se um pico de F_{das} para baixo f e baixo σ . Esse ponto contradiz a literatura e a tendência do restante do gráfico, e pode ser decorrente da falta de ajuste do modelo. Novas medições com essa configuração são aconselhadas.

5.4 Otimização dos Parâmetros

Para otimização global dos parâmetros, foi considerado o peso de 40% para cada fator de delaminação e de 20% para o desvio dimensional. O valor máximo aceitável para F_{dae} e F_{das} foi de 1,15, que corresponde à média dos valores obtidos experimentalmente. O intervalo admissível para ΔD foi entre -0,01 e 0,03 mm, que também correspondem à média dos valores negativos e positivos medidos nas amostras. A função objetivo visa minimizar os fatores de delaminação e manter o desvio dimensional o mais próximo de zero. Os efeitos dos parâmetros de entrada nas variáveis de saída, obtidos no software *Minitab*[®] 16, são apresentados na Figura 5.4. Para avaliar o efeito de cada parâmetro são mantidos fixos os demais parâmetros, e plotam-se as variáveis de saída em função de cada parâmetro, obtendo-se os nove gráficos da Figura 5.4. Além desses gráficos, é apresentado o gráfico de desejabilidade, que mostra o quanto a otimização está próxima do ótimo de cada saída.

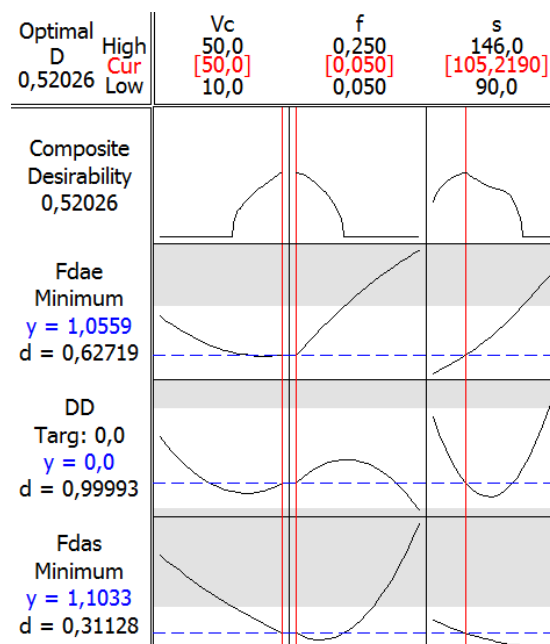


Figura 5.4 – Gráficos de otimização em função dos parâmetros de entrada.

A combinação de parâmetros otimizados é apresentada na Tabela 5.3. Segundo o modelo, essa combinação gera respostas de $F_{dae} = 1,05$; $F_{das} = 1,10$ e $\Delta D = 0$ mm. Vale dizer que a ausência de delaminação corresponde a $F_{da} = 1$.

Tabela 5.3 – Parâmetros otimizados globais.

Parâmetro	Valor ótimo
Velocidade de corte v_c [m/min]	50
Avanço f [mm/rev.]	0,05
Ângulo de ponta σ [°]	105

O experimento de validação da otimização, realizado com os parâmetros da Tabela 5.3, resultou nos valores de $F_{dae} = 1,04$; $F_{das} = 1,09$ e $\Delta D = 0,03$ mm. 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 0,03mm para o desvio dimensional é menor que o valor do batimento da broca.

O valor ótimo do avanço (f) é no seu mínimo, visto que o aumento do avanço influencia significativamente o fator de delaminação ajustado (F_{da}). Da mesma forma, o ângulo de ponta (σ) é mantido em valores pequenos, pois reduz a delaminação e melhora o desvio dimensional (ΔD). A velocidade de corte (v_c) é mantida no seu valor máximo, visto que, para baixos avanços, há uma influência positiva da v_c na delaminação.

6 CONCLUSÕES

Baseado nos modelos obtidos a partir do BBD foi possível definir as relações entre os parâmetros de entrada – ângulo de ponta da broca de aço-rápido (σ), velocidade de corte (v_c) e avanço (f) – e os de saída – desvio dimensional (ΔD), fator de delaminação na entrada (F_{dae}) e fator de delaminação na saída (F_{das}).

O ângulo de ponta da broca (σ) é o principal parâmetro que influencia o desvio dimensional (ΔD). Valores intermediários de σ apresentam os melhores resultados. O aumento de v_c e f reduzem ΔD , mas com uma significância menor que σ .

As análises das superfícies de resposta e de variância dos modelos mostram que o avanço tem grande influência em F_{dae} e F_{das} , 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 uma redução da delaminação. Porém, para maiores valores de f , o efeito é suprimido.

O parâmetro R^2 dos modelos indica um ajuste na ordem de 90% para ΔD e F_{dae} . Para F_{das} , o ajuste foi de 78%.

A otimização das variáveis de entrada sugere a utilização de $v_c = 50$ m/min, $f = 0,05$ mm/rev. e $\sigma = 105^\circ$. Essa combinação visa reduzir simultaneamente o desvio dimensional e a delaminação. Ressalta-se o impacto da redução do avanço no tempo de usinagem, portanto recomenda-se, para futuros trabalhos e aplicações industriais, avaliar o tempo de usinagem como resposta da otimização.

REFERÊNCIAS

Abrão, A., Faria, P., Rubio, J., Reis, P., Davim, J. “**Drilling of reinforced plastics: A review**”, Journal of Materials Processing Technology, vol. 186, pp 1-7, 2007.

ASM Handbook, “**Vol 21: Composites**”, Ohio, p. 1143, 2001.

Banin, J., “**Análise de tensões residuais, integridade superficial e forças de usinagem no fresamento de topo de aço SAE 4340 endurecido**”, Dissertação (Mestrado em Materiais e Processos) – Centro Universitário da FEI, São Bernardo do Campo, 2009.

Baumgaertner, A., “**Análise dos parâmetros da polaridade negativa na curva de corrente de soldagem MIG/MAG polaridade variável aplicados à soldagem para revestimento**”, Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2017.

Chen, W., “**Some experimental investigations in the drilling of carbon fiber-reinforced plastic (CFRP) composite laminates**”, International Journal of Machine Tools and Manufacture, vol. 37, pp 1097-1108, 1997

Contreras, R., “**La mecha para taladrar: La geometria de la punta de la broca helicoidal**”, Disponível em: <<http://ciencia.digital.info.ve/2014/08/la-mecha-para-taladrar-la-geometria-de.html>>, 2014. Acesso em 30/11/2017.

Davim, J., Reis, P., “**Drilling carbon fiber reinforced plastics manufactured by autoclave – experimental and statistical study**”, Materials and Desing, vol. 24, pp 315-324, 2003.

Davim, J., Rubio, J., Abrao, A., “**A novel approach based on digital image analysis to evaluate the delamination factor after drilling composite laminates**”, Composites Science and Technology, vol. 67, pp. 1939-1945, 2007.

Diniz, A. E., Marcondes, F. C., Coppini, N. L. “**Tecnologia da usinagem dos materiais**”, 8.ed., São Paulo: Artliber, 2013.

El-Sonbaty, I., Khashaba, U., Machaly, T., “**Factors affecting the machinability of GFR/epoxy composites**”, Composite Structures, vol. 63, pp 329-338, 2004.

Enemuoh, E., El-Gizawy, A., Okafor, A. “**An approach for development of damage-free drilling of carbon fiber reinforced thermosets**”, International Journal of Machine Tools & Manufacture, vol. 41, pp 1795-1814, 2001.

Feng, C., Wang, X., “**Development of Empirical Models for Surface Roughness Prediction**”, The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, vol. 20, pp 348-356, 2002.

Ferreira, S., Bruns, R., Ferreira, H., Matos, G., David, J., Brandão, G., Da Silva, E., Portugal, L., Dos Reis, P., Souza, A., Dos Santos, W., “**Box-Behnken design: An alternative for the optimization of analytical methods**”, Analytica Chimica Acta, v. 597, p.179-186, 2007.

Ho-Cheng, H., and C. K. H. Dharan. “**Delamination during drilling in composite laminates**”, Journal of Engineering for Industry (Transactions of the ASME), v.112, n.3, p.236-239, 1990

Ho-Cheng, H., Tsao, C., “**Comprehensive analysis of delamination in drilling of composites materials with various drill bits**”, Journal of Materials Processing Technology, vol. 140, pp 335-339, 2003.

Kilickap, E., “**Optimization of cutting parameters on delamination based on Taguchi method during drilling of GFRP composite**”, Expert Systems with Applications, vol. 37, pp 6116-6122, 2010.

Klocke, F., “**Manufacturing Processes 1 – Cutting**”, Springer, Berlin Heidelberg, 2011.

Lachaud, F., Piquet, R., Collombet, F., Surcin, L., “**Drilling of composite structures**”, Composite Structures, vol. 52, pp. 511-516, 2001.

Lenox-Twill, “**Brocas para aplicação geral**”, 2016.

Mallick, P., “**Fiber-reinforced composites: materials, manufacturing and design**”, Taylor and Francis Group, 3rd edition, 2007.

Matheus, M., “**Fiberglass: aprenda fibra de vidro**”, Novo Conceito, 1^a edição, 2002.

Minitab, “**StatGuide**”, 2010.

Miranda G., “**Uma contribuição ao processo de furação sem fluido de corte com broca de metal duro**”, Dissertação (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2003.

Palanikumar, “**Modeling and Analysis of Delamination Factor and Surface Roughness in Drilling GFRP Composites**”, Materials and Manufacturing Processes, vol. 25, pp 1059-1067, 2010.

Piquet, R., Ferret, B., Lachaud, F., Swider, P., “**Experimental analysis of drilling damage in thin carbon/epoxy plate using special drills**”, Composites: Part A, vol. 31, pp 1107-115, 2000.

Vivancos, J., Luis, C., Costa, L., Ortiz, J., “**Optimal machining parameters selection in high speed milling of hardened steels for injection moulds**”, Journal of Materials Processing Technology, vol. 155-156, pp 1505-1512, 2004.

Wallenberger, F., Bingham, P., “**Fiberglass and glass technology**”, Springer, 1.ed., 2010.

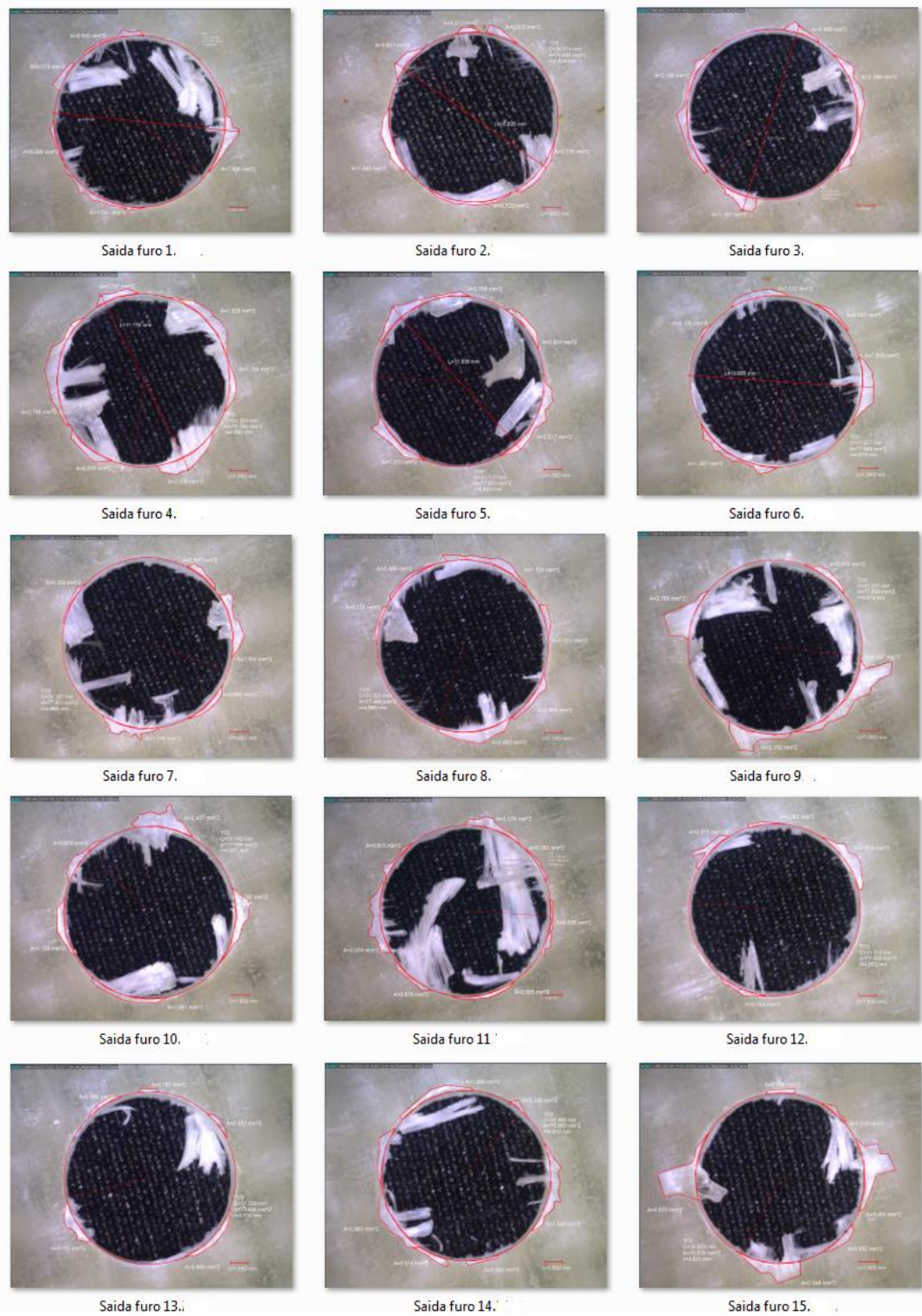
APÊNDICES

I – Imagens obtidas por microscopia óptica dos 15 furos na entrada da broca



Figura A1 – Avaliação de D_d e A_d na entrada dos furos.

II – Imagens obtidas por microscopia óptica dos 15 furos na saída da broca.

Figura A2 – Avaliação de D_d e A_d na saída dos furos.