

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

EFEITO DO AR COMPRIMIDO REFRIGERADO E DA FURAÇÃO EM ALTA
VELOCIDADE DE CORTE SOBRE O ACABAMENTO DE FUROS EM JUNTAS
HÍBRIDAS COMPÓSITO-METAL Al/FRP/AL, Al/FRP e GFRP/Ti

por

Cristiano Devitte

Tese para obtenção do Título de
Doutor em Engenharia

Porto Alegre, dezembro de 2022

EFEITO DO AR COMPRIMIDO REFRIGERADO E DA FURAÇÃO EM ALTA
VELOCIDADE DE CORTE SOBRE O ACABAMENTO DE FUROS EM JUNTAS
HÍBRIDAS COMPÓSITO-METAL Al/FRP/AL, Al/FRP e GFRP/Ti

por

Cristiano Devitte

Mestre em Ciência e Engenharia dos Materiais

Tese de Doutorado submetida ao Corpo Docente do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos necessários para a obtenção do Título de Doutor em Engenharia

Área de Concentração: Processos de Fabricação

Orientador: Prof. Dr. André João de Souza

Comissão de Avaliação:

Prof. Dr. Luís Miguel Pereira Durão

ISEP/IPP (Portugal)

Prof. Dr. Sandro Campos Amico

PPGE3M/PROMECC/UFRGS

Prof. Dr. Volnei Tita

DEA/EESC/USP

Prof. Dr. Felipe Roman Centeno

Coordenador do PROMEC

Porto Alegre, 16 de dezembro de 2022

AGRADECIMENTOS

Primeiramente a Deus, por permitir que eu tivesse saúde física e mental para a conclusão desta etapa importante da minha trajetória acadêmica.

Ao Prof. André J. Souza (LAUS/UFRGS), pela coordenação, orientação e pelas palavras de entendimento e esclarecimento sempre quando necessárias.

À Sandvik Coromant, pela doação das ferramentas, à Embraer, pela doação dos materiais metálicos, e ao GEA (Grupo de Estudos Aeronáuticos) da EESC/USP, pela fabricação dos compósitos utilizados nos experimentos.

À Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto (FEUP), Portugal, por abrir as portas durante o difícil período de pandemia para a realização das atividades práticas experimentais.

Ao Prof. Luiz Durão, pela colaboração e suporte nas atividades experimentais realizadas em Portugal, pelos direcionamentos feitos na qualificação e pela avaliação da tese.

Aos professores Abílio de Jesus, Filipe Silva e Thiago Silva, e ao técnico José Bouças, pelas orientações das atividades na cidade do Porto.

A laboratório de metrologia do INEGI (FEUP), pela medição da rugosidade, à empresa Micromazza (Vila Flores, RS), pela realização das medições de circularidade dos furos, e ao técnico Francis Almeida (CMM/UFRGS), pelas análises via MEV.

Ao técnico Guilherme Schirmer (LAUS/UFRGS), pela disponibilidade nos ajustes e esclarecimento de dúvidas relativos aos equipamentos e técnicas necessárias para as análises.

Ao Prof. Fernando Pereira e à secretária Melina Dick (PROMEC/UFRGS), pelo apoio institucional disponibilizado para a realização das atividades.

Aos professores Volnei Tita e Sandro Amico, pelas orientações e direcionamentos feitos na qualificação e pela avaliação da tese.

Aos amigos, colegas e familiares que estiveram envolvidos com as atividades.

Enfim, a todos que colaboraram direta ou indiretamente para a realização destas atividades, o meu muito obrigado.

*Dedico esta tese às pessoas mais importantes
da minha vida: meu filho Rafael, minha esposa
Grasiane e meus pais Claudino e Marisa.*

“A persistência é o caminho do êxito”

Charles Chaplin.

RESUMO

As juntas híbridas compósito-metal surgem da combinação de polímeros reforçados com fibras e materiais metálicos que permitem sua utilização em situações que necessitem peças com baixa densidade e elevada resistência a altas temperaturas. Sua fabricação e montagem dependem do processo de furação, e danos ocasionados pelo processo podem reduzir sua resistência. Além disto, devido aos materiais distintos que possuem (compósito e metal), a furação apresenta desafios relacionados com a qualidade do furo. Neste sentido, o estudo visa avaliar o efeito do ar comprimido refrigerado (ACR) e da furação em alta velocidade de corte (HSC – *High-speed cutting*) sobre o acabamento de furos em juntas híbridas compósito-metal. Inicialmente, usando a liga de alumínio Al 2124, analisou-se a influência da combinação de diversos fatores em dois níveis: tipo de junta (Al/FRP/Al ou FRP/Al), tipo de compósito (CFRP ou GFRP), geometria da ferramenta (118° ou 135°) e avanço (0,02 ou 0,08 mm/volta), com a presença e ausência de ACR, aplicando baixa velocidade de corte (40 m/min) e HSC (220 m/min). Notou-se que os diferentes tipos de reforços e juntas impactaram significativamente a delaminação dos materiais compósitos, o ACR mostrou uma tendência a diminuir os defeitos, e o efeito combinado entre HSC e ACR não afetou de maneira considerável a qualidade dos furos. Isso possibilitou a utilização do HSC sem prejudicar a junta híbrida. Posteriormente, investigou-se o efeito de HSC e ACR na junta simples GFRP/Ti-6Al-4V com baixo avanço, a fim de verificar as características do furo realizado no compósito reforçado com fibra de vidro. Os resultados mostraram que HSC não impacta significativamente na força de avanço e na delaminação do GFRP. Apesar de não ter efeito significativo, o ACR reduziu a circularidade do furo e a delaminação do GFRP. A baixa velocidade de corte favoreceu a rugosidade da parede do furo na chapa metálica, devido à reduzida adesão do Ti-6Al-4V na ferramenta e pelo menor desgaste abrasivo nas arestas de corte. O ACR contribuiu para o aumento a resistência ao cisalhamento do titânio, dificultando o corte e aumentando significativamente a força de avanço.

Palavras-chave: Furação, Juntas híbridas compósito-metal, Fator de delaminação, Força de avanço.

ABSTRACT

Hybrid composite-metal stacks arise from the combination of fiber-reinforced polymers and metallic materials that allow their use in situations that require parts with low density and high resistance at high temperatures. Its manufacture and assembly depend on the drilling process, and damage caused by the process can reduce its resistance. Furthermore, due to their different materials (composite and metal), the drilling presents challenges related to the quality of the hole. In this sense, the study aims to evaluate the effect of cooled compressed air (CCA) and high-speed cutting (HSC) on the finish hole drilling in the hybrid composite-metal stacks. Firstly, the influence of the combination of several factors using aluminum alloy Al 2124 was analyzed at two levels: joint type (Al/FRP/Al or FRP/Al), composite type (CFRP or CFRP), tool geometry (118° or 130°), and feed rate (0.02 or 0,08 mm/rev), with the presence and absence of CCA, applying low cutting speed (40 m/min) and HSC (220 m/min). It was noted that different reinforcement and joint types significantly impacted the delamination of composite materials, CCA showed a tendency to decrease defects, and the combined effect between HSC and CCA did not considerably affect the quality of the holes; it allows the use of HSC without harming the hybrid stack. Posteriorly, the effect of HSC and ACR on the GFRP/Ti-6Al-4V single joint at a low feed rate was investigated to verify the characteristics of the hole drilled in the glass-fiber-reinforced composite. The results showed that HSC does not significantly impact the thrust force and delamination of GFRP. Despite having no significant effect, CCA reduced the hole roundness error and GFRP delamination. The low cutting speed favored the hole wall roughness in the metallic sheet due to the reduced adhesion of Ti-6Al-4V on the tool and the lower abrasive wear on the cutting edges. The CCA increased the shear strength of Ti, making cutting difficult and significantly increasing the thrust force.

Keywords: Drilling, hybrid composite-metal stacks, delamination factor, thrust force.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	1
1.1	Objetivos	4
1.2	Justificativa	5
1.3	Originalidade	6
1.4	Contribuições	6
1.5	Estrutura do Trabalho	7
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	8
2.1	Força de Avanço	9
2.1.1	Força de avanço na furação de FRP	11
2.1.2	Força de avanço na furação de Al e Ti	12
2.1.3	Força de avanço na furação de juntas híbridas	14
2.2	Delaminação em Materiais Compósitos	16
2.3	Efeitos Térmicos	22
2.4	Desgastes, Avarias e Mecanismos de Falha da Broca	24
2.4.1	Falhas na broca durante a furação de FRP	25
2.4.2	Falhas na broca durante a furação de Al e Ti	26
2.4.3	Falhas na broca durante a furação de juntas híbridas	27
2.5	Morfologia dos Cavacos	29
2.6	Rebarbas em Materiais Metálicos	31
2.7	Desvios Dimensionais e Geométricos	34
2.7.1	Desvios na furação de FRP e metais	34
2.7.2	Desvios na furação de juntas híbridas	36
2.8	Rugosidade da Parede dos Furos	38
2.9	Ferramentas de Corte	39
2.10	Aplicação de Meios Lubrificador-refrigerantes	44
2.10.1	Furação de FRP	45
2.10.2	Furação de Al e Ti	48
2.10.3	Furação de juntas híbridas	50
3	PROPOSIÇÃO DA TESE	53

4	MATERIAIS E MÉTODOS	56
4.1	Materiais	56
4.2	Máquinas e Equipamentos	60
4.2.1	Aplicação de radiografia por raios-X.....	62
4.2.2	Medição da Delaminação.....	63
4.2.3	Medição de Rugosidade dos Furos	64
4.2.4	Avaliação por Microscopia Eletrônica de Varredura e sonda EDS.....	64
4.2.5	Medição da Circularidade.....	65
4.3	Planejamento Experimental	66
4.3.1	Furação de juntas FRP/Al e Al/FRP/Al.....	66
4.3.2	Furação da junta GFRP/Ti	69
5	RESULTADOS E DISCUSSÕES	71
5.1	Efeito de HSC e ACR na Furação de Juntas FRP/Al e Al/FRP/Al	71
5.1.1	Força de avanço e fator de delaminação ajustado.....	71
5.1.2	Rugosidade média e circularidade dos furos	80
5.1.3	Avaliação do estado das ferramentas.....	85
5.1.4	Otimização	86
5.2	Efeito de HSC e ACR na Furação da Junta GFRP/Ti.....	90
5.2.1	Força de avanço e fator de delaminação ajustado.....	91
5.2.2	Rugosidade média e circularidade dos furos	99
5.2.3	Análise do estado da ferramenta.....	102
6	CONCLUSÕES	104
6.1	Sugestões para Trabalhos Futuros	106
7	REFERÊNCIAS.....	107
	APÊNDICES	126
A.1	Especificações dos Tecidos Utilizados nos Compósitos	126
A.2	Certificado de Calibração da MMC usada na Medição da Circularidade dos Furos..	128

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1	Elementos estruturais no A350 XWB utilizando polímeros reforçadas com tecidos de fibra de carbono pré-impregnados M21E [Karatat, 2018; M'Saoubi et al., 2015].	2
Figura 2.1	Forças atuantes no processo de furação [Klocke, 2011].	10
Figura 2.2	Força de avanço em função: (a) do avanço; (b) da rotação [Wang et al., 2015].	11
Figura 2.3	Evolução da força de avanço em função do: (a) avanço; (b) velocidade de corte [Zhu et al., 2017].	13
Figura 2.4	Evolução do desgaste de flanco (a) e força de avanço (b) durante a furação da junta híbrida CFRP/AA7075 para ambas ferramentas [D'Orazio et al., 2017].	15
Figura 2.5	Delaminação na furação de FRP: (a) entrada da broca; (b) saída da broca [Aamir et al., 2019; Faraz et al., 2009].	17
Figura 2.6	Imagens ilustrando a delaminação no entorno dos furos em (a) GFRP [Sorrentino et al., 2018]; (b) CFRP [Davim et al., 2007].	17
Figura 2.7	Variáveis para cálculo de fator de delaminação ajustado [Davim et al., 2007].	19
Figura 2.8	Exemplo de correlação entre delaminação e posição angular da borda do furo em CFRP T800M21 utilizando $v_c = 100$ m/min e $f = 0,05$ mm/volta [Ramirez et al., 2014].	21
Figura 2.9	Influência dos parâmetros de corte na temperatura da ferramenta [Weinert e Kempmann, 2004].	23
Figura 2.10	Temperatura de corte vs. rotação e avanço durante a furação de juntas CFRP/Al [Wang et al., 2015].	24
Figura 2.11	Imagens MEV para as arestas de core das brocas antes e depois da furação a entrada da camada do CFRP durante a furação de juntas CFRP/Ti [Wang et al., 2014].	29
Figura 2.12	Cavacos típicos na furação de junta simples CFRP/Ti: (a) cavaco do CFRP; (b) cavaco do Ti [Xu e El Mansori, 2017].	30
Figura 2.13	Formação típica de rebarbas no processo de furação de chapas metálicas [Aurich et al., 2009].	32

Figura 2.14	Influência dos parâmetros de furação no diâmetro da entrada e na saída dos furos em CFRP e liga de Ti [Qi et al., 2021].	37
Figura 2.15	Parâmetros de influência no desempenho do processo de furação de materiais compósitos [Aamir et al., 2019].	40
Figura 2.16	Geometrias de furação utilizadas na furação de CFRP: (a) helicoidal; (b) escalonada; (c) “Brad & Spur”; (d) reta (Dagger); (e) de entalhe (<i>slot</i>); (f) de impacto (<i>core/saw</i>) [adaptado de Aamir et al., 2019]; (g) multiangular [Raj e Karunamoorthy, 2016].	41
Figura 2.17	Broca PCD: (a) lascamento na quina da ferramenta convencional aplicando avanço elevado; (b) Ferramenta modificada com design K-land aplicado nas arestas de corte [Garrick et al., 2007].	42
Figura 2.18	Broca helicoidal com ângulo de ponta de dois estágios (120° e 180°) para furação de Ti/CFRP/Al [Kuo et al., 2014].	43
Figura 2.19	Superfície da parede interna nos primeiros furos para $v_c = 50$ m/min and $f = 0.025$ mm/volta [Hoffmann et al., 2021].	46
Figura 2.20	(a) Desgaste no processo de furação à seco e com emulsão; (b) Influência das condições de refrigeração sobre a força de avanço [Weinert e Kempmann, 2004];	47
Figura 2.21	Rugosidade média para furos em diferentes materiais com fluido em abundância [Shyha et al., 2011].	52
Figura 3.1	Fatores que afetam a qualidade da furação de juntas híbridas compósito-metal.	54
Figura 4.1	Fluxograma de atividades associadas ao trabalho para avaliação das hipóteses.	56
Figura 4.2	Fabricação do FRP: (a) corte do tecido de fibra de carbono “prepreg” utilizado na fabricação do CFRP; (b) montagem da bolsa de vácuo; (c) estufa para a realização do ciclo térmico de cura.	57
Figura 4.3	Moldagem em bolsa de vácuo: (a) sequência de montagem dos elementos do processo de laminação; (b) tecidos e componentes utilizados na montagem; (c) ciclo de cura.	58
Figura 4.4	Configuração experimental geral e métodos de avaliação.	60
Figura 4.5	Suporte para realização dos furos nas juntas e aplicação do ACR.	61

Figura 4.6	Medição de radiografia por raios-X: (a) emissor de radiação; (b) sensor digital.	63
Figura 4.7	Pontos de interesse na verificação de raios-X: (a) visão geral da região delaminada; (b) pontos de verificação detalhada; (c) projeção binária no Matlab.	64
Figura 4.8	Aquisição de dados de rugosidade média: (a) perfilômetro e apalpador; (b) exemplo de medição na saída do furo da junta composta (Etapa 2).	65
Figura 4.9	Medição de circularidade dos furos: (a) software Geopack utilizado no procedimento; (b) pontos de medição utilizados para a verificação do desvio.	66
Figura 4.10	Configuração experimental e análises realizadas.	67
Figura 4.11	Fatores de interesse e variáveis de saída da experimentação 2 (furação da junta híbrida GFRP/Ti).	70
Figura 5.1	Gráfico dos efeitos principais sobre a força de avanço.	72
Figura 5.2	Gráfico dos efeitos principais sobre F_{da}	74
Figura 5.3	Gráfico dos efeitos principais para o F_{da} na interação com ACR.	76
Figura 5.4	Imagens dos furos: (a) aspecto superficial do compósito no furo 43 (junta simples); (b) radiografia do compósito no furo 43 (junta simples); (c) aspecto superficial do alumínio no furo 64 (junta composta); (d) aspecto superficial do compósito no furo 64 (junta composta); (e) radiografia do compósito no furo 64 (junta composta).	77
Figura 5.5	Aspecto superficial do CFRP via MEV: a) furo 43 (aumento 30x); b) furo 43 (aumento 100x); c) furo 43 (aumento 500x); d) furo 64 (aumento 30x); e) furo 64 (aumento 100x); f) furo 64 (aumento 500x).	78
Figura 5.6	Aspecto superficial do FRP via MEV: a) furo 3 (aumento 30x); b) furo 3 (aumento 500x); c) furo 3 (aumento 1000x); d) furo 50 (aumento 30x); e) furo 50 (aumento 500x); f) furo 50 (aumento 1000x).	79
Figura 5.7	Gráfico dos efeitos principais sobre a rugosidade média.	80
Figura 5.8	Comparativo por MEV da rugosidade superficial e das irregularidades na entrada dos furos 59 e 10 na entrada da chapa de alumínio.	82
Figura 5.9	Gráfico dos efeitos principais sobre a circularidade do furo no metal.	83
Figura 5.10	Gráfico dos efeitos principais sobre a circularidade dos furos no compósito.	84
Figura 5.11	Broca 85C após ser utilizada na experimentação e verificação com EDS.	85
Figura 5.12	Broca 86C após ser utilizada na experimentação e verificação com EDS.	86

Figura 5.13	Análise por MEV na saída do GFRP: (a) comparativo entre os furos 3 (OTM 1) e 10 (OTM 4); (b) comparativo entre os furos 5 (OTM 2) e 7 (OTM 3).....	89
Figura 5.14	Aspecto superficial na entrada e na saída de furos realizados na junta GFRP/Ti.	91
Figura 5.15	Comportamento da força de avanço durante a furação da junta GRFP/Ti com $v_c = 220$ m/min (H1) e $v_c = 40$ m/min (H2) sem ACR.....	92
Figura 5.16	Máxima força de avanço (F_f) durante a furação do GFRP/Ti e fator de delaminação ajustado (F_{da}) no compósito.....	93
Figura 5.17	Gráfico dos efeitos principais, da interação de dois fatores e de Pareto para $F_{f, comp}$ e $F_{f, metal}$	94
Figura 5.18	Gráfico dos efeitos principais, interação de dois fatores e de Pareto para F_{da} ..	95
Figura 5.19	Análise por MEV da qualidade dos furos na entrada da placa de GFRP.....	96
Figura 5.20	Análise por MEV do aspecto superficial dos furos na saída da placa de GFRP.	97
Figura 5.21	Análise por MEV da qualidade dos furos na entrada da chapa de Ti-6Al-4V..	98
Figura 5.22	Análise por MEV da qualidade dos furos na saída da chapa de Ti-6Al-4V.....	98
Figura 5.23	Valores de circularidade (em ambos os materiais) e rugosidade média (no metal) dos furos após a furação da junta simples GFRP/Ti.	99
Figura 5.24	Gráficos dos efeitos principais, da interação de dois fatores e de Pareto para t_{comp} e t_{metal}	101
Figura 5.25	Gráficos dos efeitos principais, da interação de dois fatores e de Pareto para R_a para o Ti-6Al-4V.....	102
Figura 5.26	Análise MEV/EDS da broca 86C após experimentação: (a) vista frontal; (b) EDS da aresta transversal; (c) desgaste de quina; (d) indicação de material aderido na aresta principal; (e) material aderido na superfície de folga; (f) região interna do canal da broca.....	103

LISTA DE TABELAS

Tabela 4.1	Composição química das ligas de titânio e alumínio (% massa).....	59
Tabela 4.2	Propriedades mecânicas das ligas de titânio e alumínio	59
Tabela 4.3	Especificações das brocas Sandvik®	61
Tabela 4.4	Configurações dos corpos de prova	66
Tabela 4.5	Níveis dos parâmetros de entrada utilizados nos experimentos.....	67
Tabela 4.6	Combinações para os parâmetros de entrada.	68
Tabela 4.7	Sequência de experimentos definida para a avaliação da composição GFRP/Ti.	70
Tabela 5.1	Valor-P para os efeitos principais e combinados para a F_f	71
Tabela 5.2	Efeitos principais e combinados para o fator de delaminação ajustado (F_{da})...	73
Tabela 5.3	Efeitos principais e combinados para a rugosidade (R_a).....	80
Tabela 5.4	Efeitos principais e combinados para a circularidade dos furos (t).	82
Tabela 5.5	Parâmetros otimizados e variáveis de saída testados.	87

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ACR	Ar comprimido refrigerado
ANOVA	Análise de variância (<i>Analysis of Variance</i>)
APC	Aresta postiça de corte
BBD	Projeto de experimentos de Box-Behnken
CFRP	Polímero reforçado com fibra de carbono (<i>Carbon-Fiber Reinforced Polymer</i>)
CVD	Deposição química em fase vapor (<i>Chemical Vapor Deposition</i>)
DLC	Filme fino de carbono com características próximas às do diamante (<i>Diamond Like Carbon</i>)
DOE	Projeto de experimentos (<i>Design of Experiments</i>)
EDS	Espectroscopia por energia dispersiva de raios-X
FRP	Polímero reforçado com fibras (<i>Fiber Reinforced Polymer</i>)
FEM	Método de elementos finitos (<i>Finite Element Method</i>)
GFRP	Polímero reforçado com fibra de vidro (<i>Glass-Fiber Reinforced Polymer</i>)
GLARE	Laminado metal-fibra de vidro (<i>Glass Reinforced Fiber-Metal Laminate</i>)
HPC	Fluido de corte em alta pressão
HSC	Alta velocidade de corte (<i>High speed cutting</i>)
HSS	Aço-rápido (<i>High-Speed Steel</i>)
LN ₂	Nitrogênio líquido
MEV	Microscopia eletrônica de varredura
MMC	Máquina de medição por coordenadas
MQL	Mínima quantidade de lubrificação
OTM	Otimização
PCD	Diamante policristalino (<i>Polycrystalline Diamond</i>)
PVD	Deposição física em fase vapor (<i>Physical Vapor Deposition</i>)
UD	Unidirecional
WC	Carbeto de tungstênio
XRD	Difração por raios-X (<i>X-Ray Diffraction</i>)

LISTA DE SÍMBOLOS

Gregos

α	Ângulo de folga [°]
φ	Ângulo de hélice [°]
σ	Ângulo de ponta [°]
γ	Ângulo de saída [°]
ψ	Ângulo de aresta transversal [°]

Latinos

A_o	Área danificada [mm ²]
A_{max}	Área correspondente ao diâmetro máximo [mm ²]
ca	Condição de arrefecimento
cj	Junta composta
ct	Tipo de compósito
D_o	Diâmetro nominal [mm]
D_{max}	Diâmetro máximo da zona danificada [mm]
f	Avanço por volta [mm/volta]
F_d	Fator de delaminação
F_{da}	Fator de delaminação ajustado
F_p	Força passiva [N]
F_c	Força de corte [N]
F_f	Força de avanço [N]
$F_{f, metal}$	Força de avanço no metal [N]
$F_{f, comp}$	Força de avanço no compósito [N]
jt	Tipo de junta
K_s	Pressão específica de corte [N/mm ²]
L_e	Comprimento de amostragem [mm]
L_m	Comprimento de avaliação [mm]
M_t	Momento Torçor [N·m]
R^2	Coefficiente de determinação [%]
R_a	Desvio médio quadrático do perfil de rugosidade [μm]

R_q	Rugosidade média quadrática [μm]
R_t	Altura total do perfil de rugosidade [μm]
R_z	Altura máxima do perfil de rugosidade [μm]
sj	Junta simples
$t_{,comp}$	Circularidade do furo no compósito [μm]
$t_{,metal}$	Circularidade do furo no metal [μm]
T_g	Temperatura de transição vítrea [$^{\circ}\text{C}$]
tt	Tipo da ferramenta
$Valor-P$	Probabilidade de erro máxima
v_c	Velocidade de corte [m/min]

1 INTRODUÇÃO

Atualmente, as juntas multimateriais são muito utilizadas em diversos campos da Engenharia, sobretudo na indústria aeronáutica, automobilística e naval [Bhagwat et al., 2017; Liu et al., 2012]. Nesses setores industriais chegam a ser realizados 40 milhões de furos por ano; destes, 80% são realizados de forma manual, antecedendo a instalação de fixadores mecânicos (rebites e parafusos) e precisando atender aos requisitos de forma e posicionamento destes elementos. Na indústria aeronáutica, investe-se muito tempo no processo de montagem de estruturas, pois muitas das partes internas e externas são fixadas utilizando-se rebites [Houseman et al., 2004; Kihlman, 2005; Zou e Liu, 2011].

Os multimateriais são comumente empregados em várias partes de aeronaves e são formados por diferentes configurações, entre compósitos poliméricos reforçados com fibras de carbono (CFRP) e vidro (GFRP), e chapas metálicas de ligas de titânio (ex. Ti-6Al-4V) ou de alumínio (ex. Al 2024). Os polímeros reforçados com fibras (FRP) são formados pela combinação de fibras leves, rígidas e resistentes (carbono, vidro, aramida), combinadas pela matriz polimérica resistente à fadiga (termoplásticos ou termofixos) [Miracle e Donaldson, 2001; Raja et al., 2015].

As características de resistência à fadiga, resistência à corrosão, baixa densidade e alta rigidez do CFRP permitem fabricar componentes que contribuem para o aumento da eficiência energética, redução dos custos, redução de manutenção e aumento da capacidade de carga de aeronaves. A boa compatibilidade química com o titânio é outro fator significativo para a sua utilização. Para o Airbus A350 XWB (Figura 1.1) a utilização do CFRP representa 52% do peso da aeronave [Soutis, 2005; Wang et al., 2015]. Dentre as peças fabricadas, estão pequenos componentes como portas de acesso e peças da fuselagem [Karatas e Gokkaya, 2018; Khashaba et al., 2010; M'Saoubi et al., 2015; Wang et al., 2015; Zitouni et al., 2010]. Em aeronaves militares, o CFRP é apropriado devido ao alto módulo de elasticidade e pela alta resistência, como o JSF e F35, onde os polímeros reforçados com fibra de carbono respondem por 40% da massa estrutural e cobrem em torno de 70% da superfície da aeronave [Soutis, 2005]. O Boeing B-767 possui cerca de 30% de sua estrutura em compósitos. O Boeing B-787 (Dreamliner), que possui capacidade de transporte de 200 a 250 passageiros, utiliza 15 a 20% menos combustível comparado a outras aeronaves de mesmo porte, e foi o primeiro jato comercial a ser fabricado com a maior parte de suas estruturas primárias (57%) composta por materiais compósitos [Hocheng e Tsao, 2005; Shyha et al., 2010]. Na indústria automotiva, a aplicação de CFRP

contribuiu significativamente com a melhoria da eficiência veicular [Feito et al., 2014; Gaugel et al., 2016; Marques et al., 2009].

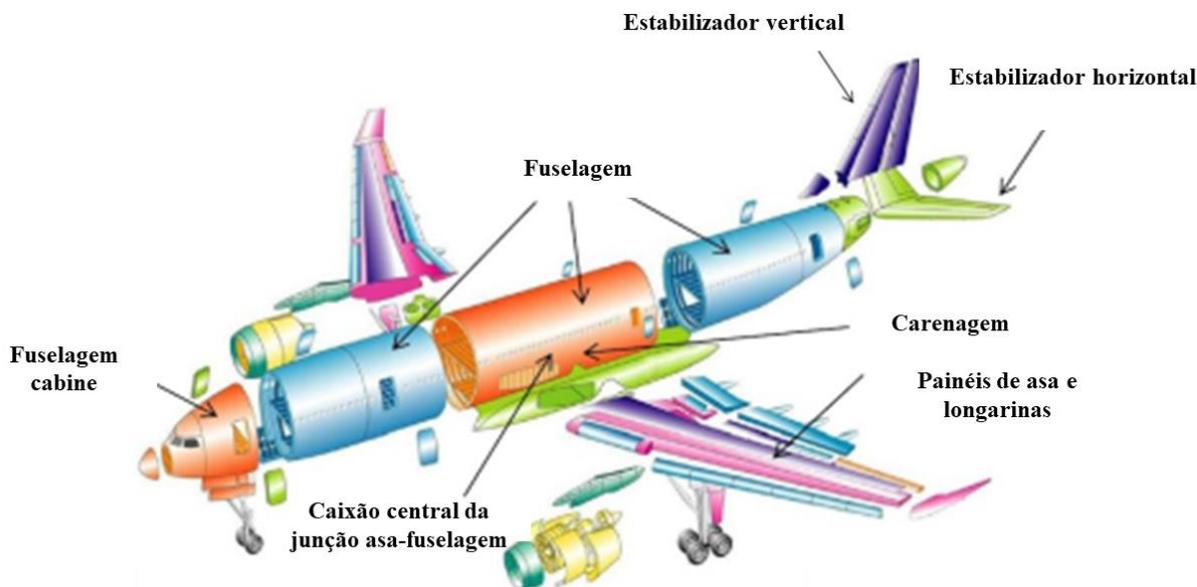


Figura 1.1 – Elementos estruturais no A350 XWB utilizando polímeros reforçados com tecidos de fibra de carbono pré-impregnados M21E [Karatat, 2018; M'Saoubi et al., 2015].

As fibras de vidro utilizadas na fabricação do GFRP possuem dentre suas características a baixa condutividade térmica e boas características para aplicações de isolamentos elétricos. Podem ser utilizadas matrizes poliméricas termorrígidas ou termofixas, dependendo das características desejadas para o compósito [Khashaba et al., 2010; Shackelford, 2015]. O GFRP é largamente utilizado em aplicações na indústria aeronáutica, energia, defesa, automotiva e naval [Kumar e Sing, 2017], aplicados em componentes estruturais, substituindo ligas metálicas, contribuindo com a redução de peso, como em carenagens, fuselagens, portas de compartimento de cargas, portas de trem de pouso e compartimento de passageiros, aplicados pelas principais fabricantes de aeronaves [Bhagwat et al., 2017; Liu et al., 2012; Soutis, 2005].

Os materiais metálicos representam uma significativa parte dos componentes utilizados na indústria aeronáutica, principalmente os com alta relação resistência/peso, como as ligas de titânio e alumínio. No entanto, a sua usinabilidade é afetada pelas propriedades mecânicas, tornando complexo seu processamento [Giasin et al., 2016; Zhu et al., 2020].

A utilização de ligas de titânio, primariamente, foi difundida na indústria aeronáutica, sendo amplamente utilizada da fabricação do caça F-22 e no Boeing 787, participando de 14% da estrutura total da aeronave. Essas ligas podem ser aplicadas em turbinas a gás e em partes

não estruturais devido às suas excelentes propriedades (ótima relação peso específico/resistência mecânica, alta resistência à compressão e à tração, baixa densidade, alta resistência à fadiga e alta resistência à corrosão) [Hale, 2006; Zhang et al., 2008]. A escolha da liga Ti-6Al-4V para aplicações aeronáuticas se deve às suas características físico-químicas (resistência às baixas temperaturas e facilidade na junção de materiais soldados), pela sua compatibilidade com CFRP, e por apresentar boas características mecânicas para espessuras entre 0,20 e 25,4 mm [AMS 4911R, 2019]. O titânio puro possui excelente resistência à corrosão; as ligas- α e quase- α contêm estabilizadores e excelente resistência à fluência; as ligas α - β representam 70% do titânio usado (ex. Ti-6Al-4V); as ligas- β possuem grande quantidade de estabilizadores, tem alta resistência e maior densidade [Yang e Liu, 1999].

As ligas de alumínio possuem cerca de 1/3 da densidade e 1/3 do módulo de elasticidade dos aços, alta condutividade térmica e elétrica, alta resistência a corrosão, baixo ponto de fusão, ótima neutralidade magnética, alto coeficiente de atrito, ótima conformabilidade e a possibilidade de suportar vários tipos de tratamentos superficiais [Santos et al., 2016]. Estudos demonstraram a importância de algumas ligas de alumínio com características para aplicações aeronáuticas, principalmente pela baixa densidade, contribuindo diretamente para o menor consumo de energia [Dave et al., 2016; Yeganefar et al., 2019; Zhu et al., 2020]. Exemplos de algumas ligas de alumínio aplicadas na fabricação de aeronaves: 7050-T745: componentes estruturais de asas [Tang et al., 2009; Yeganefar et al., 2019]; 7075-T6: eixos e engrenagens [Abish et al., 2018; Ng et al., 2006]; 2024-T3: painéis de revestimentos de fuselagens [Giasin et al., 2016; Huda et al., 2009; Kurt et al., 2008]; 2014 / 2124: câmaras de alta temperatura [Alniak e Bedir, 2003]. No tratamento térmico de endurecimento por envelhecimento termomecânico, a deformação plástica ocorre antes, durante ou após o processo térmico.

De forma geral, juntas híbridas compósito-metal são formadas por placas de CFRP, GFRP, titânio, alumínio etc., dispostas em multicamadas. A sua utilização origina-se nas limitações que cada material apresenta. Assim, começaram a ser obtidas características intermediárias, com diferentes configurações como, por exemplo, GFRP/Al, CFRP/Ti, Al/CFRP/Ti, dentre outras [Xu et al., 2016] amplamente utilizadas na indústria aeronáutica moderna [Xu e El Mansori, 2016]. As partes que formam as juntas híbridas podem ser unidas por adesão (colagem), através de fixadores mecânicos (pinos, rebites ou parafusos), ou fazendo a composição entre os dois métodos. Neste sentido, as junções formadas pela combinação dos dois métodos apresentam melhores resultados (maior capacidade de resistir aos esforços locais) que aquelas somente coladas ou rebitadas.

A furação de juntas híbridas compósito-metal é um grande desafio devido aos diferentes defeitos que ocorrem no compósito e no metal, muitos destes relacionados com a força de avanço. No compósito, tem-se a delaminação e os danos na matriz causados pelos gradientes térmicos do processo; no metal, os cavacos gerados no processo, as rebarbas na saída dos furos e as falhas geradas na ferramenta. Além disso, há a dificuldade em selecionar parâmetros de corte e ferramentas adequadas para garantir a alta qualidade do furo em termos dimensionais e a integridade de todos os materiais constituintes [Akhil et al., 2017; Ben et al., 2012; Fu et al., 2018b; Krishnaraj et al., 2010; Ramirez et al., 2014; Turki et al., 2014; Xu e El Mansori, 2017].

A utilização das altas velocidades de corte (HSC) apresenta potencial de melhoria na qualidade dos furos, tanto em termos microgeométricos quanto macrogeométricos. Essa característica deve-se ao impacto do baixo avanço (f), incluindo a menor força de avanço (F_f), características do HSC [Khashaba et al., 2010; Santos et al., 2016]. No entanto, em situações onde ocorre o aumento das taxas de deformação, podem ocorrer aumentos das forças de usinagem [Hamade et al., 2005].

Normalmente, os meios convencionais de lubrificação-refrigeração, como fluido de corte em abundância são utilizados no processo de furação, principalmente em materiais metálicos. No entanto, o processo pode gerar danos ao meio ambiente, além de prejudicar a saúde dos trabalhadores [Abish et al., 2018; Santos et al., 2016; Xu e El Mansory, 2017]. Meios alternativos de refrigeração das juntas híbridas compósito-metal, como a criogenia, podem tornar-se interessantes, principalmente se acompanhar a tendência de reduzido impacto ambiental. Outra alternativa seria a utilização do ar comprimido refrigerado (ACR), que favorece a diminuição dos defeitos dos furos em materiais compósitos, como a delaminação e a rugosidade [Hoffmann et al., 2021] e nos materiais metálicos pode melhorar a rugosidade e a circularidade [Santos et al., 2016; Ahmed et al. 2016].

1.1 Objetivos

O objetivo geral é analisar o efeito do ar comprimido refrigerado e da alta velocidade de corte no acabamento dos furos em juntas híbridas compósito-metal Al/FRP/Al, Al/FRP e GFRP/Ti. Os objetivos específicos são:

- Avaliar o impacto das diferentes variáveis de entrada (ar comprimido refrigerado (ACR), velocidade de corte, avanço, tipo de junta e tipo de ferramenta) sobre as variáveis de saída (força de avanço, delaminação, circularidade e rugosidade) relacionadas ao acabamento dos

furos de juntas híbridas compósito-metal FRP/Al e Al/FRP/Al. Para o GFRP/Ti, os efeitos do ACR e da velocidade de corte.

- Verificar as condições gerais das ferramentas utilizadas no processo (desgastes, avarias).
- Otimizar as variáveis de entrada para a obtenção de furos com alta qualidade.
- Realizar recomendações acerca das variáveis que influenciam sobre o acabamento dos furos, permitindo a melhor escolha dos métodos de fabricação.

1.2 Justificativa

Após a avaliação do estado da arte, algumas características podem ser destacadas e consideradas como lacunas, revertendo-as em oportunidades para estudos relativos ao processo de furação em juntas híbridas.

Considerando os estudos sobre compósitos poliméricos reforçados com fibras (CFRP e GFRP), apenas 5% estudaram o GFRP isoladamente ou em juntas simples [Faria, 2007; Giasina e Sooberanis, 2017; Malacarne, 2019; Kumar e Sing, 2017; Silva, 2015]. Vale salientar que diversos estudos abordam a furação do GLARE (*Glass Reinforced Fiber-Metal Laminate*), que é um compósito formado por diversas camadas muito finas de metal, intermeadas por fibra de vidro, e unidos por uma matriz polimérica (resina epóxi). Contudo, poucos trabalhos utilizam o GFRP em placas “empilhadas” metal-compósito-metal [Devitte et al., 2021]. Desta forma, fica evidente a necessidade de trabalhar com maior ênfase nesta área de pesquisa, sendo uma oportunidade de inovação para contribuir para o desenvolvimento tecnológico deste segmento.

Cerca de 21% dos trabalhos abordaram a furação em altas velocidades de corte [Krishnaraj et al., 2012; Kuo et al., 2014; Rawat and Attia, 2009]. A HSC, combinada com baixo avanço (f), apresenta potencial de melhoria na qualidade dos furos, tanto em termos macro quanto microgeométricos.

Outra característica pouco explorada nas pesquisas sobre furação de juntas híbridas (apenas 5%) é a utilização do ar comprimido refrigerado (ACR) como fator de contribuição para a redução dos defeitos nos compósitos (p. ex. delaminação e rugosidade) [Hoffmann et al., 2021] e nos materiais metálicos (raros estudos abordam a utilização do ACR na furação, tanto em juntas simples quanto em compostas). Por se tratar de uma técnica ambientalmente amigável, a geração do ACR por tubo de vórtice não gera outros resíduos para descarte e não promove a contaminação das peças [Abish et al., 2018]. No entanto, outros métodos de resfriamento também são encontrados, como a criogenia. Porém, ainda possui custo elevado,

além de riscos associados a segurança e manuseio, além de possíveis contaminações e corrosões [Abish et al., 2018; Dixit et al., 2012].

Assim, dentro deste cenário de utilização de multimateriais na indústria (aeronáutica, automobilística e naval) e a grande dependência dos processos de fabricação (usinagem) e montagem (rebitagem), torna-se importante a realização de estudos que comprovem e identifiquem as melhores condições de furação de juntas híbridas compósito-metal. Com isto, busca-se aperfeiçoar o processo através da investigação dos parâmetros de corte e da utilização de meios de arrefecimento com o intuito de reduzir o dano gerado pelo calor sem prejudicar o meio ambiente, garantir uma qualidade aceitável para os furos onde serão instalados fixadores mecânicos e diminuir os danos para a junção.

1.3 Originalidade

Dentre todos os trabalhos observados na furação de juntas híbridas simples e compostas, a sua combinação com altas velocidades de corte (HSC) e o impacto de meios lubrificantes ambientalmente amigáveis na qualidade do processo, não foram encontradas informações sobre a aplicação de ar comprimido refrigerado (ACR) em diferentes configurações de juntas e sobre o impacto destas configurações e dos tipos materiais (compósitos) utilizados no acabamento dos furos gerados. Além disso, apesar do potencial de redução da força de avanço e dos defeitos de delaminação nos materiais compósitos, a HSC não foi abordada nessas combinações de fatores.

Esta carência serviu de incentivo para o desenvolvimento de um trabalho que pudesse se destacar pela sua originalidade na análise comparativa da qualidade dos furos gerados em juntas compostas (Al/CFRP/Al e Al/GFRP/Al) e simples (CFRP/Al, GFRP/Al e GFRP/Ti), aliada à potencialidade da aplicação de ACR e HSC. Esta possibilidade pode resultar em furos com melhor acabamento pela redução dos efeitos térmicos através de uma técnica ambientalmente amigável, diminuição da força de avanço e minimização da delaminação, além de resultar em maior produtividade.

1.4 Contribuições

Almeja-se que os resultados deste trabalho contribuam direta ou indiretamente para uma melhor compreensão acerca dos defeitos macro e microgeométricos gerados nas superfícies dos

furos realizados nos materiais compósitos e metálicos, os efeitos das diferentes composições de juntas e as consequências da aplicação de ACR e HSC no processo de furação das mesmas.

Conceitos e metodologias sobre as características de acabamento dos furos realizados nas juntas híbridas em suas diferentes configurações poderão servir de base para o entendimento dos fundamentos acerca do tema. A partir das relações estabelecidas entre ACR e HSC, pode-se formar uma base de conhecimento através de um método apropriado e devidamente descrito, observando as diferentes configurações de juntas e estabelecendo estatisticamente quais fatores são significativos para as variáveis de resposta do processo, permitindo melhores escolhas durante a furação dessas juntas híbridas, efetivando os parâmetros de corte para o processo com a utilização de um sistema de refrigeração ambientalmente amigável, econômico, visando a obtenção de ganhos significativos de produtividade, sem danos significativos sobre o acabamento dos furos, i.e., preservando sua integridade.

1.5 Estrutura do Trabalho

Visando atingir os objetivos, a tese foi organizada conforme os itens que se seguem:

- Capítulo 1. Introdução e contextualização, apresentando os principais objetivos e a justificativa do trabalho.
- Capítulo 2. Fundamentação teórica com o estado da arte sobre o processo de furação em juntas híbridas compósito-metal.
- Capítulo 3. Proposição da tese em três etapas: (1) revisão da literatura, (2) estudo e otimização da furação de juntas multimateriais (FRP e Al 2124) e (3) análise da furação da junta simples GFRP/Ti com base nos resultados da Etapa 2.
- Capítulo 4. Descrição dos materiais, equipamentos e métodos utilizados, e os procedimentos experimentais aplicados nas etapas dois e três.
- Capítulo 5. Análise e discussão dos resultados.
- Capítulo 6. Principais conclusões do estudo com base nos resultados alcançados e sugestões para trabalhos futuros.
- Referências. Lista dos trabalhos que subsidiaram o referencial teórico e a discussão dos resultados apresentadas na tese.
- Apêndices.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

O estado da arte busca apresentar trabalhos que analisam os problemas associados ao processo de furação em materiais poliméricos reforçados com fibras, chapas metálicas e juntas híbridas compósito-metal. Estes materiais são aplicados em diversas estruturas e reparos nos diferentes setores industriais (aeronáutica, automobilística e naval) e serve para subsidiar as atividades relativas ao desenvolvimento da tese.

A baixa usinabilidade de juntas híbridas compósito-metal se deve à composição de materiais com diferentes propriedades mecânicas e características físico-químicas. Assim, a geração de furos precisos, combinado com o menor desgaste possível da ferramenta, são fundamentais para obter a melhor qualidade dos furos [Matsumura e Tamura, 2013; Park et al., 2014; Xu et al., 2016]. Para exemplificar, estudos apontam que a força de avanço (F_f) aumenta durante a furação da parte metálica quando comparado a furação da parte FRP, bem como o aumento do avanço (f) promove um aumento da rugosidade [Isbilir e Ghassemieh, 2013]. Aliás, o avanço (f) é o parâmetro de corte mais significativo quando analisados os defeitos durante o processo de furação de FRP. No entanto, a velocidade de corte (v_c) também influencia a delaminação, a qualidade do furo (circularidade e rugosidade), e a força de avanço na furação dos compósitos [Abrão et al., 2008; Durão et al., 2012; Krishnaraj et al., 2010; Shyha et al., 2009; Tan et al., 2016]. Além de f e v_c , o ângulo de ponta (σ) também afeta as variáveis de saída [Akhil et al., 2017; Lazar e Xirochakis, 2011; Velaga e Cadambi, 2017; Wu et al., 2012].

De forma geral, polímeros reforçados por fibras são considerados de difícil usinabilidade, devido à sua estrutura heterogênea, pelos materiais distintos em sua composição, resultando em trincas, arrancamento de fibras e falhas na superfície dos furos [Kılıçkap et al., 2010; Abraão et al., 2007]. Estas falhas não estão apenas relacionadas com a sua estrutura, mas pela interação com os diferentes métodos de fabricação [Orifici et al., 2008; Katnam et al., 2013]. As características do CFRP e do GFRP levam as falhas de usinagem, como a delaminação, rebarbas e falhas superficiais, além de elementos nocivos à saúde humana, como a poeira insalubre [Abrate et al., 1992; Karatas et al., 2018; Xu e El Mansori, 2017]. Estas características são atribuídas a alta dureza e abrasividade [Chebby et al., 2016; Tsao et al., 2007] assim como os efeitos sobre as ferramentas utilizadas no processo de furação [Faraz et al., 2009; Iliescu et al., 2010; Liu et al., 2012].

O erro dimensional, a cilindridade, a rugosidade e a formação das rebarbas devem ser considerados na avaliação da qualidade do furo em ligas de titânio. A caracterização

subsuperficial decorre do aparecimento de microfissuras, deformações plásticas, zonas afetadas pelo calor e tensões residuais [Kim e Ramulu, 2004; Zhang et al., 2008]. Devido à sua baixa usinabilidade, as ligas de titânio exigem a utilização de velocidades de corte reduzidas no processo de furação. A redução da vida útil das ferramentas aumenta os custos associados ao processo devido ao impactando nas propriedades mecânicas do material e no desgaste das ferramentas de corte [Dornfield et al., 1999; Sharif e Rahim, 2007; Yang e Liu, 1999].

Diferentemente dos materiais compósitos, o alumínio caracteriza-se pela remoção de material pelo plano de cisalhamento. Quando materiais dúcteis (como o alumínio) são usinados, uma grande área de contato cavaco-ferramenta é formada e a taxa de espessura do cavaco é alta, o que contribui para aumentar as forças de corte, potência de usinagem e geração de calor, além de gerar cavacos longos e fibrosos, como acabamento superficial ruim. No processo de furação, o principal problema está associado a adesão do alumínio nas arestas principais de corte, promovendo a geração das arestas postiças de corte (APC), resultando em desgastes prematuros da ferramenta e impactando no acabamento dos furos. Por outro lado, a resistência ao cisalhamento é relativamente baixa e, mesmo com grandes áreas de contato cavaco-ferramenta, a usinagem do alumínio é considerada relativamente fácil [Zitoune et al., 2016; Bierman et al., 2015; Santos et al., 2016]

2.1 Força de Avanço

As forças geradas durante o processo de furação são subdivididas em: forças de corte (F_c), forças de avanço (F_f) e forças passivas (F_p). As forças F_c (movimento de corte) correspondem à resistência do material ao corte e são responsáveis pelo momento torçor (M_t). As forças F_f no sentido axial (movimento de avanço) estão relacionadas com a resistência à penetração da broca, principalmente da aresta transversal. As forças F_p , no sentido radial, atuam sobre as arestas principais, mas se anulam por estarem simétricas ao eixo principal [Klocke, 2011]. A Figura 2.1 ilustra o esquema das forças. Outra característica relacionada à F_f é o seu aumento de acordo com a penetração da ponta da broca, isto é, a área de contato cresce gradativamente, aumentando a resistência ao corte; quando finaliza a passagem da ponta (ou das arestas principais), a força se estabiliza [Guibert et al., 2009].

A furação concentra os esforços de corte em dois segmentos: os esforços de compressão (relacionado com a força de avanço F_f) e de torção (relativo ao momento torçor M_t). Os esforços de compressão, presentes no centro da broca, são ampliados devido ao efeito da velocidade nula na região. Uma consequência da velocidade de corte nula ($v_c = 0$) no centro da ferramenta é a

formação da aresta postíca de corte (APC) na região, principalmente na furação de metais dúcteis (e.g., ligas de titânio e alumínio), muitas vezes, inevitável.

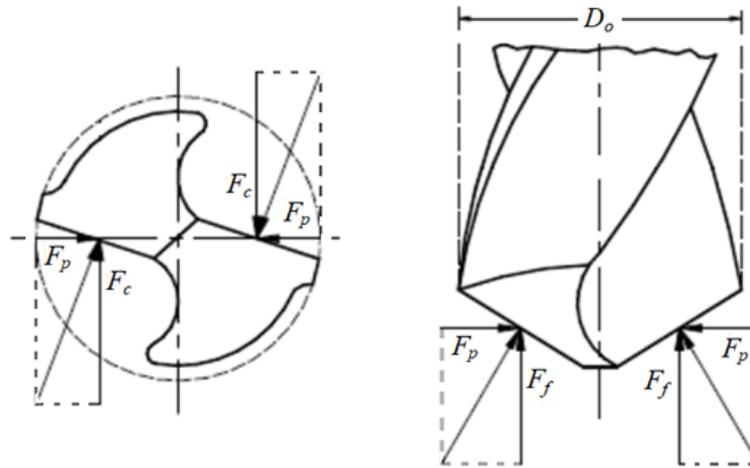


Figura 2.1 – Forças atuantes no processo de furação [Klocke, 2011].

Outra característica da região central é o ângulo formado entre as arestas principais de corte (ângulo de ponta “ σ ”), que devem possuir comprimentos aproximados para o corte ser eficiente [Abhishek et al., 2014; Klocke, 2011; Xu et al., 2016; Diniz, 2014]. Devido a isto, a aresta transversal fica responsável por grande parte da distribuição da F_f produzida na furação. Nesta situação, procura-se diminuir a aresta transversal para que este efeito seja reduzido. O tipo de afiação e o ângulo de saída (γ) buscam beneficiar a remoção do cavaco. Para isto, outro fator importante é o ajuste destes ângulos para melhorar a remoção dos cavacos e não ocorrer a obstrução dos canais e a consequente quebra da broca. A geometria da ferramenta contribui para o efeito autocentrante, buscando minimizar os desvios geométricos associados ao processo [Klocke, 2011; Raj e Karunamoorthy, 2016; Srinivasan et al., 2017; Stemmer, 2005].

A força de avanço é gerada devido ao movimento de avanço da broca e pelo deslocamento lateral do material durante o processo de furação, gerando regiões com diferentes esforços devido à ação de corte. Assim, durante o movimento de avanço da broca, ocorre o aumento da F_f após uma estabilidade e, finalmente, reduz-se a zero, quando ocorre o rompimento do material. Além disto, na furação de materiais metálicos, ocorre um pico no valor da F_f ao final do processo devido às rebarbas e aos cavacos presentes, obstruindo os orifícios da broca [Zhu et al., 2017].

As variáveis de entrada que comumente influenciam a força de avanço (F_f) e o momento torçor (M_t) são os parâmetros de corte (v_c e f) [Wang et al., 2015], a geometria da broca

[Khashaba et al., 2010] e o seu desgaste [Liu et al., 2012]. A força de avanço (F_f) e o momento torçor (M_t) aumentam com o diâmetro da broca e com o avanço (f) devido ao aumento da área da seção transversal de corte [Krishnaraj et al., 2010; Khashaba et al., 2010; Kumar e Sing, 2017]. Poucos pesquisadores investigaram o efeito da geometria da ferramenta na furação de materiais poliméricos reforçados com fibras, assim como muitas das geometrias modificadas são complexas para o processo de reafiação [Hocheng e Tsao, 2006; Isbilir e Ghassemieh, 2013; Shyha et al., 2009]. O desgaste da ferramenta tem impacto maior em estágio inicial, após, progride linearmente sobre F_f [Faraz et al., 2009].

2.1.1 Força de avanço na furação de FRP

Algumas estratégias para a redução da força de avanço (F_f) em materiais compósitos, como redução do avanço (f), aumento da velocidade de corte (v_c) e geometria adequada da broca podem gerar bons resultados em relação à delaminação [Marques et al., 2009; Rawat e Attia, 2009]. Davim et al., 2005, estudaram a furação de GFRP e observaram um aumento na F_f com o incremento do avanço. Além disso, f foi o parâmetro de corte mais influente em relação à força de avanço e pressão específica de corte. Wang et al., 2015, avaliaram a furação da junta CFRP/Al. Nesta avaliação, observa-se que F_f é quase proporcional para f em ambos (CFRP e Al) e a força de avanço durante a furação do Al é cerca de duas vezes maior que a F_f durante a furação do CFRP (Figura 2.2a). Adicionalmente, F_f aumenta ligeiramente com o aumento da rotação (n) (Figura 2.2b).

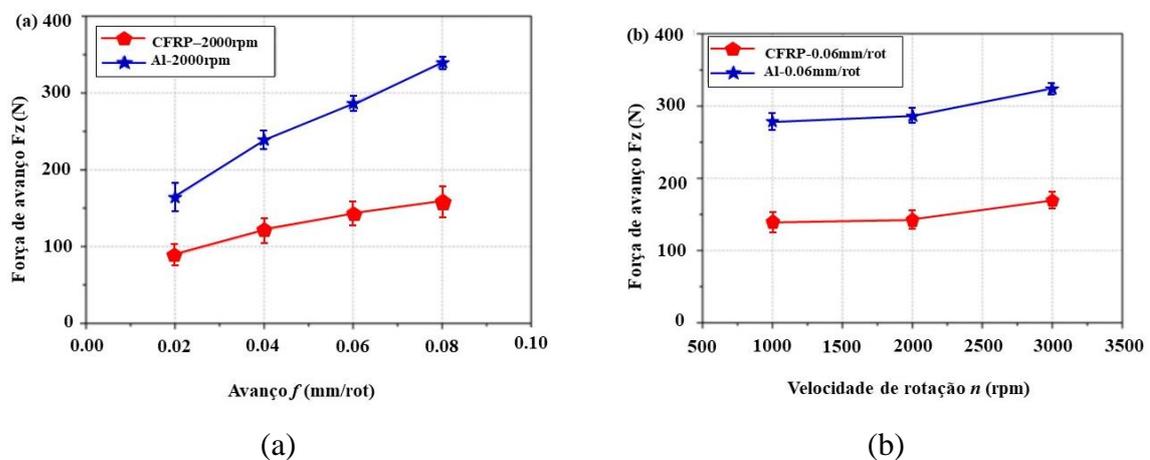


Figura 2.2 – Força de avanço em função: (a) do avanço; (b) da rotação [Wang et al., 2015].

Na furação de GFRP utilizando brocas de aço-rápido (HSS) e metal-duro (WC-Co) e diferentes geometrias e condições de corte (v_c e f) distintas, Faria, 2007, notou que a gramatura do tecido da fibra de vidro, a geometria da ferramenta e o avanço (f) causaram a maior influência sobre a força de avanço (F_f) na furação de GFRP. Abrão et al., 2008, analisaram o processo de furação de GFRP utilizando quatro brocas com 5 mm de diâmetro, diferentes geometrias e materiais, e condições de corte (v_c e f) distintas. Dentro da faixa de corte avaliada, os autores concluíram que a força de avanço (F_f) e a delaminação aumentaram consideravelmente com o aumento de f . No entanto, o aumento de v_c sobre F_f foi insignificante, mas afetou moderadamente a área danificada. A menor F_f e a menor região delaminada foram registradas usando a broca de metal-duro “Brad & Spur” cuja geometria permite que a ação de corte aconteça do diâmetro externo para o interno da ferramenta, de forma semelhante a uma ferramenta de trepanação. Já a maior F_f foi registrada na furação com a broca helicoidal de metal-duro ($\sigma = 150^\circ$, $z = 3$), porém resultando na segunda menor delaminação. Isso sugere que a relação entre F_f e delaminação não é direta. Além disso, o desgaste abrasivo da broca helicoidal de HSS causou elevação da F_f .

Merino-Pérez et al., 2016, verificaram a força de avanço (F_f) e o momento torçor (M_t) gerados na furação de placas de CFRP com diferentes tipos de fibras de carbono e resinas epóxi, utilizando brocas de metal-duro sem revestimento. A velocidade de corte (v_c) foi significativa sobre o M_t máximo gerado nas placas de CFRP com módulos de elasticidade e cisalhamento altos. Os autores justificam isso pelo impacto negativo da taxa de deformação sobre a capacidade da matriz de transferir a carga para o reforço, explicando assim a diminuição do M_t com o aumento de v_c . Outro fator é a temperatura na região de corte, que em alguns casos atingiu valores superiores à da degradação da resina, contribuindo para a diminuição de F_f .

2.1.2 Força de avanço na furação de Al e Ti

As particularidades do processo de furação de Al e Ti envolvem a adesão de material na broca em baixas velocidades de corte [Zitouné et al., 2016], o desgaste prematuro da ferramenta devido à baixa usinabilidade do Ti, e a necessidade de utilizar maior velocidade de corte na furação do Al que, por conseguinte, gera maiores temperaturas no processo [Santos et al., 2016]. Dentre os aspectos associados à furação de ligas de titânio destaca-se a força de avanço (F_f), que, quando comparada a furação do aço, alcança valores três vezes maiores [Veiga et al., 2013; Yang e Liu, 1999]. Contudo, as ligas de alumínio chegam a 70% dos valores alcançados para os aços [Santos et al., 2016]. Assim, a dificuldade de processamento do titânio aumenta,

gerando consequências como o aumento da vibração, aumento das falhas nas brocas e a redução da sua vida útil. Como consequência, promove a elevação da quantidade de calor devido ao aumento da temperatura na interface ferramenta-peça [Veiga et al., 2013; Yang e Liu, 1999].

Portanto, busca-se obter forças menores na furação para reduzir possíveis vibrações no eixo-árvore que possam comprometer o acabamento do furo. Falhas prematuras nas brocas podem ocorrer devido aos grandes esforços gerados. O momento torçor (M_t) em níveis elevados indica um maior atrito entre a ferramenta e a peça, aumentando a quantidade de calor na interface. Tensões elevadas são geradas na região do corte devido à alta resistência do Ti em se deformar, mesmo em temperaturas elevadas [Ezugwu e Wang, 1997; Kim e Ramulu, 2007; Veiga et al., 2013; Yang e Liu, 1999; Zhang et al., 2008].

Alguns fatores impactam os esforços durante a furação das ligas de titânio. O avanço (f) afeta significativamente o processo, aumentando força de avanço (F_f) e o momento torçor (M_t) devido ao aumento da área da seção transversal de corte [Zhu et al., 2017]. No entanto, menores níveis de f podem produzir maiores valores de F_f devido ao maior tempo de corte, o qual promove o aumento da taxa de desgaste da ferramenta de corte [Li et al., 2014; Prasanna et al., 2014; Ramulu et al., 2001; Sharif e Rahim, 2007]. A Figura 2.3 representa a evolução da F_f registrada na furação a seco da liga Ti-6Al-4V em função de f e da velocidade de corte (v_c).

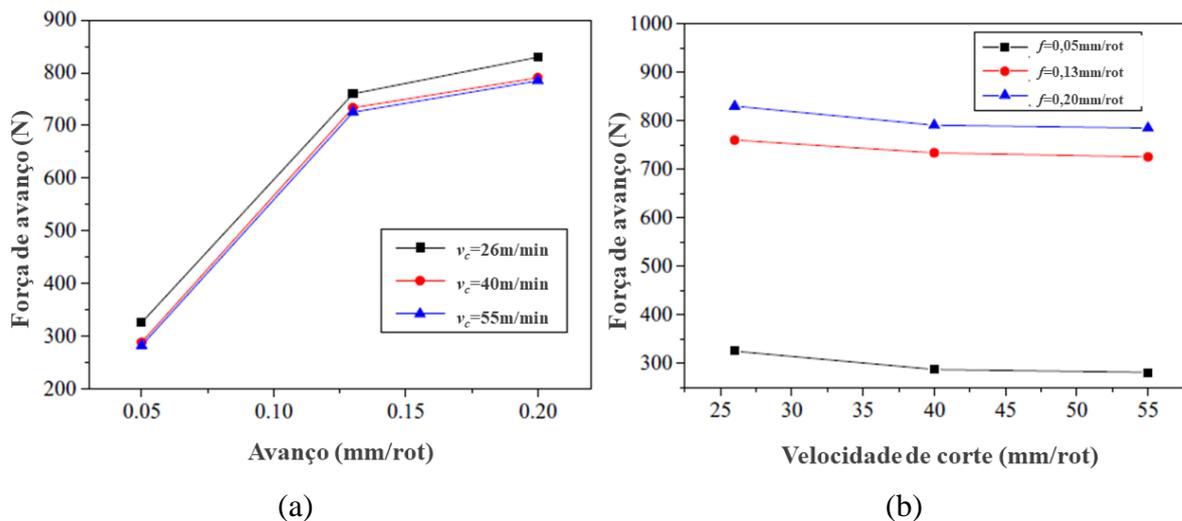


Figura 2.3 – Evolução da força de avanço em função do: (a) avanço; (b) velocidade de corte [Zhu et al., 2017].

O crescimento da F_f com o aumento de f não é linear para toda a faixa de valores utilizada, pois o incremento do avanço promove o aumento da área da seção transversal de

corte, mas também a diminuição da pressão específica de corte K_s (Figura 2.3a). Por outro lado, com o aumento de v_c , tem-se a diminuição de K_s (Figura 2.3b) [Klocke, 2011]. Em ambos os casos, a diminuição de K_s está associada com a elevação da temperatura na região de corte, resultando no amolecimento do material e conseqüente redução da F_f [Zhu et al., 2017].

Com relação à geometria da broca, o aumento do ângulo de hélice (ϕ) diminui F_f e M_t . Ferramentas de metal-duro tem desempenho superior às ferramentas de aço-rápido na furação do Al e Ti, pois maiores velocidades de corte podem ser empregadas, reduzindo a adesão [Kim e Ramulu, 2004]. Além disso, a utilização de fluidos lubrificantes aplicados internamente à broca também diminuem F_f e M_t [Li et al., 2014; Ramulu et al., 2001; Sharif e Rahim, 2007].

2.1.3 Força de avanço na furação de juntas híbridas

Krishnaraj et al., 2010, analisaram a furação da junta simples CFRP/Al e o impacto do avanço (f), da velocidade de corte (v_c) e do diâmetro da ferramenta (D_o) na força de avanço (F_f) e no momento torçor (M_t) utilizando o planejamento experimental fatorial completo. Concluíram que f e D_o têm maior influência sobre F_f e M_t , enquanto que v_c tem pouca. Puderam comparar os resultados com a análise via redes neurais artificiais, as quais mostraram menores erros associados quando comparado a outros métodos de previsão, como a análise de regressão multivariável.

Devitte et al., 2021, avaliaram a furação da junta composta Al/GFRP/Al combinando tipo de broca de metal-duro, velocidade de corte e avanço em três níveis cada. Os autores concluíram através da ANOVA que o avanço (f) foi o parâmetro de maior impacto sobre a força de avanço (F_f), e tipo de broca influenciou significativamente a F_f . A velocidade de corte (v_c) não influencia significativamente na F_f e apenas a combinação entre f e v_c mostrou-se significativa para a delaminação na saída dos furos.

Zitoun e al., 2016, analisaram a furação da junta simples CFRP/Al utilizando diferentes brocas de cones duplos com diferentes ângulos, diferentes espessuras das chapas de alumínio e de parâmetros de corte, avaliando a qualidade de furação e a força de avanço (F_f). Constataram que as brocas multiangulares tiveram melhor desempenho quando comparadas às brocas helicoidais normais. Outra característica importante observada é a modificação da força de separação de camadas ser função da espessura da chapa de alumínio, contribuindo para o atraso na delaminação na saída dos furos. Porém, em chapas com menor espessura (menores que 1 mm), sua influência não é significativa na F_f . Já um alto valor de F_f causa a separação entre o CFRP e Al, e contribui para o acúmulo de cavacos de alumínio na interface, adesão de

Al na aresta de corte da broca e danos na superfície do CFRP. Segundo os autores, esta é uma falha comum do processo. Ainda houve a influência do menor avanço (0,01mm/rot) na geração de cavacos curtos, preferíveis nesta operação, contribuindo inclusive para menores valores de rugosidade tanto no Al quanto no CFRP.

D’Orazio et al., 2017, analisaram a força de avanço, o desgaste das ferramentas e a delaminação na furação de juntas compostas CFRP/Al/CFRP utilizando brocas helicoidais com revestimento DLC e TiAlN. Concluíram que o lascamento, o arredondamento de quina e o desgaste de flanco por abrasão são as falhas dominantes na broca com revestimento DLC; para a broca com revestimento TiAlN, a abrasão. Comparativamente, a taxa de desgaste abrasivo mostrou-se menor para as brocas com DLC (Figura 2.4a), ocorrendo aumento progressivo de F_f com o aumento do desgaste (Figura 2.4b). Com a maior velocidade de corte, houve aumento de temperatura na região de corte, ocasionando diminuição na resistência ao cisalhamento do CFRP e redução da F_f atuante nesta região. Os mesmos efeitos foram observados para a delaminação em função do aumento do desgaste. A tendência de diminuição do diâmetro do furo com o aumento do desgaste foi confirmada, ficando evidente a diferença entre os valores observados (maior diâmetro no início do furo, associada ao atrito da broca com o alumínio; e menor na saída, associada a melhor orientação da ferramenta conforme a operação se desenvolvia). Além disso, tem-se os efeitos da temperatura gerada pela abrasão e outras potencializadoras das deformações térmicas.

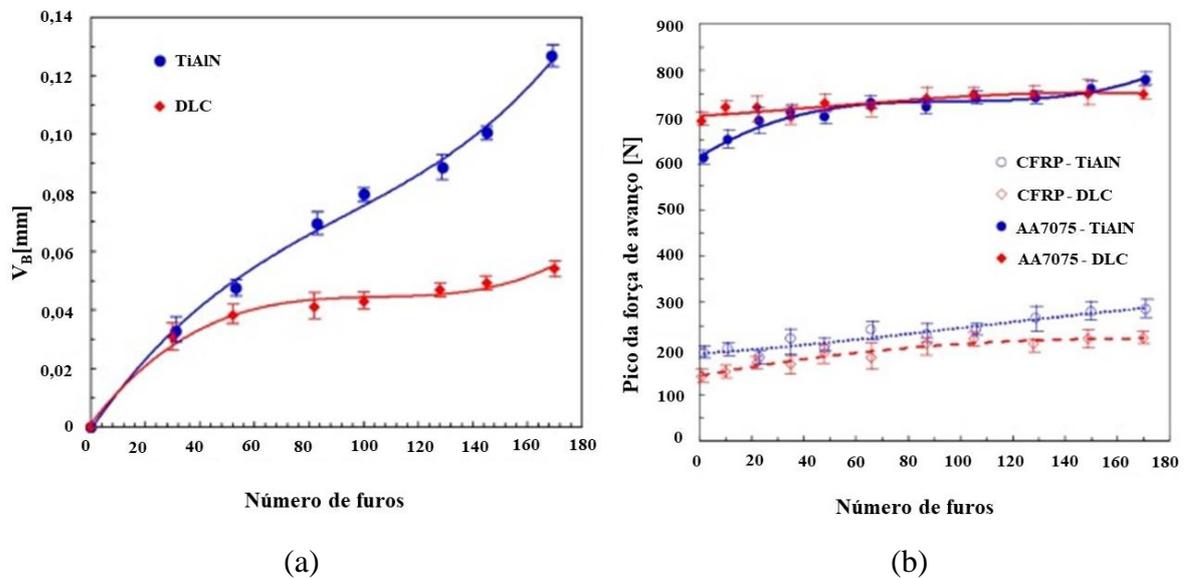


Figura 2.4 – Evolução do desgaste de flanco (a) e força de avanço (b) durante a furação da junta híbrida CFRP/AA7075 para ambas ferramentas [D’Orazio et al., 2017].

Isbilir and Ghassemieh, 2013b, analisaram, além de outras variáveis de resposta, a força de avanço (F_f) na furação de juntas simples CFRP/Ti utilizando brocas de metal-duro com revestimento de TiAlN. Constataram na furação dos materiais separadamente que o aumento do avanço (f) e da velocidade de corte (v_c) causaram um incremento de F_f na furação de CFRP, enquanto os aumentos de f e v_c causaram, respectivamente, crescimento e redução de F_f na furação de Ti-6Al-4V. No primeiro caso (CFRP) houve aumento de 47% em F_f após 15 furos; no segundo (Ti), o aumento foi de apenas 7,5%. Entretanto, após 15 furos na furação da junta híbrida, F_f aumenta 57% no CFRP e 38% no Ti. O motivo do incremento seria a combinação de dois mecanismos de desgaste (abrasão pelo CFRP e adesão pelo Ti) durante a furação da junta, o que pode ter acelerado o desgaste da broca.

2.2 Delaminação em Materiais Compósitos

Dentre os defeitos associados a furação de compósitos poliméricos reforçados com fibras (FRP), o mais impactante e significativo é a delaminação. Alguns fatores podem estar associados aos defeitos de delaminação, como o avanço (f), mesmo com diferentes níveis de velocidade de corte (v_c) e geometria da broca, devido ao aumento da força de avanço (F_f) durante o processo [Davim et al., 2007; Liu et al., 2012]. Alguns pesquisadores associaram o aumento da delaminação com o aumento de v_c [Davim et al., 2007; Sardinãs et al., 2006] enquanto outros observaram a sua diminuição [Khashaba et al., 2010]. A F_f e o tamanho da área danificada são consequências dos parâmetros de processo, assim como a observação da F_f mínima (ou força crítica F_{cr}) para ocorrer delaminação [Liu et al., 2012; Tsao e Hocheng, 2005].

A delaminação pode ser classificada como o descolamento das camadas adjacentes do compósito laminado resultando na diminuição da resistência mecânica e na fadiga das peças usinadas. Em furação, a delaminação ocorre na entrada do furo, onde as camadas superiores do material são puxadas no contato com a extremidade da broca (*peel-up*) e na saída do furo, provocada pela força compressiva da ponta da ferramenta (*push-out*) nas camadas inferiores do laminado (Figura 2.5); isso impacta diretamente na qualidade dos furos realizados. A Figura 2.6 mostra as morfologias de delaminações típicas na periferia dos furos realizados em GFRP e CFRP [Aamir et al., 2019; Faraz et al., 2009]. A delaminação é fortemente afetada pela geometria da ferramenta e pelos parâmetros de corte utilizados. Isto representa 60% dos defeitos associados às rejeições de peças durante a etapa de montagem de estruturas, afetando diretamente o aspecto superficial do entorno dos furos, e reduzindo a vida em serviço dos componentes [Abrão et al., 2008; Durão et al., 2012; Linbo et al., 2003].

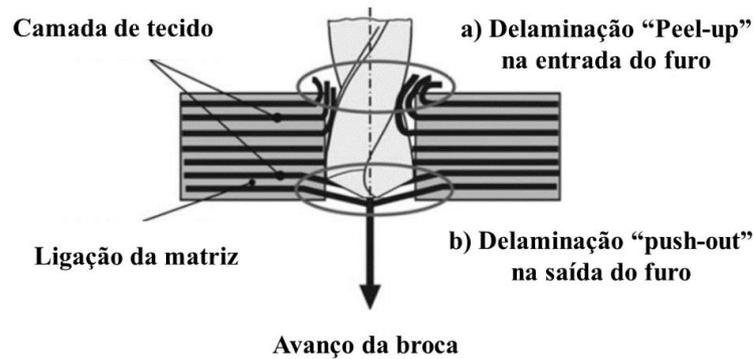


Figura 2.5 – Delaminação na furação de FRP: (a) entrada da broca; (b) saída da broca [Aamir et al., 2019; Faraz et al., 2009].

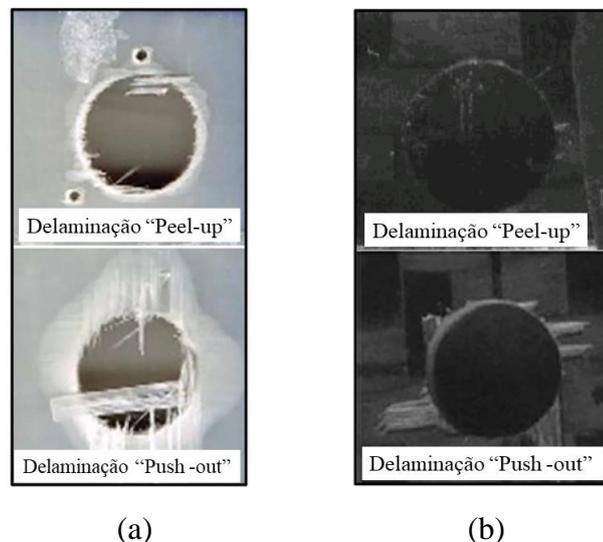


Figura 2.6 – Imagens ilustrando a delaminação no entorno dos furos em (a) GFRP [Sorrentino et al., 2018]; (b) CFRP [Davim et al., 2007].

Uma das características da delaminação é a tendência a diminuição da integridade dos compósitos que, devido à natureza de sua formação, como anisotropia, heterogeneidade e resistência a abrasão, resultam no aumento da extração de fibras, fragmentação, difusão e degradação térmica, problemas que podem ocasionar falhas severas, bem como o aumento dos custos de processamento e montagem [Abhishek et al., 2014]. Assim, grande parte dos estudos sobre a furação de FRP baseia-se na redução da delaminação com a otimização dos parâmetros de corte (f e v_c), combinadas com a geometria de ferramenta, para reduzir o impacto das rejeições causadas pelos desvios na tolerância de montagem e na resistência e na diminuição da

deterioração e do desempenho a longo prazo devido aos problemas ligados à fadiga [Faraz et al., 2009; Gaitonde et al., 2008; Liu et al., 2012; Mishra et al., 2010].

Defeitos na superfície da parede dos furos podem ser afetados pela interação entre as arestas de corte da broca e a orientação das fibras do material usinado. Assim, a qualidade da usinagem é afetada, em parte, pelo diâmetro da broca, pela direção de orientação da fibra e pela direção da velocidade de corte (v_c). Quando estas direções são perpendiculares entre si ($\theta = 90^\circ$), observam-se danos relacionados principalmente à ruptura das fibras por flexão e cisalhamento, necessitando de maior energia para rompê-las. Quando as direções são paralelas ($\theta = 0^\circ$), ocorre o modo de ruptura dominante por compressão. Além disto, tem-se o aumento do momento torçor com o incremento do diâmetro da broca [Arola et al., 1996; Wang et al., 1995; Zitoune et al., 2005]. Analisar processos não-convencionais de usinagem, usinagem a altas velocidades, investigação da qualidade baseado nas forças críticas de delaminação, utilização de diferentes métodos de refrigeração, e aplicação de métodos alternativos de análise de delaminação são possibilidades de avanço tecnológico nessa área.

A delaminação de compósitos poliméricos reforçados com fibras é determinada após o processo de furação através do fator de delaminação unidimensional (F_d) calculado pela Equação (1) através da razão entre o diâmetro máximo D_{max} da área delaminada e o diâmetro nominal da ferramenta (D_o), enfatizando a contribuição das trincas na área danificada pelo processo de furação [Chen, 1997]. Outra definição comum reconhece o fator de delaminação bidimensional (F_a) como a proporção das áreas correspondentes (Eq. 2). Este modelo de delaminação apresenta uma medida mais precisa de delaminação, mas não leva em consideração a presença de microtrincas [Faraz et al., 2009]. O fator de delaminação ajustado (F_{da}), proposto por Davim et al., 2007, é determinado através da Equação (3), onde A_d é a área danificada pela delaminação. As variáveis são observadas na Figura 2.7. Com isto, pode-se comparar as características das ferramentas e a sua influência sobre os materiais analisados. Além disso, outros critérios diferentes para avaliar a delaminação induzida pela furação em compósitos foram desenvolvidos por pesquisadores distintos [Joshi et al., 2018; Mohan et al., 2007], também citados nos trabalhos de revisão de Aamir et al., 2019, e Geng et al. 2019.

O tamanho da delaminação induzida por furação foi amplamente relatado como relacionado à força de avanço (F_f) e acredita-se que haja uma força de avanço crítica (F_{cr}) abaixo da qual nenhuma delaminação ocorre (Eq. 4) [Hocheng et al., 1990]. A F_{cr} no início da delaminação por *push-out* pode ser usada como um guia eficaz na prevenção da delaminação. Por exemplo, a F_f ideal para nenhuma delaminação pode ser usada para controlar o avanço no

processo de furação visando maximizar a produtividade [Geng et al., 2019]. Quando a F_f real excede a F_{cr} no início da delaminação, geralmente observa-se uma aproximada correlação linear positiva entre a extensão da delaminação e a força de avanço [Faraz et al., 2009; Isbilir e Ghassemieh, 2013; Khashaba et al., 2010; Sorrentino et al., 2018].

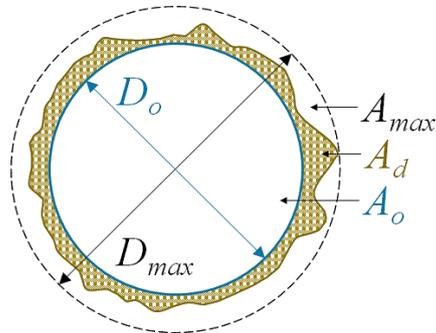


Figura 2.7 – Variáveis para cálculo de fator de delaminação ajustado [Davim et al., 2007].

$$F_d = \frac{D_{max}}{D_o} \quad (1)$$

$$F_a = \frac{A_{max}}{A_o} = \frac{D_{max}^2}{D_o^2} \quad (2)$$

$$F_{da} = F_d + \left(\frac{A_d}{A_{max} - A_o} \right) \cdot (F_d^2 - F_d) \quad (3)$$

$$F_{cr} = \pi \left[\frac{8}{3} \left(\frac{E \cdot G_{IC} \cdot h^3}{1 - \nu_{12}^2} \right) \right]^{\frac{1}{2}} \quad (4)$$

onde: E = Módulo de elasticidade (GPa); G_{IC} = tenacidade à fratura sob modo I; h = espessura não cortada (mm); ν_{12} = coeficiente de Poisson

Muitos esforços foram dedicados à modelagem da força de avanço crítica, descrita em detalhes por Geng et al., 2019, e Girot et al., 2017. No modelo de Girot et al., 2017, assumiu-se que o polímero reforçado com fibras era anisotrópico e modelou-se a força de avanço como um carregamento triangular distribuído associado a um ponto de carregamento adicional localizado no centro da broca. Supôs-se que a forma de delaminação era circular e que a mesma

se propaga em modo misto I (abertura) + II (cisalhamento), pois o FRP a ser furado está sujeito à força axial e à flexão. Apesar disso, poucos estudos elucidam a relação entre a delaminação e a F_f excedendo a F_{cr} , o que limita a aplicação prática de orientar a escolha das condições de corte na furação FRP [Geng et al., 2019]. Esta limitação é corrigida por Joshi et al., 2018, pela introdução de um fator de força no cálculo da delaminação F_{fa} (Eq. 5). O fator de força é definido pela razão entre a força de avanço máxima desenvolvida (F_{fmax}) e a força de avanço crítica (F_{cr}). O fator de força é adaptável para diferentes temperaturas de usinagem, pois tanto F_{fmax} quanto F_{cr} variam com a mudança de temperatura. Os autores concluíram na furação a seco de CFRP que F_{fa} tende a gerar valores mais próximos de F_{da} (Eq. 3), enquanto na furação criogênica (LN₂), F_{fa} prevê valores mais próximos de F_a (Eq. 2).

$$F_{fa} = \frac{1}{3} \frac{D_{max}}{D_o} + \frac{1}{3} \frac{D_{max}^2}{D_o^2} + \frac{1}{3} \frac{F_{fmax}}{F_{cr}} \quad (5)$$

A diminuição da tenacidade à fratura, devido à menor temperatura, promove a redução da F_{cr} necessária para causar a delaminação. Utilizando-se maiores v_c e f ocorre o aumento do atrito, favorecendo o aumento da temperatura e, por conseguinte, da F_{cr} .

Palanikumar et al., 2008, observaram na furação de GFRP uma redução na delaminação com o aumento da velocidade de corte (v_c). Os autores associaram esse efeito ao amolecimento da matriz causado por temperaturas mais altas geradas com o aumento de v_c ; conseqüentemente, menor delaminação foi observada. O efeito oposto ocorreu quando o avanço (f) foi aumentado. Malacarne et al., 2019, realizaram a otimização dos parâmetros de furação em GFRP aplicando brocas de aço-rápido com diferentes ângulos de ponta (σ). Concluíram que o parâmetro mais influente sobre o F_{da} é o avanço (f), e que o desvio dimensional do furo é amplamente afetado pelo ângulo σ . Faria, 2007, concluiu que a delaminação no furo de GFRP aumentou devido ao ângulo de ponta menor ($\sigma = 118^\circ$), ao aumento do desgaste da broca e ao incremento do avanço (f). Katiyar et al., 2016, verificaram a influência dos diferentes tipos de broca helicoidais nos danos causados pela furação de GFRP (extração de fibras, fissuras e delaminações). As menores falhas sobre as fibras e a menor degradação na matriz foram obtidos com a broca inteiriça de metal-duro. Além disso, os autores constataram que as falhas dependem de v_c , que, quando alta, tende a aumentar a temperatura, levando ao aumento de resíduos na superfície do furo.

Gaitonde et al., 2008, investigaram o impacto da alta v_c na furação de CFRP e concluíram que esta contribuiu para a redução de danos na entrada dos furos, e a combinação entre f e o ângulo de ponta da broca (σ) foi essencial para minimizar a delaminação. Durão et

al., 2012, analisaram a furação de CFRP com diferentes brocas (helicoidal, escalonada e “Brad & Spur”) e parâmetros de corte (v_c e f). Os resultados mostraram que baixo avanço (f) é o principal fator para a redução da delaminação, seguido pela geometria da broca (escalonada). Confirmaram que baixos avanços são adequados, pois reduzem a força de avanço (F_f) e, conseqüentemente, a área danificada ao redor do furo. Além disso, a aplicação de baixo f minimiza a perda de resistência mecânica da peça perfurada. Ramirez et al., 2014, realizaram a furação de CFRP com broca de metal-duro visando correlacionar o perfil de delaminação com a direção das fibras. Os autores evidenciaram as direções preferenciais para a ocorrência da delaminação, bem como de seu formato. A Figura 2.8 mostra a delaminação e o perfil da sua distribuição ao longo da periferia. Isso torna possível ajustar o projeto do compósito para aumentar a sua resistência nos sentidos de maior sollicitação.

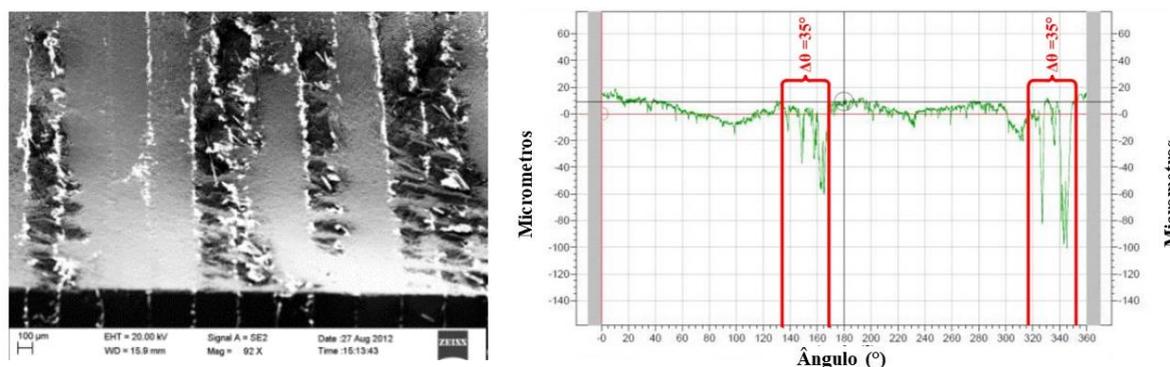


Figura 2.8 – Exemplo de correlação entre delaminação e posição angular da borda do furo em CFRP T800M21 utilizando $v_c = 100$ m/min e $f = 0,05$ mm/volta [Ramirez et al., 2014].

Isbilir e Ghassemieh, 2013, analisaram, dentre outras variáveis de saída, a delaminação na furação de juntas simples CFRP/Ti com brocas de metal-duro revestidas (TiAlN). Os autores observaram redução da delaminação do CFRP quando a furação ocorre no sentido CFRP \Rightarrow Ti. Além disso, esta estratégia causa menores danos, pois não tem os efeitos da adesão do Ti sobre a ferramenta e o favorecimento da evacuação dos cavacos.

Devitte et al., 2021, evidenciaram através de análise de variância (ANOVA) que o efeito da velocidade de corte não foi expressivo para o fator de delaminação na saída dos furos em juntas compostas Al/GFRP/Al. A interação entre avanço e velocidade de corte mostrou-se significativa para a delaminação na entrada dos furos. Na otimização, os menores valores de avanço (0,05 mm/volta), de velocidade de corte (20 m/min) e com a broca 85C ($\sigma = 118^\circ$) obtiveram os menores níveis de delaminação.

2.3 Efeitos Térmicos

Em virtude da baixa condutividade térmica dos compósitos FRP, as características duras e abrasivas do material do reforço causam maior atrito pelo contato ferramenta/peça, resultando no aquecimento da broca (que dissipa cerca de 90% do calor gerado nesta usinagem) e, por conseguinte, no seu maior desgaste. Todavia, o impacto do calor gerado sobre a degradação da matriz polimérica, que ocorre entre 150 °C e 250 °C, reduz a sua resistência térmica [Khashaba et al., 2010; Khashaba et al., 2013; Merino-pérez et al., 2016; Ramirez et al., 2014].

O módulo de elasticidade e a tensão de escoamento da resina epóxi diminuem com o aumento da temperatura. Além disso, a maior parte da resina epóxi geralmente não resiste a temperaturas acima de 250 °C. Se a temperatura na região de corte estiver além do limite permitido, as propriedades do material serão degradadas [Foreman et al., 2010]. Os danos gerados pelos gradientes térmicos induzidos no processo de furação contribuem para a diminuição da estabilidade da matriz, provocando a diminuição da resistência da fibra e redução dos esforços de furação [Khashaba et al., 2010; Khashaba, 2013; Merino-Pérez et al., 2016].

A temperatura geralmente atinge o valor máximo na saída da broca na furação de compósitos poliméricos reforçados com fibras [Ramirez et al., 2014; Weinert e Kempmann, 2004]. Isso prejudica ainda mais os danos na saída do furo [Ben et al., 2012] e as propriedades mecânicas dos componentes FRP usinados [Turki et al., 2014]. Além disso, a temperatura na região de corte varia quando os parâmetros de corte mudam. Ainda existe a possibilidade, com a utilização de fluido de corte, de ser absorvido pelo compósito e resultar em distorções dimensionais, acréscimo de massa, alterando suas propriedades mecânicas. Assim, a qualidade do processo de furação de FRP diminui com o aumento da temperatura [Ben et al., 2012; Khashaba, 2013; Sala, 2000; Weinert e Kempmann, 2004]. Efeitos térmicos são evidenciados quando se realiza furação a seco ou com mínima quantidade de lubrificação (MQL). Nestes casos, a precisão dos furos é afetada, pois tem-se maior dificuldade de remoção dos cavacos e aumento das deformações térmicas [Biermann e Iovkov, 2015; Neugebauer et al., 2012].

Weinert e Kempmann, 2004, aplicaram termopares na medição da temperatura durante a furação a seco de CFRP com brocas de metal-duro e observaram que o valor máximo atingiu 387 °C na saída do furo com 20 mm de comprimento usando $v_c = 180$ m/min e $f = 0,1$ mm/volta (Figura 2.9a). Aplicando $v_c = 180$ m/min e $f = 0,3$ mm/volta os valores de temperatura sobem rapidamente e estabilizam próximos de 370°C (Figura 2.9b). Os autores atribuem esta progressão da temperatura ao atraso no corte das primeiras camadas na furação com menor

avanço. Além disto, destacam que a temperatura não foi observada na superfície de contato, onde as temperaturas devem ser superiores.

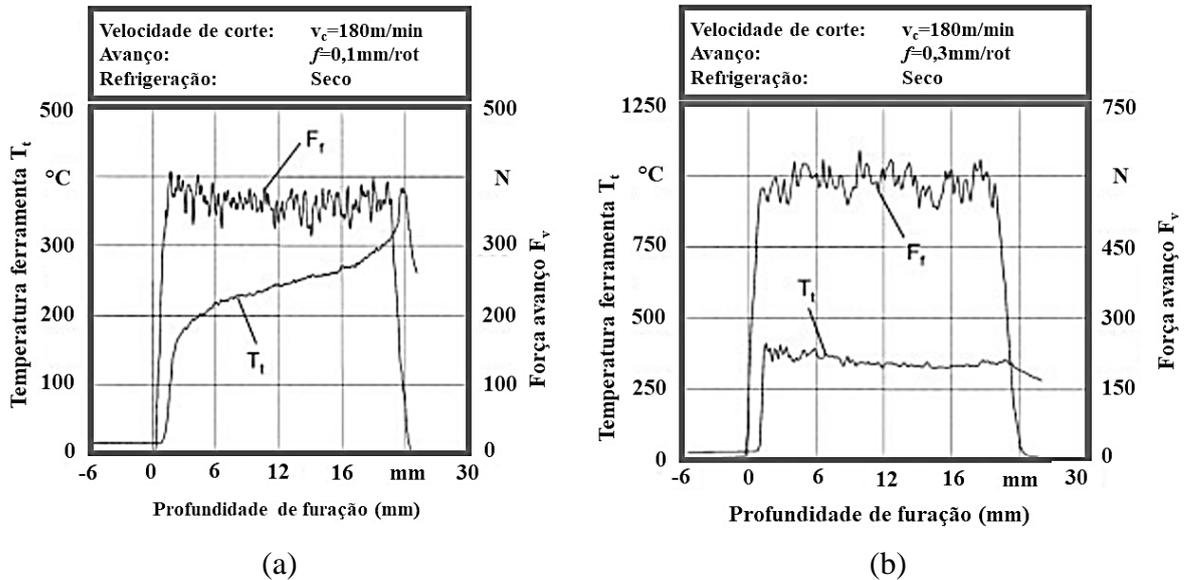


Figura 2.9 – Influência dos parâmetros de corte na temperatura da ferramenta [Weinert e Kempmann, 2004]

Com relação aos materiais metálicos, as temperaturas de corte podem influenciar as propriedades mecânicas das ligas de alumínio, gerar tensões residuais, causar erros de tolerância e promover aderências nas arestas de corte da broca [Nouari et al., 2003; Silva et al., 2009]. Cavacos mais longos são produzidas devido ao aumento da temperatura. Além disso, há uma interação química mais significativa entre o alumínio e o revestimento da ferramenta. À medida que a velocidade de corte aumenta, geralmente há aumento na taxa de deformação no plano de cisalhamento, aumentando a temperatura de furação [Kishawy et al., 2005; Rivero et al., 2006; Roy et al., 2009; Santos et al., 2016; Zaghbani e Songmene, 2009; Zhu et al., 2020; Zitoune et al., 2010]. No caso das ligas de titânio, a maior parte do trabalho de deformação plástica gerada na furação é convertido em calor, produzindo altas temperatura de processo, principalmente na região da interface ferramenta-peça, afetando a vida da broca. Este efeito está correlacionado com a baixa condutividade térmica do Ti, onde parte significativa do calor é absorvido pela broca, acelerando o seu desgaste (comparativamente, o calor absorvido pela broca na furação do aço é cerca de 50% menor). A capacidade do titânio em manter sua resistência com a temperatura elevada prejudica ainda mais a sua usinabilidade [Ezugwu e Wang, 1997; Li e Shih, 2007; Sharif e Rahim, 2007].

Entre os estudos conduzidos com o objetivo de avaliar os efeitos da temperatura na furação de juntas híbridas compósito-metal, Wang et al., 2015, investigaram a temperatura da furação da junta simples CFRP/Al usando brocas de metal-duro revestidas com PCD. A Figura 2.10 mostra o gráfico da temperatura de usinagem com a evolução da rotação (n) e do avanço (f) durante a furação da junta híbrida. Nota-se que a temperatura diminui com o aumento de f . Quando um menor f é empregado, o tempo de corte também é prolongado. Além disso, as fibras de carbono do CFRP atuam como partículas abrasivas que aceleram o atrito e o desgaste da broca. Portanto, mais calor é gerado no processo de furação e a temperatura será maior. Assim, baixa rotação e alto avanço promovem menor temperatura de furação.

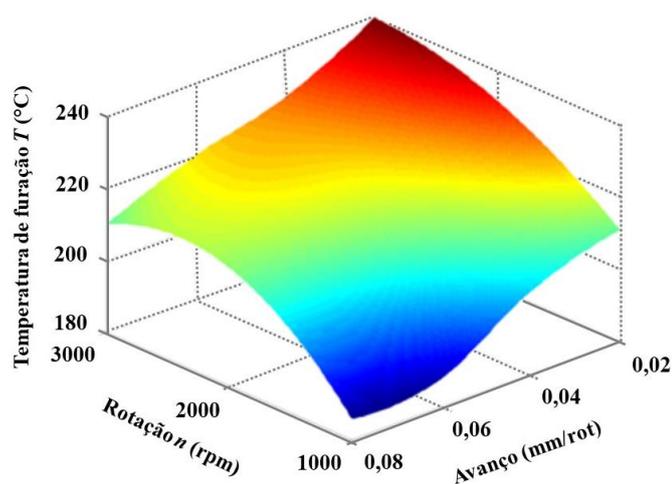


Figura 2.10 – Temperatura de corte vs. rotação e avanço durante a furação de juntas CFRP/Al [Wang et al., 2015].

2.4 Desgastes, Avarias e Mecanismos de Falha da Broca

O desgaste promovido pelo efeito do atrito durante o processo de furação dos diferentes materiais, como os compósitos reforçados com fibras (CFRP e GFRP) o alumínio e o titânio são gerados por diferentes mecanismos, como a adesão e a abrasão, e tem como consequência a fragilização da ferramenta durante o processo de corte, além dos efeitos sobre a qualidade superficial dos furos. Felizmente, com a identificação destas avarias, pode-se buscar soluções, como o aumento da rigidez e as corretas caracterizações dimensionais e geométricas das ferramentas [Liu et al., 2012; Ramirez et al., 2014].

2.4.1 Falhas na broca durante a furação de FRP

O desgaste da broca promove aumentos na força de avanço (F_f) e no momento torçor (M_t), que afetam a delaminação e prejudicam a qualidade dos furos em CFRP [Park et al., 2011; Ramirez et al., 2014]. A afinidade química do carbono com os elementos químicos presentes na ferramenta de metal-duro pode enfraquecer o ligante (Co) dos grãos de carboneto de tungstênio (WC), causando lascamentos e fraturas nas arestas de corte. As falhas na broca e as alterações nos parâmetros de corte interferem na qualidade dos furos, tanto em relação aos erros geométricos como na rugosidade da parede. Em consequência, os desgastes promovem um aumento dos esforços e, conseqüentemente, da delaminação [Liu et al., 2012; Murphy et al., 2002; Park et al., 2011; Ramirez et al., 2014; Rawat e Attia, 2009].

A abrasão é principal mecanismo de desgaste de brocas durante a furação de polímeros reforçados com fibras (FRP), e o aumento da temperatura na região de corte, influenciado pelo aumento dos parâmetros de corte (v_c e f), acelera o desgaste de flanco nas arestas principais [Faraz et al., 2009; Iliescu et al., 2010; Liu et al., 2012]. Este mecanismo constitui-se pela remoção do ligante (Co) seguido da fragmentação dos grãos de carboneto de tungstênio (WC). Inicialmente, o ligante entre os grãos é parcialmente removido por deformação plástica e microabrasão. O estágio seguinte ocorre quando uma quantidade suficiente de ligante foi removida, o que envolve a remoção dos grãos de WC da superfície. Além disso, microfragmentos de fibra são capazes de penetrar entre os grãos de carboneto e danificar o cobalto por microabrasão. Altas flutuações de força geradas pela heterogeneidade do material alteram ligeiramente a posição dos grãos de WC no ligante dentro da zona ativa da ferramenta. Isto resulta na extrusão parcial do ligante na superfície da ferramenta de corte onde é posteriormente removido pela peça. Além disso, o movimento relativo dos grãos frágeis de carboneto resulta no aparecimento de trincas entre os grãos, o que potencialmente leva à fratura e remoção de partes das ferramentas, deixando grandes vazios [Ben Soussia et al., 2014].

Brocas de metal-duro com revestimento PCD apresentam melhor desempenho em relação à resistência ao desgaste por abrasão que aquelas com revestimento TiAlN [Wang et al., 2013] e sem revestimento [Gaugel et al., 2016; Iliescu et al., 2010] na furação de CFRP devido ao menor coeficiente de atrito dos revestimentos, pelas características físico-químicas e pelas propriedades mecânicas dos materiais das ferramentas.

Ao investigar o comportamento das brocas cerâmica não-óxida (SiAlON) na furação de CFRP, Çelik et al., 2015, observaram a ocorrência de microlascamentos na ferramenta

normalmente no início da operação (devido à sua menor tenacidade) e um incremento significativo da força de avanço (pelo crescimento das falhas na ferramenta), que resultou em um aumento da delaminação na entrada do furo (*peel-up*). Kumar e Sing, 2017, citam que os valores mínimos de delaminação e rugosidade durante a furação do GFRP utilizando brocas de aço-rápido e metal-duro foram atingidos com a utilização da segunda, provavelmente devido ao menor desgaste sofrido por esta.

O desgaste das ferramentas no processo de furação do GFRP normalmente ocorre quando são utilizadas brocas de aço-rápido (HSS) em comparação a utilização de brocas de metal-duro (WC-Co). Faria, 2007, analisou o processo de furação de GFRP utilizando brocas de HSS e WC-Co e diferentes geometrias e condições de corte (v_c e f) distintas. O autor concluiu que a broca de HSS sofreu maiores desgastes nas arestas principais, arestas secundárias e aresta transversal, em comparação com as de WC-Co, como esperado, sendo a abrasão o principal mecanismo de desgaste observado.

2.4.2 Falhas na broca durante a furação de Al e Ti

A furação em ligas de alumínio tem como problema principal a adesão de material nas arestas de corte e nos canais das brocas em baixas velocidades de corte (v_c). Por isto, utiliza-se alta v_c , combinada com a aplicação de fluido de corte e o emprego de ferramentas de aço-rápido e metal-duro com nanorrevestimentos. Porém, o aumento da temperatura de corte pode prejudicar a qualidade dos furos devido à alta condutividade térmica do alumínio que causa microsoldagem do alumínio nas arestas de corte, além do acúmulo de alumínio na superfície dos furos, afetando a qualidade de furação, por isto a utilização de meios de arrefecimento são recomendados [Biermann e Iovkov, 2015; Kumar et al., 2016; Santos et al., 2016].

Nouari et al., 2003, 2005, avaliaram o processo de furação da liga Al 2024 com brocas de aço-rápido e metal-duro sob diferentes velocidades de corte (v_c), observando os mecanismos de desgastes associados ao processo. As brocas de HSS se mostraram impróprias para a furação desta liga a seco. Em v_c mais baixa, o desgaste não é severo, uma vez que a temperatura não é significativa. Quando v_c é aumentada, há uma transição nos mecanismos de desgaste de abrasão e/ou adesão para difusão. Em termos gerais, os danos sobre as ferramentas são causados pela adesão do material usinado, acumulando-se sobre as arestas de corte da ferramenta, transferidas, inclusive, pelos resíduos dos cavacos gerados. Além disto, com o aumento progressivo da temperatura, esta pode atingir valores elevados pelo acúmulo de fragmentos do material da peça. Esta característica tem como consequência o aumento do diâmetro do furo.

Na furação em ligas de titânio, a progressão do desgaste é potencializada pela afinidade do titânio com os elementos químicos presentes nos revestimentos das brocas de metal-duro. Assim, a adesão do titânio sobre as arestas de corte contribui para o mecanismo de *attrition* (aderência e arrastamento), causando o descolamento e a fragmentação do revestimento, podendo levar ao lascamento da aresta e posteriormente à quebra. As tensões associadas ao processo promovem a deformação plástica, assim como tendem a acelerar o desgaste [Kim e Ramulu, 2004; Li e Shih, 2007; Qin et al., 2014; Sharif e Rahim, 2007; Wong et al., 2008; Wu et al., 2012; Zhang et al., 2008]. Além disso, devido à baixa condutividade térmica do Ti, a velocidade de corte (v_c) e o avanço (f) são os fatores de maior impacto sobre o desgaste da ferramenta [Li e Shih, 2007; Sharif e Rahim, 2007]. Como as altas taxas de desgaste acabam comprometendo o custo da operação, a utilização de baixa v_c deve ser considerada na furação de Ti [Wu et al., 2012]. Brocas com materiais de maior dureza a quente mostram-se mais resistentes ao desgaste na furação do Ti. Algumas indicações para o processo seriam ferramentas de metal-duro e PCD [Yang e Liu, 1999]. Além disso, revestimentos de alta dureza contribuem para menores taxas de desgaste de ferramentas [Sharif e Rahim, 2007], assim como a utilização do fluido de corte, principalmente se realizado de forma interna.

Cantero et al., 2005, estudaram a evolução do desgaste da ferramenta com revestimento TiN durante a furação a seco do Ti-6Al-4V. A análise por microscopia eletrônica de varredura (MEV) e espectroscopia por energia dispersiva de raios-X (EDS) mostrou perda progressiva do revestimento e adesão do material da peça na superfície de saída da broca helicoidal. O atrito no canal, combinado com a difusão de Ti na ferramenta, resultaram em nucleação e crescimento de crateras com o aumento do tempo de corte. Por fim, a fragilização da broca devido a tensões de corte severas (tanto mecânicas quanto térmicas) causou a fratura da mesma e o seu consequente fim de vida.

2.4.3 Falhas na broca durante a furação de juntas híbridas

Montoya et al., 2013, avaliaram a qualidade de furação de CFRP/Al com diferentes tipos de brocas (sem e com revestimentos). Foram analisados os desgastes das ferramentas utilizando MEV/EDS e verificadas as forças de avanço (F_f) e a rugosidade média da parede dos furos (R_a). Os mecanismos de desgastes observados foram abrasão (causada pela abrasividade das fibras de carbono) e adesão (resultante da ductilidade do alumínio). O maior desgaste, como esperado, foi observado na broca sem revestimento, aumentando significativamente os valores de F_f e R_a . Menores desgaste de flanco e força de avanço (e, portanto, boa qualidade do furo) foram

gerados pela broca com revestimento PCD. O estudo mostrou que o dano na entrada do furo do CFRP foi devido à saída dos cavacos de alumínio e não devido à geometria da ferramenta.

O lascamento da broca de metal-duro é um fenômeno comum durante o processo de furação da junta simples CFRP/Ti, resultando na diminuição da qualidade dos furos e impactando no tempo de vida da ferramenta de corte. Observações relativas à temperatura de furação, variação da força de avanço/momento torçor e localização da falha são importantes indícios para a sua constatação [Kim et al., 2016; Poutord et al., 2013; Zhang et al., 2008]. O lascamento é influenciado principalmente pela adesão do titânio à aresta de corte. A afinidade química entre o Ti e o material da ferramenta aumenta as tensões residuais térmicas, sendo um dos fatores críticos das falhas na broca. As avarias (trinca e fratura) ocorrem entre os elementos constituintes (WC e Co). Ademais, à medida que a temperatura aumenta, a dureza a quente do metal-duro diminui gradualmente [Wang et al., 2017].

Wang et al., 2014, conduziram um estudo experimental na furação de CFRP/Ti nos dois sentidos. Ao furar no sentido CFRP \Rightarrow Ti, as fibras de carbono eliminaram a adesão do Ti sobre a broca, triplicando a vida da ferramenta quando comparada com a furação no sentido Ti \Rightarrow CFRP (Figura 2.11). No entanto, não foram avaliadas as rebarbas geradas no sentido compósito \Rightarrow metal, que são mais pronunciadas nesta estratégia devido às forças de cisalhamento na região da saída da ferramenta. Em estudo similar, Xu e El Mansori, 2017, constataram que a broca de metal-duro revestida com PCD durante a furação na chapa metálica sofre desgaste de cratera e apresenta titânio aderido na ferramenta (afinidade do carbono com o titânio), enquanto que o CFRP gera desgaste de flanco, de menor intensidade, agravando a adesão de Ti. O lascamento das quinas é atribuído a alternância da força de avanço na interface entre os materiais e a fragilidade do revestimento da broca. Os autores ainda observaram amolecimento térmico do CFRP ao aumentar a velocidade de corte (v_c) e a existência de endurecimento por deformação no titânio ao alterar o avanço (f). Por isso, recomendam a utilização de f baixo e v_c médio na furação da junta no sentido CFRP \Rightarrow Ti de modo a obter melhor qualidade de furação. Porém, a utilização do revestimento PCD na broca não é indicada para a furação de Ti devido às falhas observadas.

Kuo et al., 2014, analisaram o processo de furação da junta composta Al/CFRP/Ti sob diferentes níveis de f e v_c utilizando ferramentas de WC/Co revestidas com PCD. Os autores observaram que os valores de rugosidade aumentaram com o incremento de f e v_c , atribuindo esta característica ao lascamento da quina da ferramenta. Microfissuras e queimas foram observadas na superfície do CFRP com o aumento de f as quais foram atribuídas ao maior

desgaste de quina na broca com descolamento do revestimento. No entanto, as camadas subsuperfícies não demonstraram alterações, tanto de dureza quanto microestrutural, com a modificação dos parâmetros de corte.

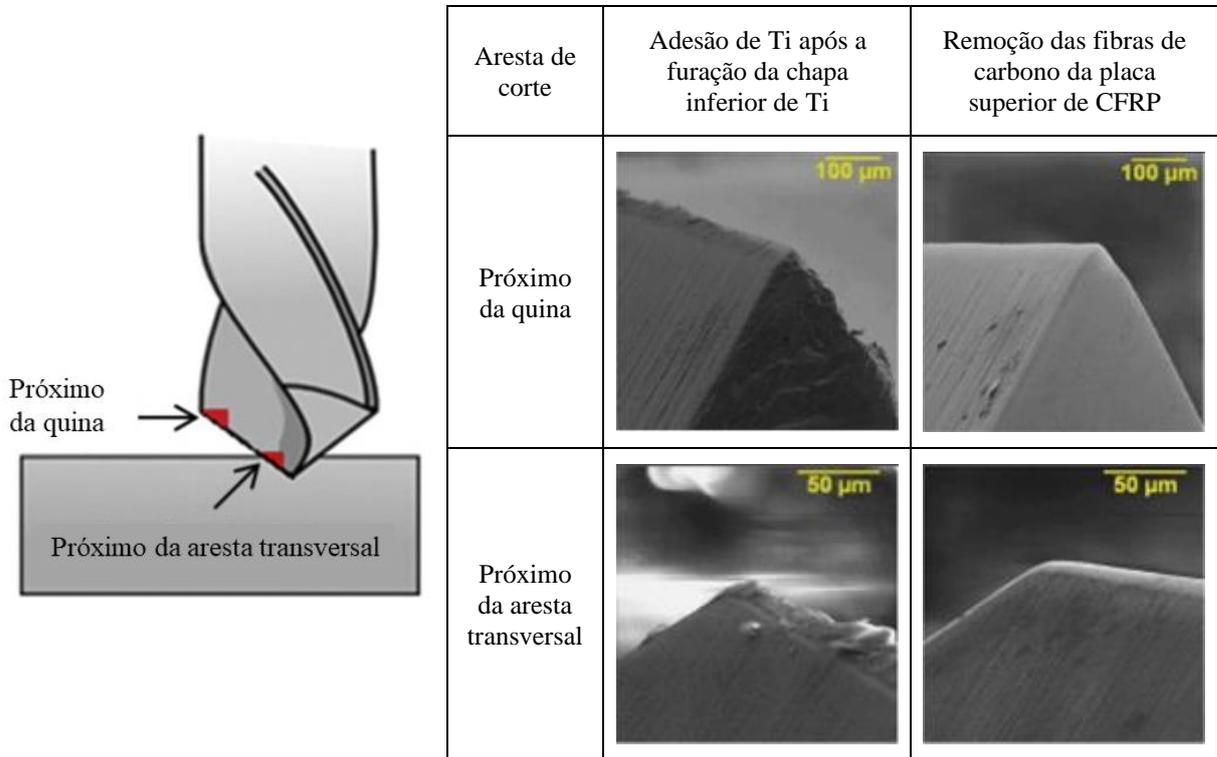


Figura 2.11 – Imagens MEV para as arestas de core das brocas antes e depois da furação a entrada da camada do CFRP durante a furação de juntas CFRP/Ti [Wang et al., 2014].

2.5 Morfologia dos Cavacos

Os pequenos cavacos produzidos no corte de polímeros reforçados com fibras são caracterizados pela natureza “pulverulenta” (Figura 2.12a) devido a uma série de fraturas frágeis durante o processo de formação de cavacos. Além disto, o avanço da ferramenta causa o cisalhamento, induzido por compressão entre as fibras não cortadas e promove o rompimento sobre o plano de corte. A propagação da fratura ao longo da direção das fibras ocorre até o desprendimento completo do cavaco. Quando a tensão de cisalhamento excede a resistência das fibras, ocorre a formação completa dos cavacos. A ferramenta corta o FRP resultando no cavaco pulverizado, caracterizado pela fratura predominantemente frágil (em forma de pó), sendo espalhados rapidamente de acordo com o avanço da ferramenta [Xu e El Mansori, 2017]. Ainda em consequência desta característica, certos cuidados devem ser devidamente tomados, como

a implantação de sistema de exaustão de cavacos (reduzir a dispersão no ambiente de trabalho), além da utilização de máscaras e luvas apropriadas pelos operadores da usinagem (evitar o contato com a pele na manipulação dos objetos) [Soussia et al., 2014].

A morfologia dos cavacos metálicos é outra variável de resposta importante na análise do processo de furação de titânio e alumínio. Os cavacos gerados estão intimamente ligados aos parâmetros de corte. A velocidade de corte tem menor influência na formação do tamanho e da segmentação dos cavacos. Outro problema está associado à presença dos cavacos ao longo dos canais da ferramenta, aumentando a força de avanço e a temperatura, podendo ocasionar fraturas na broca [Annkrishnaraj et al., 2010; Zhang et al., 2008]. Cavacos curtos e rígidos são formados com alto avanço (maior espessura de corte), enquanto cavacos longos e contínuos em baixo avanço. O incremento da velocidade de corte promove cavacos menores devido à maior frequência de fratura (Figura 2.12b). Além destes fatores, a microestrutura do Ti pode ocasionar a variação da segmentação, com diferentes formações de cavacos para o titânio com fase α - β quando comparado ao com fase β . Menores temperaturas contribuem para a fragilização do material e a formações de cavaco mais quebradiços [Kim e Ramulu, 2007; Zhang et al., 2008].

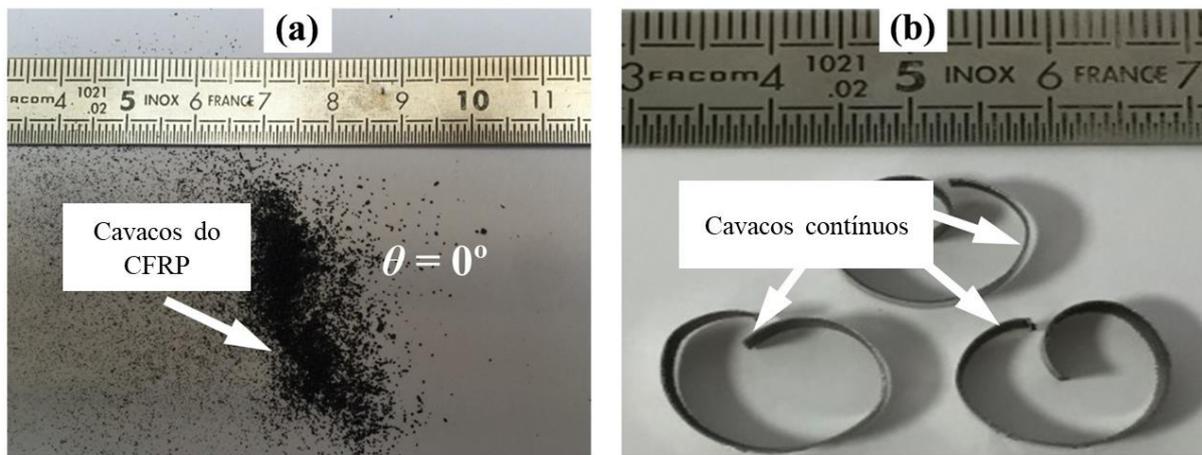


Figura 2.12 – Cavacos típicos na furação de junta simples CFRP/Ti: (a) cavaco do CFRP; (b) cavaco do Ti [Xu e El Mansori, 2017].

O cavaco gerado no processo de furação de ligas de alumínio depende do tipo de broca, dos parâmetros de corte (f e v_c) e da presença do fluido de corte. Os revestimentos das brocas contribuem para geração e diferentes tipos de cavacos [Nouari et al., 2005]. Na furação de alumínio com alta v_c e baixo f pode haver grande interferência no escoamento do cavaco, que encontrará maior dificuldade para sair do furo, causando problemas como quebra da ferramenta

e acabamento de baixa qualidade [Nouari et al., 2003]. O alumínio possui alta ductilidade e baixa resistência ao cisalhamento, permitindo maior área de contato na interface ferramenta-peça (maior espessura de corte), o que facilita a sua usinagem. No entanto, o incremento do avanço promove o aumento da força e da potência de usinagem, além de maior geração de calor, prejudicando a qualidade do furo [Santos et al., 2016].

2.6 Rebarbas em Materiais Metálicos

Outro defeito importante associado à furação de materiais metálicos dúcteis é a formação das rebarbas na saída dos furos. A formação de rebarbas e a baixa qualidade dos furos contribuem para diminuir a vida em fadiga, dificultar a montagem e prejudicar a funcionalidade do componente [Penã et al., 2005; Choi et al., 2003]. Em consequência, para sua remoção, devem ser empregados processos posteriores, como a rebarbação, que acarretam custos ao processo [Dornfeld et al., 1999]. Para realizar a operação de rebarbação em uma junta híbrida, torna-se necessária a separação da chapa metálica da placa de compósito, além da remoção de lubrificantes. Isto gera trabalhos manuais adicionais, impactando no aumento do custo de processo [Aurich et al., 2009; Pena et al., 2005]. Desta forma, evitar a formação de rebarbas torna-se relevante para o processo.

No processo de formação da rebarba, Aurich et al., 2009, explicam que o ponto de ruptura está relacionada com a ponta da broca, onde ângulos de ponta (σ) menores geram maiores forças e deformação na região central. Já ângulo de ponta maior faz com que os esforços se concentrem na periferia dos furos, ocasionando fraturas nestes locais, que são removidas mais facilmente. A rebarba é formada na entrada e na saída do furo, causada pela ação da flexão seguida de cisalhamento lateral e categorizadas de acordo com a sua formação (Figura 2.13): (I) rebarbas uniformes e pequenas; (II) rebarbas uniformes e médias; (III) rebarbas tipo “coroa”, onde há maior deformação plástica; às vezes é caracterizada por “chapéu” devido a trinca propagar a partir da periferia do furo, podendo ou não se destacar; (IV) rebarbas do tipo irregular, com uma média deformação plástica; (V) rebarbas do tipo irregular, com grande deformação plástica, onde a fratura ocorre próxima à ponta da ferramenta.

A avaliação das rebarbas geradas nas superfícies de entrada e saída das chapas metálicas é fundamental para que seja possível verificar a ocorrência do esmagamento, ou seja, a formação das rebarbas nas interfaces dos furos devido à atuação da placa de FRP como suporte (*backplate*). Com isto, pode-se esperar a formação de rebarba na saída do furo com altura

superior quando comparada à entrada dos furos [Choi et al., 2003; Kim e Ramulu, 2007]. Dentre as consequências da formação das rebarbas, tanto nas superfícies de entrada quanto na de saída, estão as deformações plásticas, que dependem da ductilidade do material, e o aquecimento superficial. Servem como fonte de erros dimensionais, interferências, desalinhamentos e pontos iniciais de trincas [Pena et al., 2005].

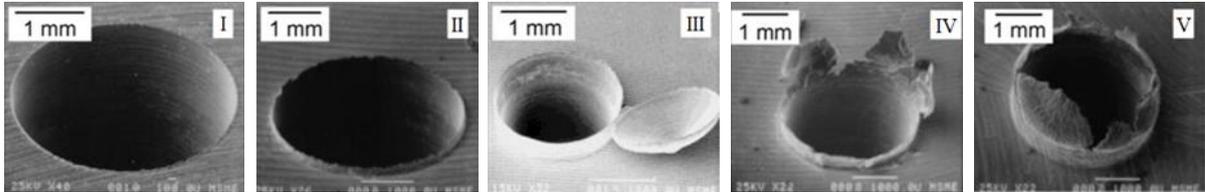


Figura 2.13 – Formação típica de rebarbas no processo de furação de chapas metálicas [Aurich et al., 2009].

Para a caracterização das rebarbas, os principais parâmetros observados são a altura, a largura, o volume e a dureza. Dentre os procedimentos de medição da rebarba, tem-se o método destrutivo, que acaba impossibilitando a utilização do material, pois se concentra na análise metalográfica da região da formação da rebarba; porém, isso torna possível a análise da microdureza e as alterações relativas ao corte; no entanto, trata-se de um processo trabalhoso que envolve tempo para a preparação das amostras. Outro método utiliza instrumento mecânico de medição, onde se tem o contato direto com amostra, porém, limitando-se a medição da altura da rebarba; este contato pode causar algumas deformações no material, mascarando e inserindo erros de medição adicionais. Um terceiro método é através de sistemas ópticos (sem contato) tais como microscópios, projetores de perfil, lasers e interferômetros [Aurich et al., 2006; Aurich et al., 2009].

Dentre as oportunidades de melhoria na geração de rebarbas está a otimização dos parâmetros de corte para obter a mínima rebarba na saída [Kim e Ramulu, 2007]. A relação entre velocidade de corte (v_c), geração de rebarba e defeitos geométricos mostrou-se altamente significativa na furação do alumínio, demonstrando sua interdependência e correlação [Abdelhafeez et al., 2015]. O aumento de v_c promove a diminuição das rebarbas do alumínio, efeito este contrário do produzido na furação do titânio, o qual promove rebarbas maiores e indesejadas com o aumento da v_c [Kim et al., 2001]. Em consequência, a dificuldade da remoção de cavacos nos canais das brocas cresce devido à elevação do calor, com tendência a obstruir os canais das brocas. Em menores v_c , a furação do alumínio apresenta melhora com fluido de

corte em abundância. Neste sentido, a mínima quantidade de lubrificação torna-se interessante na furação com maiores v_c [Kelly e Cotterell, 2002].

Manjunatha, 2007, avaliou a formação de rebarbas na furação da liga de alumínio Al6061-T6 utilizando redes neurais artificiais para prever a altura e a espessura da rebarba, separadamente, em função do ângulo de folga (α), ângulo de ponta (σ) e ângulo de aresta transversal (ψ). Constatou que os parâmetros geométricos das brocas helicoidais que geram a altura mínima da rebarba são, respectivamente 13° , 127° e $110 \sim 114^\circ$. No caso da espessura mínima de rebarba, os ângulos recomendados são $12^\circ \sim 16^\circ$, $130^\circ \sim 132^\circ$ e $105^\circ \sim 115^\circ$. Hewson, 1998, analisou a formação da rebarba na saída dos furos em Ti-6Al-4V e a sua relação com a utilização do fluido de corte e a geometria da broca. O autor observou a formação uniforme das rebarbas e com alturas menores na saída com a utilização do fluido quando comparadas com as geradas no corte a seco. No entanto, ainda faltaram informações complementares de análise, como a microdureza, com o objetivo de caracterizar alterações geradas pela incidência de elevadas temperaturas de processo. Kilickap, 2010, estudou o processo de furação da liga Al 7075 com o objetivo de minimizar a altura da rebarba e a rugosidade do furo. O experimento foi realizado com fluido de corte em abundância aplicado externamente à ferramenta. Para a minimização dos problemas, recomenda-se a utilização de baixa velocidade de corte (v_c), baixo avanço (f) e maior ângulo de ponta (σ).

Pinto, 2010, investigou a formação de rebarbas na furação de chapas finas aeronáuticas Al 2024 utilizando brocas de metal-duro com diferentes ângulos de hélice (ϕ) e formatos de ponta. Foram analisados os efeitos sobre a força de avanço (F_f), o momento torçor (M_t), a flexão das chapas e a altura da rebarba. Concluiu que a broca com maior ângulo de hélice e maior ângulo de saída tende a reduzir F_f e M_t . Isto reduz a deformação plástica do cavaco durante a sua formação, resultando em rebarbas menores.

Devitte et al., 2021, otimizaram o processo de furação de juntas híbridas compósito-metal Al/GFRP/Al com diferentes velocidades de corte e avanço. Após a furação com parâmetros otimizados não foram observadas rebarbas uniformes, de remoção menos complexa, que estão associadas a uma carga circular distribuída dos furos, mas rebarbas tipo coroa, de remoção mais irregular e trabalhosa, que foram predominantes nos experimentos. Estas rebarbas normalmente são associadas com ângulos de ponta menores, como mostrado na broca 85C (118°), e conseqüente deformação na região central do furo. De forma geral, os autores indicam que a geração de rebarbas uniformes com baixa altura deve ser prioridade.

Xu e El Mansori, 2017, avaliaram diferentes estratégias de furação da juntas CFRP/Ti com diferentes parâmetros de corte. Nesta análise, identificaram que o sentido de furação CFRP \Rightarrow Ti resulta em menor delaminação devido ao suporte que a chapa de Ti proporciona, aumentando a rigidez na saída do furo do compósito. No entanto, gera maiores rebarbas na saída do furo metálico. Assim, o sentido de furação Ti \Rightarrow CFRP deve ser considerado quando a rebarba é o requisito principal, principalmente em maiores avanços. Porém, causa maiores delaminações no compósito.

2.7 Desvios Dimensionais e Geométricos

Os desvios dimensionais e geométricos são indutores de defeitos e da consequente rejeição de furos. Na furação de materiais metálicos, a geração de calor impacta no desvio dimensional (alteração no diâmetro) devido à dilatação térmica, aumentando o tamanho do furo. No caso do desvio geométrico, este é importante para determinar o nível de tolerância que o processo está operando [Zhu et al., 2017b]. Normalmente a tolerância dimensional associada à furação é alta (IT11), necessitando de operações posteriores de acabamento, como a utilização de alargadores. No entanto, com a aplicação de centros de usinagem, de parâmetros de corte adequados e de brocas apropriadas (como as de metal-duro), podem-se alcançar níveis de tolerância apurados (IT9) no processo. Com isto, reduz-se as operações e promove-se o aumento da qualidade [Diniz et al., 2014]. Na análise da circularidade, busca-se avaliar a precisão dos furos realizados e os efeitos associados à deformação do material, que podem gerar uma diminuição do tamanho do furo [Zhu et al., 2017b].

2.7.1 Desvios na furação de FRP e metais

Os desvios de circularidade dos furos em materiais poliméricos reforçados com fibras normalmente são atribuídos a fatores associados ao aumento de desgaste e à geometria da ferramenta [Lachaud et al., 2001; Raj e Karunamoorthy, 2016].

Krishnaraj et al., 2012, avaliaram a qualidade do furo (desvio dimensional e circularidade) na furação em altas velocidades (HSM) do CFRP utilizando broca de metal-duro. Os autores constataram por análise de variância (ANOVA) que o desvio dimensional do furo é influenciado pelo avanço (67%) e pela velocidade de corte (17%), enquanto a circularidade é fortemente influenciada pela velocidade de corte (86%).

Os desvios de forma são esperados no processo de furação do alumínio, ou seja, ocorre a variação da superfície real em relação à superfície geométrica do furo. Os principais são cilindricidade e circularidade. Suas causas são associadas à falta de rigidez do equipamento, desgaste de ferramenta e variações de temperatura no processo [Vieira et al., 2017], muitas vezes associada ao aumento da velocidade de corte [Nouari et al., 2005; Rivero et al., 2006; Zitoune et al., 2010]. Nouari et al., 2005, avaliaram a influência dos parâmetros de corte e do material da broca helicoidal (aço-rápido e metal-duro sem e com revestimento) sobre a qualidade do furo gerado na furação da liga de alumínio Al 2024. Os autores citam que alta v_c estimula a difusão na superfície de saída, mas minimiza a adesão de material na superfície de saída da broca. Assim, os melhores resultados em termos de desvios dimensionais e geométricos foram obtidos para as brocas de metal-duro com revestimento utilizando alta v_c e baixo f . Pacheco et al., 2019, analisaram a rugosidade média e o desvio dimensional do furo obtidos na furação a seco e com fluido de corte em abundância da liga Al 2011 utilizando alto avanço (f). Os autores observaram melhoria significativa da rugosidade com valores elevados de f (1,0 mm/volta) e com fluido em abundância. Por outro lado, o alto valor de f não influenciou de forma expressiva o desvio dimensional. Contudo, a diminuição do tempo de corte foi evidente. Vieira et al., 2017, analisaram a cilindricidade e a circularidade do furo na furação da liga Al 7075 utilizando brocas helicoidais com 10 mm de diâmetro. Os autores concluíram que ambos os desvios foram maiores com maior avanço ($f = 0,30$ mm/volta), e broca com afiação convencional e ângulo de ponta $\sigma = 118^\circ$.

Alguns fatores causam impacto significativo nos desvios geométricos (cilindricidade e circularidade) dos furos em titânio, como os parâmetros de corte (v_c e f). Conforme estes aumentam, os desvios também crescem. As brocas de aço-rápido geram furos menores enquanto as brocas de metal-duro produzem furos maiores. Isto pode estar associado às maiores vibrações induzidas pelo aumento de tais parâmetros [Kim et al., 2001; Zhang et al., 2008]. Abdelhafeez et al., 2015, avaliaram, dentre outras respostas, o diâmetro do furo e a circularidade na furação com fluido em abundância das ligas de titânio Ti-6Al-4V e alumínio Al 7010 e Al 2024 com brocas de metal-duro sem e com revestimento, respectivamente. Concluíram que a circularidade dos furos não excedeu $30 \mu\text{m}$ e o desvio dimensional não ultrapassou $40 \mu\text{m}$ em todos os casos. Zhu et al., 2017b, realizaram uma minuciosa investigação sobre a qualidade do furo realizado em Ti-6Al-4V sem fluido de corte. Notaram que a circularidade foi impactada pelo aumento do avanço (f). Em termos de integridade, a subsuperfície apresentou maiores deformações plásticas para maiores velocidades de corte, associadas as maiores tensões e

temperaturas de corte nesta condição. Prasanna et al., 2014, estudaram a influência da rotação (n) e da velocidade de avanço (v_f) nos desvios dimensionais e geométricos dos furos durante a microfuração a seco de chapas finas (0,4 mm de espessura) de Ti-6Al-4V utilizando brocas de metal-duro com 0,4 mm de diâmetro. Os autores identificaram que a precisão dos furos diminuiu com o aumento do desgaste da broca, e a velocidade de rotação foi o fator mais significativo sobre os desvios.

2.7.2 Desvios na furação de juntas híbridas

A presença do alumínio em juntas multimateriais causa dificuldades ao processo de furação devido aos diferentes módulos de elasticidade (E) proporcionarem diferentes deformações elásticas, principalmente em pequenos diâmetros. Com isto, variações dimensionais são geradas ao longo do comprimento do furo [Brinksmeier e Janssen, 2002; Hamade e Ismail, 2005]. O titânio promove maior desgaste das ferramentas, resultando em furos menores e maior circularidade dos furos [Kim et al., 2016].

Zhang et al., 2008, estudaram o impacto dos parâmetros de processo na precisão dos furos de juntas híbridas CFRP/Al. A circularidade nos furos do compósito foi 6 μm com baixo avanço e chegou a 15 μm quando o avanço aumentou. Na chapa metálica, a circularidade ficou estável em 10 μm e não houve mudanças significativas com a alteração dos parâmetros de corte. Ao analisarem diferentes ferramentas, os autores concluíram que a broca com afiação convencional gera maiores valores de circularidade em comparação à broca com cone duplo. Esta ferramenta apresenta melhor capacidade de centragem (promove redução de resistência ao corte) e maior área de dissipação de calor. Nesta condição, durante a furação de CFRP, pôde-se alcançar o nível de tolerância H8 (5 μm).

Wang et al., 2014, analisaram a precisão dos furos durante o processo de furação de juntas híbridas CFRP/Al. Eles identificaram maiores valores de diâmetro com o incremento do avanço devido ao aumento da vibração e da instabilidade do processo. Entretanto, com o aumento da velocidade de corte, para os mesmos valores de avanço, foi observada a diminuição do diâmetro dos furos, beneficiando as montagens finais.

Qi et al., 2021, avaliaram a diferença de diâmetro entre o compósito e o metal na furação da junta simples CFRP/Ti. Os autores investigaram a influência da vibração, do calor gerado, do cavaco e do desgaste da ferramenta. A Figura 2.14 ilustra a evolução do diâmetro do furo na entrada e na saída de ambos os materiais da junta em função dos parâmetros de corte.

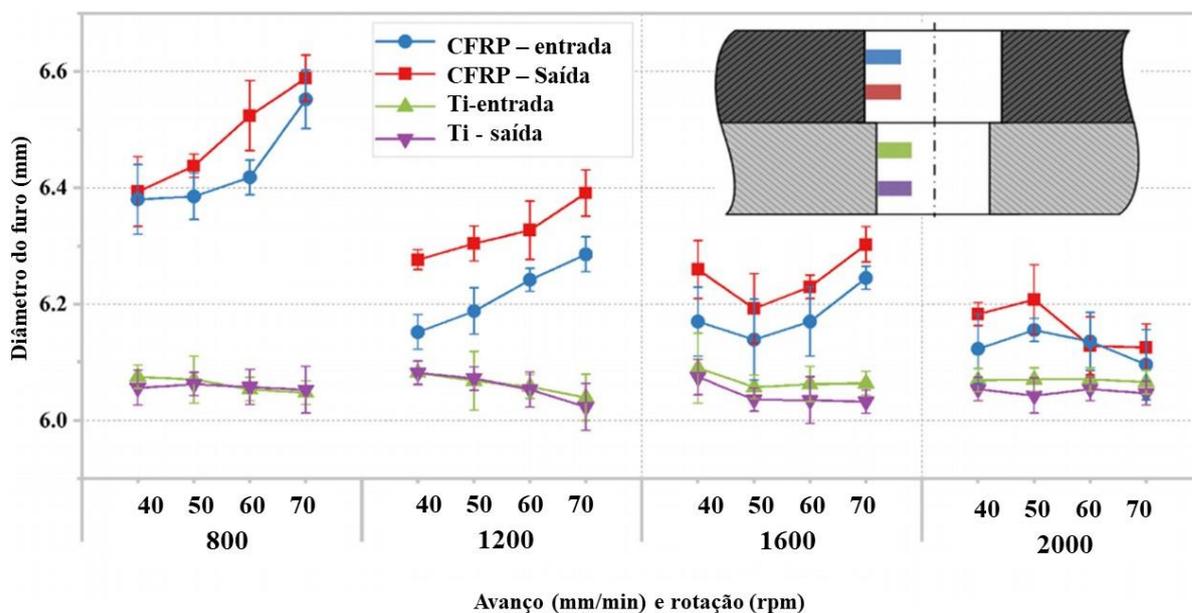


Figura 2.14 – Influência dos parâmetros de furação no diâmetro da entrada e na saída dos furos em CFRP e liga de Ti [Qi et al., 2021].

Nota-se na figura que o diâmetro do furo do compósito é geralmente maior que o do metal nos mesmos parâmetros de corte. Além disso, o diâmetro na saída do furo no CFRP é maior que o na entrada. No entanto, para o titânio, não há muita diferença no diâmetro do furo. Os autores concluíram que as amplitudes de vibração na interface CFRP/Ti são grandes devido às diferentes propriedades mecânicas dos dois materiais, o que resulta no aumento do diâmetro do orifício de saída em CFRP. Depois de passar pela interface compósito-metal, a broca permanece furando a liga de titânio, a vibração diminui e o diâmetro do furo permanece relativamente estável. Além da vibração, os autores verificaram que o aumento da temperatura observado durante o processo e os cavacos aquecidos e afiados da liga de Ti também promovem um aumento no diâmetro do furo de CFRP. Citam ainda que a adesão de titânio no flanco da broca faz com que o revestimento seja alterado, impactando constantemente no diâmetro do furo da junta CFRP/Ti.

Kim et al., 2016, avaliaram a qualidade dos furos de juntas híbridas CFRP/Ti com a variação da velocidade de corte e avanço. Os autores observaram redução no diâmetro dos furos do compósito devido a contração elástica observada nesta região. No titânio, houve o aumento do diâmetro dos furos devido ao crescimento da vibração durante a furação. No entanto, com a progressão da usinagem, ocorreu o desgaste da ferramenta, contribuindo para a diminuição do diâmetro dos furos.

2.8 Rugosidade da Parede dos Furos

Rugosidade ou textura primária é outro fator utilizado para avaliar a qualidade do furo. Ela representa o conjunto das irregularidades causadas pelo processo de produção da superfície. A rugosidade da parede dos furos é comumente caracterizada pela medição de parâmetros de rugosidade ou pela análise da topografia da superfície (perfil de rugosidade) resultantes da ação da broca sob diferentes parâmetros de corte [Zhang et al., 2008].

Na furação de compósitos poliméricos reforçados com fibras, a rugosidade se mostra fortemente dependente do avanço (f), mas é pouco impactada pela velocidade de corte (v_c) [Khashaba et al., 2010]. Entretanto, ao utilizar alta v_c combinada com baixo f , tem-se furos com baixa rugosidade e delaminação reduzida [Enemouh et al., 2001; Hoffmann et al., 2021]. A utilização da alta v_c contribui para a diminuição de danos na superfície do furo devido ao menor tempo de contato da aresta de corte com a camada de compósito. O maior tempo de contato ferramenta-peça (baixa v_c) aumenta o atrito e, por conseguinte, a temperatura nesta interface, reduzindo a resistência térmica da matriz e causando aumento da rugosidade [Hoffmann et al., 2021; Khashaba et al., 2010; Khashaba, 2013; Zitoune et al., 2010].

Faria, 2007, analisou a furação de GFRP utilizando brocas com diferentes geometrias e condições de corte (v_c e f) distintas. O autor observou que a rugosidade na parede do furo aumentou devido ao ângulo de ponta menor ($\sigma = 118^\circ$), ao crescimento do desgaste da broca e ao incremento do avanço (f). Hoffmann et al., 2021, investigaram a delaminação e a rugosidade em CFRP sob diferentes condições de resfriamento (cc), velocidade de corte (v_c) e avanço (f). Em relação à rugosidade, maiores valores de v_c promoveram menores valores de rugosidade, mas prejudicaram o fator de delaminação ajustado (F_{da}) na entrada do furo. Além disso, os valores de R_z (rugosidade média parcial) foram influenciados por cc , e os valores de R_t (rugosidade total) foram influenciados por cc e pela combinação $v_c \times cc$.

Considerando os materiais metálicos, os fatores de maior impacto sobre a rugosidade na furação de ligas de titânio são os parâmetros de corte. Maiores v_c podem produzir menores valores de rugosidade quando utilizadas brocas de metal-duro. Por outro lado, o aumento da rugosidade é constatado devido ao maior desgaste em brocas de aço-rápido (HSS). No caso do avanço, quanto maior seu nível, maior a rugosidade [Ramulu et al., 2001; Sharif e Rahim, 2007; Zhang et al., 2008]. Para uma menor rugosidade na parede de furos em ligas de alumínio, Zitoune et al., 2016, recomenda a furação aplicando brocas de HSS com nanorrevestimentos

(sem alumínio e com baixa afinidade química), baixo avanço ($f = 0,1$ mm/volta) e rotação de 2020 rpm ($v_c = 38$ m/min).

Na furação de juntas híbridas simples, Wang et al., 2015, estudaram a furação da junta CFRP/Al e constataram que as características de anisotropia do material, formam cavidades e influenciam o aumento da rugosidade, causando falhas pelo efeito da extração da fibra e pela degradação da matriz usando brocas de metal-duro (WC-Co) revestidas com PCD. Os autores atribuem o aumento do diâmetro do furo e dos valores de rugosidade ao crescimento da vibração e à instabilidade do corte com o aumento do avanço. Além disso, houve a degradação da matriz que gerou irregularidades no CFRP. Isbilir e Ghassemieh, 2013, analisaram, dentre outras variáveis de resposta, a rugosidade na parede do furo durante a furação da junta CFRP/Ti usando brocas de WC-Co revestidas com TiAlN. Os autores notaram o impacto na rugosidade quando ocorre a furação no sentido CFRP \Rightarrow Ti devido à orientação das fibras, assim como a perda de resina e as falhas no corte das fibras estarem presentes entre os defeitos associados à furação do CFRP. Durante o corte no sentido TI \Rightarrow CFRP tem-se a fratura dúctil, que pode ser evidenciada nas proximidades da interface. Com esta estratégia, devido à adesão do Ti sobre a ferramenta, ocorre um aumento da rugosidade na placa de CFRP e uma diminuição na chapa de Ti devido a não presença de resíduos de fibras de carbono na furação.

2.9 Ferramentas de Corte

Os materiais a serem usinados, os parâmetros de corte, a utilização ou não de meios lubrificantes, e o material e a geometria da broca influenciam no desempenho do processo de furação de materiais poliméricos reforçados com fibras (Figura 2.15) [Aamir et al., 2019].

A geometria e/ou material da ferramenta de corte influenciam direta ou indiretamente nos esforços de compressão e torção, na geração e transferência de calor, nos danos superficiais e subsuperficiais do furo e no desgaste da ferramenta [Faraz et al., 2009; Iliescu et al., 2010; Mohan et al., 2007; Klocke, 2011; Merino-Perez et al., 2016].

A aresta transversal contribui com 50-60% da geração total da força de avanço (F_f). Assim, brocas com menor aresta transversal de corte promovem menores F_f , além de induzirem menores danos de delaminação, facilitarem a centralização da ferramenta e melhorarem a separação dos cavacos na ponta da broca [Zitouni et al., 2016]. O maior ângulo de folga contribui para a redução do atrito e, portanto, da geração de calor [Zitouni et al., 2016]. Outra possibilidade para diminuir o acúmulo de temperatura e o desgaste na ferramenta, é a utilização

ângulo de ponta dupla [Isbilir e Ghassemieh, 2013; Kuo et al., 2014; Tsao e Hocheng, 2005]. O momento M_t é altamente influenciado pelo ângulo de ponta (σ) e pelo ângulo de hélice (ϕ) da broca. Brocas com ângulos σ e ϕ menores promovem menores valores de M_t [Xu et al., 2016]. Entretanto, maior ϕ facilita a remoção de cavacos devido ao aumento do ângulo de saída (γ) [Tsao e Hocheng, 2007]. A saída do furo, região sujeita a grande deflexão, é a mais suscetível a danos como delaminação (FRP), rebarbas (Ti e Al) e lascamentos (broca) [Fu et al., 2018b]. A Figura 2.16 ilustra diferentes geometrias de brocas utilizadas.

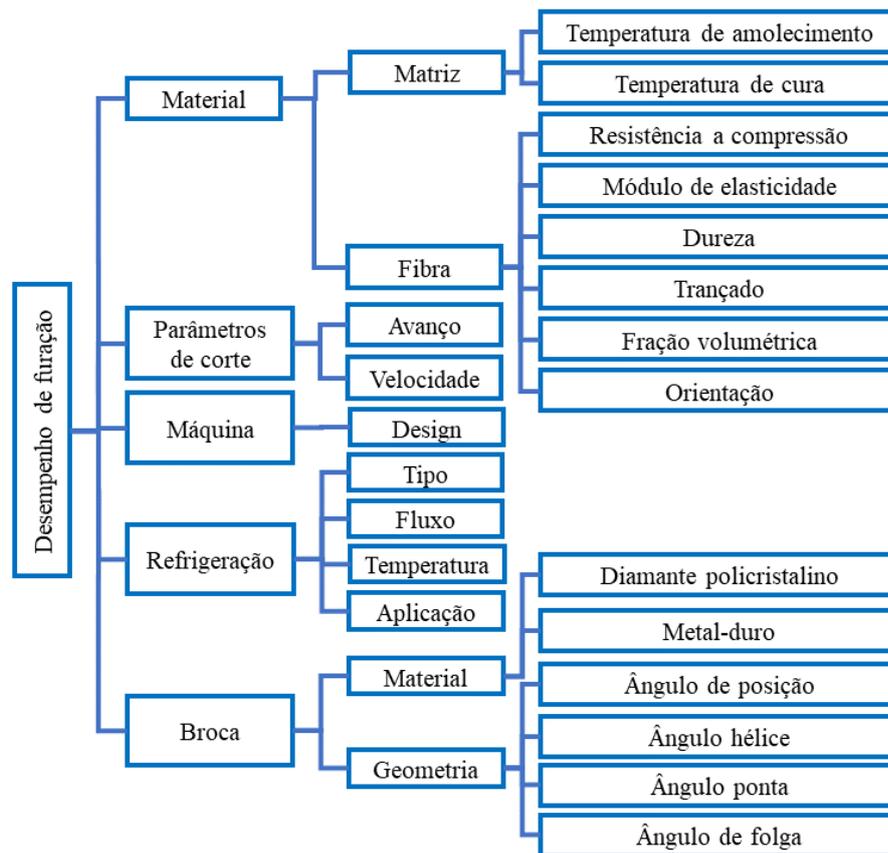


Figura 2.15 – Parâmetros de influência no desempenho do processo de furação de materiais compósitos [Aamir et al., 2019].

Quanto ao material da ferramenta, diversos autores recomendam a utilização de brocas de metal-duro (WC-Co) e diamante policristalino (PCD) para a furação de CFRP [Iliescu et al., 2010; Khashaba, 2013; Merino-Pérez et al., 2016; Wang et al., 2017; Gaugel et al., 2016; Ramirez et al., 2014] e WC-Co sem revestimento para a usinagem de titânio [Klocke, 2011; Li e Shih, 2007; Sharif e Rahim, 2007], pois possuem uma maior dureza a quente (por conseguinte, menor taxa de desgaste) quando comparado ao aço-rápido, ampliando seu tempo de vida. Na

comparação com as de PCD, as ferramentas de WC-Co tendem a ser mais favoráveis na furação de CFRP pois são menos caras, causam menos danos e acabam sendo mais econômicas para pequenas séries de furos [Aamir et al., 2019].

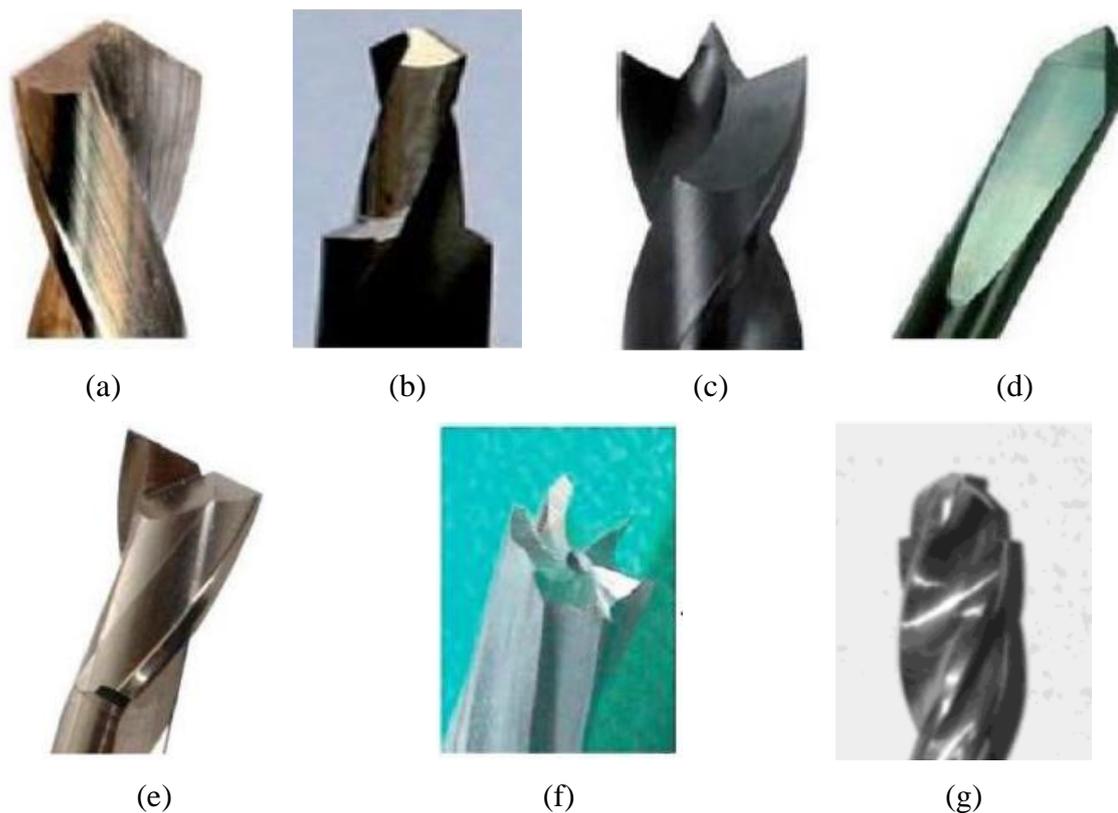


Figura 2.16 – Geometrias de furação utilizadas na furação de CFRP: (a) helicoidal; (b) escalonada; (c) “Brad & Spur”; (d) reta (Dagger); (e) de entalhe (*slot*); (f) de impacto (*core/saw*) [adaptado de Aamir et al., 2019]; (g) multiangular [Raj e Karunamoorthy, 2016].

Considerando a usinagem de polímeros reforçados com fibras, Raj e Karunamoorthy, 2016, avaliaram o efeito de diferentes geometrias de brocas helicoidais, “Brad & Spur” e multiangular na furação de CFRP, considerando o acabamento dos furos, a força de avanço (F_f), rugosidade e o desgaste da ferramenta. Evidenciaram que a broca multiangular (Figura 2.16g) resultou em menor excentricidade do furo, menor rugosidade da parede do furo e maior vida da ferramenta quando comparada com a broca helicoidal.

Na furação da liga Ti-6Al-4V utilizando brocas de WC-Co sem revestimento, Wong et al., 2008, estudaram os efeitos de diferentes geometrias de ferramenta (ângulo de ponta “ σ ” e ângulo de hélice “ ϕ ”) e diferentes ciclos. Concluíram que os parâmetros de corte e as geometrias

afetam o desgaste da ferramenta durante a operação. Demonstraram que a furação no ciclo intermitente foi mais efetiva na comparação com a furação em cheio.

Alguns pesquisadores conduziram projetos para avaliação de diferentes geometrias e características de brocas aplicadas para a furação de juntas simples CFRP/Ti. Wika et al., 2011, usaram quatro brocas diferentes, variando no número canais e do ângulo da hélice (ϕ). Os resultados mostraram que a broca com dois canais e maior ângulo ϕ promoveu menor força de avanço e temperatura reduzida em comparação com outras brocas usadas. Os autores atribuíram esta condição ao maior volume de canal disponível para a remoção dos cavacos e dissipação de calor. Senthilkumar et al., 2013, avaliaram os efeitos de diferentes ângulos de ponta (σ) no desempenho da ferramenta de metal-duro. Foram usadas brocas com $\sigma = 118^\circ$ e $\sigma = 135^\circ$. Em suas conclusões, as brocas com $\sigma = 135^\circ$ superaram aquelas com $\sigma = 118^\circ$ em termos de desgaste da ferramenta e remoção de cavacos. Entretanto, a observação quanto aos ângulos ϕ diferentes entre as brocas indica que isso pode ter contribuído para a melhor retirada do cavaco durante o processo. Garrick et al., 2007, modificaram a broca PCD convencional (Figura 2.17a) utilizada na furação da junta CFRP/Ti aplicando o design “K-land”. Nos experimentos, as brocas especiais com canais modificados (Figura 2.17b) aumentaram a vida da ferramenta e melhoraram a qualidade do furo em comparação às convencionais.

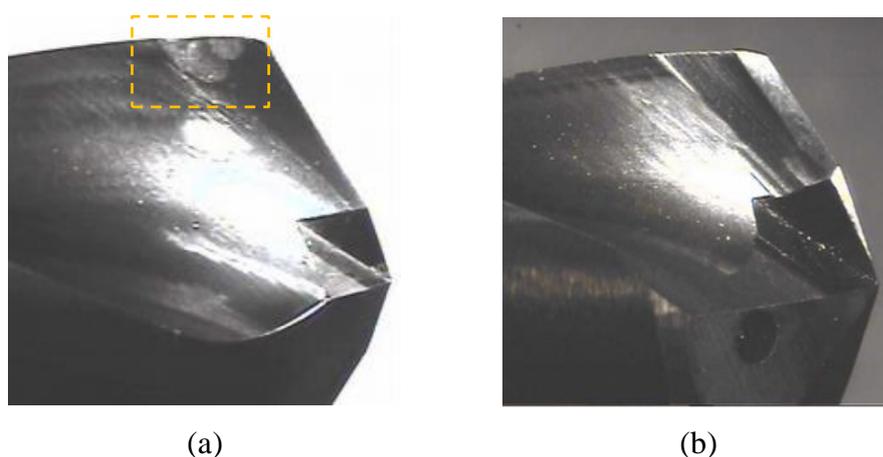


Figura 2.17 – Broca PCD: (a) lascamento na quina da ferramenta convencional aplicando avanço elevado; (b) Ferramenta modificada com design K-land aplicado nas arestas de corte [Garrick et al., 2007].

Katiyar et al., 2016, verificaram o desempenho de materiais de brocas helicoidais (aço-rápido e metal-duro) através da avaliação dos danos causados ao GFRP pelo processo de

furação tais como extração de fibras, fissuras e delaminação. Os melhores resultados foram obtidos com a broca inteiriça de metal-duro (WC-Co) devido as menores falhas causadas sobre as fibras e a menor degradação observada na matriz. Além disso, constataram que as falhas dependem da velocidade de corte que, quando alta, tende a aumentar a temperatura, levando ao aumento de resíduos na superfície do furo.

O processo de furação das juntas simples CFRP/Al utilizando brocas de metal-duro (WC-Co) foi avaliado por Zhang. et al., 2015, em que os autores avaliaram comparativamente duas diferentes geometrias (helicoidal e “Brad & Spur”). Constataram que os melhores resultados foram gerados com a broca “Brad & Spur”, pois a força de avanço (F_f) foi 20% menor (ação centralizadora da broca especial) e os valores de rugosidade também foram inferiores. Ainda para a furação de CFRP/Al, Zitoune et al., 2012, compararam as brocas de WC-Co com nanorrevestimento de AlCrN/Si₃N₄ e sem revestimento. Os autores verificaram que a força de avanço foi reduzida de 10 a 15% com a broca revestida devido à redução do atrito gerado, o que também promoveu uma redução dos valores de rugosidade da parede dos furos; perceberam também o aumento característico de F_f durante a furação do Al em comparação ao CFRP ocorreu devido às diferentes pressões específicas de corte geradas por cada um dos materiais.

Na furação da junta composta Ti/CFRP/Al, Kuo et al., 2014, demonstraram que a broca com ponta em dois estágios (Figura 2.18) oferece maior capacidade de autocentragem, reduzindo a deflexão da ferramenta e garantindo maior precisão do furo. Além disso, os autores relatam que as brocas com menor aresta transversal geram menor força de avanço e reduzidos danos de delaminação.

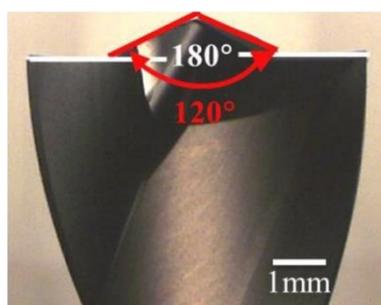


Figura 2.18 – Broca helicoidal com ângulo de ponta de dois estágios (120° e 180°) para furação de Ti/CFRP/Al [Kuo et al., 2014]

Devitte et al., 2021, avaliaram a influência de brocas helicoidais de metal-duro sem revestimento tipos 85C (indicada a furar CFRP, $\sigma = 118^\circ$), 86C (recomendada a furar CFRP/Ti,

$\sigma = 135^\circ$) e H10N (aconselhada a furar Al, $\sigma = 130^\circ$) no fator de delaminação ajustado (F_{da}), na força de avanço (F_f), e na formação de rebarbas na furação a seco da junta composta Al/GFRP/Al. Os autores concluíram que a broca 85C propiciou os melhores resultados.

2.10 Aplicação de Meios Lubrificadores

Como supracitado, o processo de furação de juntas híbridas compósito-metal pode ser considerado um processo complexo devido às diferentes propriedades dos materiais que a compõem, pelos materiais apresentarem diferentes graus de usinabilidade, e por necessitar de ferramentas e procedimentos que possam mesclar as características das operações de corte utilizadas para cada um dos diferentes materiais. Por exemplo, uma característica importante do processo de furação de ligas de titânio que deve ser considerado durante a furação de juntas híbridas compósito-metal é a temperatura na região de corte. Este é o maior obstáculo para brocas de metal-duro, pois os valores aproximam-se de 1000°C devido à baixa condutividade térmica do Ti. Isso influencia diretamente nas propriedades mecânicas da ferramenta (redução da dureza) [Li et al., 2014; Zhang et al., 2008]. Neste contexto, os fluidos de corte são parte importante para o processo de preservação das ferramentas de corte, assim como a manutenção da temperatura evitando a degradação da matriz do compósito [Weinert e Kempmann, 2004].

A furação sem fluido de corte mostra-se adequada para evitar a absorção de umidade pelo FRP (prejudicial as suas propriedades mecânicas), gerando diminuição da vida útil à fadiga e das forças adesivas presentes entre a resina e a fibra [M'Saoubi et al., 2015] além da questão ambiental, que envolve o descarte de resíduos correto pela possibilidade de contaminação do solo, da contaminação de água e potencial risco às pessoas [Ahmed et al., 2016]. Isto leva a erros dimensionais e geométricos, não apenas na furação, mas em todo material. No entanto, a opção a seco resulta em maiores temperaturas na região de corte devido à baixa condutividade térmica do FRP. Neste caso, quando são utilizados baixos valores de avanço (f), ocorre o maior tempo de contato da ferramenta com a peça, gerando aumento de atrito e consequente aumento de temperatura no local [Weinert e Kempmann, 2004].

Os principais benefícios da utilização de fluidos de corte no processo de furação são a menor geração (ação lubrificante) e a maior dissipação (ação refrigerante) do calor gerado, além da quebra e expulsão de cavacos da região de corte (aplicação com alta pressão). Porém, a sua utilização produz um grande impacto ambiental e financeiro. Além disto, a utilização de fluido de corte na furação de juntas híbridas compósito-metal pode contaminar o compósito (como

citado anteriormente), dificultando a realização do processo [Giasin et al., 2016; Pereira et al., 2017; Sharma et al., 2016; Sidik et al., 2017; Weinert et al., 2004]. Entre as possibilidades de desenvolvimento de melhorias na furação de juntas híbridas encontra-se a utilização de meios lubrificantes apropriados ao processo. Os estudos citados a seguir avaliaram algumas técnicas alternativas utilizando MQL (mínima quantidade de lubrificação), fluido em abundância, nitrogênio líquido (LN₂) e ar comprimido (refrigerado ou não) em diversas configurações para aplicações em FRP, metais (Al e Ti), e em juntas simples ou compostas.

2.10.1 Furação de FRP

Hou et al., 2020, analisaram os efeitos de dois diferentes fluidos de corte aplicados em abundância na furação do CFRP em comparação ao corte a seco. Observaram uma significativa redução do desgaste da ferramenta com a presença do fluido. Houve também diminuição da força de avanço (F_f) e da temperatura na região de corte, ficando abaixo da temperatura de transição vítrea da matriz (T_g) (205 °C). Citam ainda a redução da rugosidade da parede dos furos devido à capacidade de reduzir o arrancamento das fibras, causador de danos na superfície dos furos. No entanto, devido à tendência de não se utilizar fluido de corte na usinagem de FRP, seria interessante ampliar a análise no sentido de verificar se houve absorção de umidade pelo material durante o processo.

Khairussima et al., 2013, realizaram avaliação do processo de furação em CFRP utilizando brocas de metal-duro, avaliando-se diferentes velocidades de corte (v_c) e avanço (f), com e sem ar comprimido refrigerado (ACR). Os autores identificaram menores desgastes da ferramenta com a utilização do ACR, além da combinação entre maior v_c e ACR contribuíram para menores delaminações.

Hoffmann et al., 2021, investigaram a delaminação e a rugosidade da parede do furo na furação a seco em CFRP (a 25 °C) e com ACR (a 6 °C). A Figura 2.19 mostra as imagens via MEV das paredes dos orifícios para as execuções usando $v_c = 50$ m/min e $f = 0,025$ mm/volta. Notam-se várias cavidades na furação a seco, bem como o arrancamento das fibras da matriz, com grande variação entre as camadas do laminado. Observa-se uma alta degradação da matriz polimérica na furação a seco, apresentando as fibras expostas sem matriz polimérica. Neste caso, as baixas temperaturas facilitaram a ocorrência de quebra de fibras, pois reduziram sua resiliência sob ar refrigerado. Essas rupturas evitaram o fenômeno de arrancamento, gerando menores valores de rugosidade (o arrancamento da fibra gera cavidades elevadas na superfície). Na furação a seco, o *pull-out* da fibra e a separação fibra-matriz aumentam com a temperatura,

deteriorando a superfície usinada, como mostrado por outros pesquisadores [Abish et al., 2018; Fu et al., 2018b; Hou et al., 2020; Joshi et al., 2018].

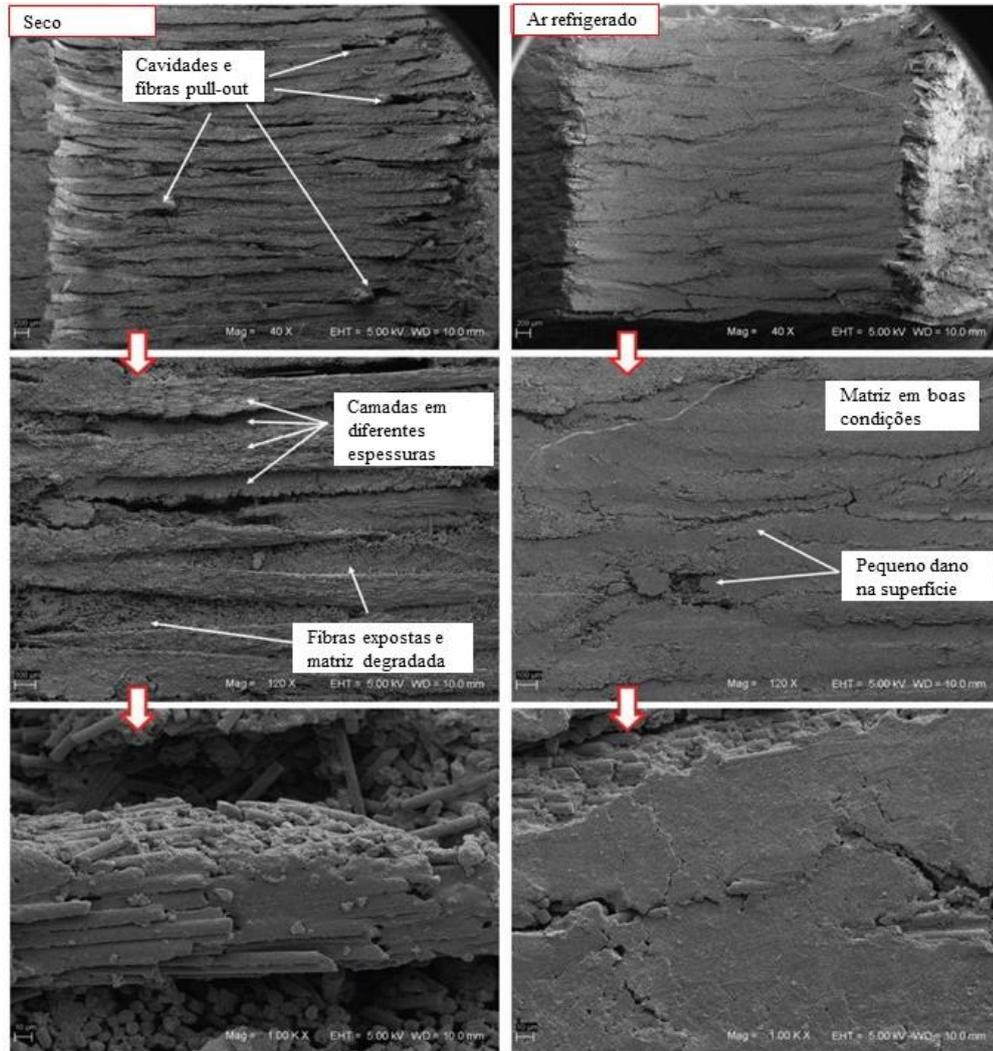


Figura 2.19 – Superfície da parede interna nos primeiros furos para $v_c = 50$ m/min and $f = 0.025$ mm/volta [Hoffmann et al., 2021].

Abish. et al., 2018, avaliaram a rugosidade e a delaminação na furacção de CFRP utilizando ACR (2 °C) em comparação ao corte a seco, além de diferentes combinações de parâmetros de corte (v_c e f). Os resultados mostraram que os defeitos foram influenciados por f , como esperado. Porém, quando utilizados altos valores de v_c e f , combinado com ar refrigerado, a delaminação e a rugosidade reduziram. Esta característica está associada à menor temperatura de processo que melhora as propriedades da matriz durante a operação, resultando assim em menor delaminação.

Joshi et al., 2018, investigaram o efeito da criogenia (LN_2) na força de avanço (F_f), na delaminação e na rugosidade da parede do furo sob diferentes condições de corte durante a furação de CFRP. Concluíram que v_c não afetou F_f na usinagem a seco; entretanto, na furação criogênica, F_f diminuiu com o aumento de v_c . Também com o aumento de v_c , a delaminação primeiro diminuiu e depois aumentou no corte a seco; com LN_2 , a delaminação decresce continuamente. Na furação sob criogenia, a rugosidade da superfície observada foi muito melhor que na furação a seco.

Weinert e Kempmann, 2004, estudaram o efeito da utilização de fluido de corte e da furação a seco em GFRP com brocas de metal-duro sem revestimento. Os autores evidenciaram efeitos positivos durante a utilização do fluido na redução do desgaste da ferramenta. No corte a seco, o desgaste progredia nas arestas de corte (Figura 2.20a). Além disto, com a utilização do fluido de corte, observou-se o aumento das forças em comparação à furação a seco, e atribuíram esta característica ao efeito refrigerante do fluido que previne a perda das propriedades mecânicas da matriz polimérica do compósito (Figura 2.20b).

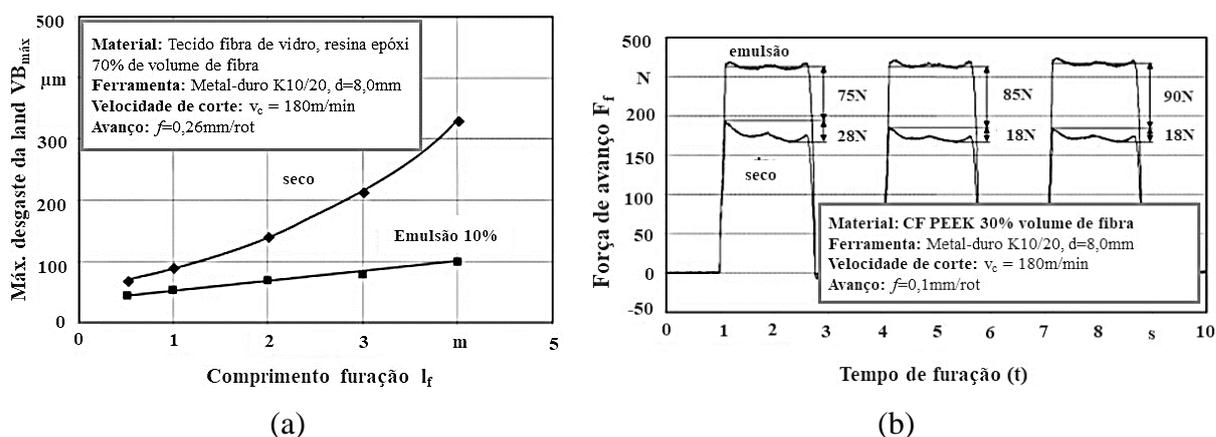


Figura 2.20 – (a) Desgaste no processo de furação à seco e com emulsão; (b) Influência das condições de refrigeração sobre a força de avanço [Weinert e Kempmann, 2004];

De forma geral, são poucos os estudos que abordam a utilização de ACR. No entanto, como visto nos trabalhos anteriormente citados, outros métodos de arrefecimento (como a criogenia) também são encontrados. Contudo, estes ainda possuem custo elevado, além de riscos associados à segurança e manuseio no ambiente de trabalho, possíveis contaminações e corrosões [Abish et al., 2018; Dixit et al., 2012].

2.10.2 Furação de Al e Ti

Davim et al., 2006, avaliaram o processo de furação da liga de alumínio Al 1050 com ferramentas de metal-duro (WC-Co) K10 nas condições a seco, com MQL e com fluido em abundância, sob condições fixas de avanço (f) e velocidade de corte (v_c). Os resultados de acabamento mostraram desempenhos similares entre MQL e fluido abundante. Outra consideração importante dos autores foi a menor rugosidade obtida com o corte a seco em comparação às demais condições devido às maiores temperaturas contribuírem para o fluxo de material na geração dos cavacos, resultando em furos com menor rugosidade. Nam et al., 2011, estudaram a microfuração da liga Al 6061 com a utilização de ar comprimido, óleos puros (de parafina e vegetal) aplicados em MQL e nanofluidos (nanopartículas de diamante com 30 nm dispersos nos mesmos óleos em concentrações de 1% e 2% volume) também em MQL, totalizando sete condições lubrificantes. Os resultados demonstraram que os nanofluidos reduziram a força de avanço (F_f) e o momento torçor (M_t), aumentaram o número de furos realizados e melhoraram a qualidade dos furos durante o processo e em comparação à furação com ar comprimido e MQL puro. No caso, as rebarbas na saída dos furos foram eliminadas e poucos cavacos permaneceram dispersos. Os autores atribuíram estes efeitos a menor adesão de cavacos devido à melhor lubrificação observada com o nanofluido em MQL. No geral, o desempenho do óleo de parafina foi superior ao do óleo vegetal. Em relação à concentração do nanofluido, 1% vol. de nanodiamantes foi mais eficiente no óleo de parafina e 2% vol. no óleo vegetal devido às diferentes propriedades físicas e químicas dos óleos.

Braga et al., 2002, investigaram o processo de furação de liga de alumínio-silício A356 com brocas de WC-Co sem e com revestimento, e aplicando fluido de corte em abundância e em mínima quantidade (MQL). Os autores indicaram que o desempenho do processo (forças, desgastes na broca e qualidade dos furos) foi similar em ambas as condições lubrificantes para as brocas revestidas ou não. Bhowmick e Ahmet, 2008, estudaram a furação da liga de alumínio-silício a seco e com MQL utilizando brocas helicoidais sem revestimento e revestidas com diamante (DLC) em diferentes condições de corte. Demonstraram que o MQL resultou em menor adesão do alumínio sobre os canais das ferramentas, gerando menores forças de avanço no processo em comparação ao corte a seco, independentemente de a ferramenta ter ou não revestimento. Os autores atribuíram estes efeitos à menor formação de aresta postiça de corte (APC) durante a furação com MQL.

Ahmed et al., 2016, investigaram o processo de furação do titânio comercialmente puro Ti-CP Gr.2 (ASTM B265) utilizando broca com insertos de WC-Co revestidos utilizando fluido de corte em abundância e nitrogênio líquido (LN₂) aplicados externamente à broca e variando f e v_c . Foram analisados os efeitos da lubrificação-refrigeração sobre a temperatura na região de corte, a força de avanço, a rugosidade e os desvios geométricos (cilindricidade e circularidade) do furo, desgaste da ferramenta (qualitativo) e a morfologia dos cavacos. A redução da temperatura de corte mostrou-se significativa (até 59%) com a aplicação do LN₂ reduziu o desgaste da ferramenta e aumentou a fragmentação do cavaco. Contudo, a força de avanço, a rugosidade, a cilindridade e a circularidade foram maiores quando utilizado o LN₂.

Zeilmann, 2003, estudou o processo de furação da liga de titânio Ti-6Al-4V com MQL, aplicando-o externa e internamente à broca. O processo demonstrou resultados satisfatórios com o MQL aplicado internamente, onde a qualidade superficial e os cavacos foram semelhantes aos encontrados pelo processo com fluido de corte em abundância também com aplicação interna. Concluiu que o MQL aplicado externamente à broca fica restrito a furos com relação profundidade/diâmetro pequena e limitado a requisitos de qualidade da furação. Como barreira crítica no processo, o aquecimento do titânio sobre a ferramenta foi significativo. Zeilmann e Weingaertner, 2007, estudaram o desgaste de ferramenta de WC-Co classe K10, com e sem revestimento, durante a furação da liga Ti-6Al-4V, com e sem fluido de corte. Os mecanismos de desgaste observados no processo foram adesão e abrasão, além de microlascamentos na aresta transversal e na quina. A aplicação de MQL internamente à broca demonstrou resultados próximos aos obtidos com fluido em abundância. O MQL aplicado externamente não teve desempenho satisfatório. Dentre as dificuldades encontradas, o material aderido na ferramenta devido ao elevado calor gerado no processo foi destacado.

Allegrini, 2014, avaliou a furação do Ti-6Al-4V com brocas helicoidais de aço rápido (HSS) e metal-duro (WC-Co), e diferentes condições de lubrificação-refrigeração (MQL, fluido abundante e a seco). Ambos os fluidos foram aplicados externamente à broca. No planejamento experimental foram definidos três níveis de velocidade de corte e três de avanço. As conclusões mostraram que as brocas de HSS não são recomendadas para furação a seco desta liga. Quando utilizado fluido em abundância, este material de ferramenta pode ser utilizado. Para condição a seco, o autor recomenda a utilização de brocas de WC-Co. Hou et al., 2017, realizaram a avaliação do processo de furação a seco do Ti-6Al-4V. Avaliaram como variáveis de resposta a força de avanço (F_f), a circularidade dos furos, os cavacos formados e a integridade da superfície. Observaram melhor qualidade do processo com a utilização de parâmetros de corte

adequados. A F_f aumentou rapidamente de acordo com o aumento do avanço (f). A circularidade dos furos e o tamanho dos cavacos também foram impactados pelo incremento de f . Em termos de integridade, a subsuperfície apresentou maiores deformações plásticas e maiores tensões em altas velocidades de corte.

2.10.3 Furação de juntas híbridas

Meshreki et al., 2016, realizaram um estudo sobre a utilização de diferentes meios lubrificantes { corte a seco, MQL₁ [alta vazão (400 ml/h) e baixa pressão (1,5 bar)], MQL₂ [baixa vazão (10 ml/h) e alta pressão (4,25 bar)] e abundância } durante a furação da junta simples CFRP/Al. Demonstraram que as diferentes técnicas de lubrificação afetam de maneira distinta a qualidade dos furos e a força de avanço (F_f). As furações a seco e com fluido em abundância produziram furos com baixa delaminação do CFRP. Nenhuma indicação de dano térmico na borda do furo foi observada nas condições testadas. Os autores constataram que a furação com MQL₁ gerou furos com qualidades (tolerâncias e rugosidades) comparáveis à operação com fluido em abundância. Nenhum dano térmico na superfície do furo foi observado nas condições testadas, e os furos produzidos estavam, segundo os autores, em sua maioria livres de delaminação *push-out*. No entanto, o corte a seco produziu maiores desvios dimensionais, especialmente o alumínio.

Giasin e Soberanis, 2017b, avaliaram o impacto da temperatura na furação de GLARE (*Glass Reinforced Fiber-Metal Laminate*) comparando o MQL (vazão de 20 ml/h) e o corte a seco, e aplicando diferentes combinações de parâmetros de corte (velocidade de avanço v_f e rotação n). O GLARE utilizado é composto de camadas de alumínio Al 2024 intercaladas por GFRP. Os resultados mostraram que a temperatura da superfície da peça aumentou com o aumento dos parâmetros, e a orientação da fibra 90°/90° gerou maior temperatura que a orientação 0°/90°. Além disso, o MQL reduziu as temperaturas de usinagem no GLARE em comparação ao corte a seco, e a sua eficiência aumentou com o incremento de v_f devido à melhor lubrificação e à redução do tempo de furação. Em outro trabalho [Giasin e Soberanis, 2017a], os autores compararam a utilização de MQL (vazão de 20 a 60 ml/h) e criogenia (LN₂) na furação de GLARE. Os resultados não mostraram diferenças significativas para furação com MQL e LN₂ nos aspectos superficiais dos furos analisados via MEV. As grandes diferenças foram notadas quando os parâmetros de corte foram modificados. O incremento de v_f aumentou as marcas nas camadas de alumínio, rebarbas intercamadas e deformações nas camadas da fibra

de vidro. O aumento da rotação produziu melhor acabamento nas camadas de fibra de vidro, mas aumentou a formação de resíduos e a adesão de cavacos nas superfícies laminadas.

Brinksmeier and Janssen, 2002, analisaram a qualidade da furação obtida, a força de avanço e a utilização de MQL (comparado ao corte a seco) durante a furação das juntas simples CFRP/Al e composta Al/CFRP/Ti com brocas helicoidais de geometrias diferentes. Concluíram que a utilização de revestimentos em brocas escalonadas e a aplicação interna de MQL diminuem os desvios dimensionais e a rugosidade dos furos obtidos, além de reduzir a taxa de desgaste da ferramenta de corte.

Fernández-Pérez et al., 2019, analisaram a influência de duas vazões de MQL (3 ml/h e 15 ml/h) no desgaste de brocas de metal-duro com revestimento PCD na furação da junta composta Ti/CFRP/Ti. Notaram que os principais mecanismos de falhas nas ferramentas foram o descolamento do revestimento seguido de lascamento. Quando utilizada vazão de 3 ml/h, ocorreu adesão do titânio nas arestas principais e secundária devido ao aumento do coeficiente de atrito e das temperaturas envolvidas. Porém, não foram observadas influências sobre o CFRP. Outra observação foi relativa ao crescimento do consumo de energia elétrica durante o processo com o aumento do desgaste da ferramenta pela adesão de Ti. Além disso, não foram observadas diferenças significativas na qualidade dos furos para as diferentes vazões.

Shyha et al., 2011, avaliaram o diâmetro do furo, a cilindridade, a altura de rebarba, a rugosidade (R_a) e a dureza dos materiais na furação da junta composta Ti/CFRP/Al utilizando brocas de metal-duro com e sem recobrimento, e aplicando MQL externamente e fluido de corte em alta pressão (HPC) internamente. Os melhores resultados foram gerados com HPC em comparação ao MQL (propriedades superiores de resfriamento e melhor acesso à região de corte). A rugosidade foi consideravelmente menor ao usar HPC em comparação com MQL especialmente no alumínio (saída). Altos valores de R_a (até 9 μm) foram obtidos no CFRP (possivelmente devido à separação interlaminar entre as camadas da fibra), enquanto valores menores de R_a foram medidos no titânio (1,0 μm) e no alumínio (0,3 μm). Entretanto, o valor de R_a no alumínio aumentou para 1,5 μm quando o MQL foi empregado (após 64 furos perfurados) (Figura 2.21). Em relação à rebarba, observaram menor altura com HPC; com MQL, as alturas foram maiores que 1 mm. Devido à utilização de metais na entrada e na saída do furo, não foram constatadas grandes delaminações no CFRP, pois serviram de ancoragem para deformações e distorções associadas ao compósito. Observaram alterações de dureza em até 0,2 mm da parede, tanto no Al quanto no Ti, assim como nas zonas afetadas pelo calor, tanto com MQL quanto com HPC.

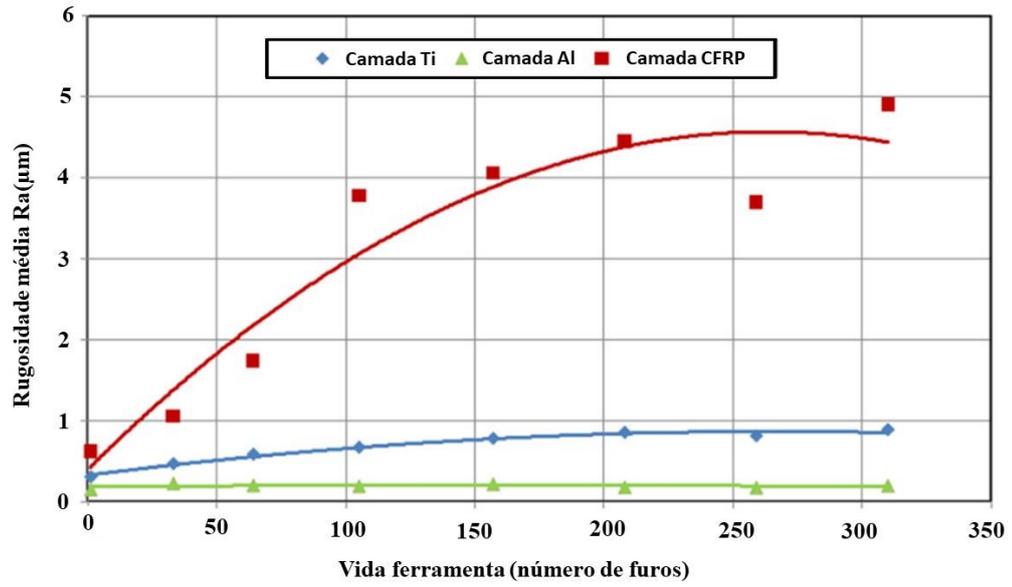


Figura 2.21 – Rugosidade média para furos em diferentes materiais com fluido em abundância [Shyha et al., 2011].

3 PROPOSIÇÃO DA TESE

As atividades da tese foram planejadas e realizadas em três etapas. A Etapa 1 consistiu em um extenso processo de revisão da literatura, onde foram constatadas as oportunidades de desenvolvimento e definiu-se os planos de experimentos. A partir deles, pôde-se elucidar algumas dúvidas como a viabilidade do processo e delinear os experimentos principais. De forma geral, vale destacar alguns aspectos relevantes:

- O fator mais destacado e de maior influência ao longo dos estudos sobre furação de juntas híbridas foi o avanço (f). Outros fatores analisados pelos trabalhos foram a velocidade de corte (v_c), a utilização de lubrificante, a força crítica de delaminação (F_{cr}) e as características relativas à broca.
- Os parâmetros de corte (v_c e f) e os ângulos de ponta das brocas ($\sigma = 118^\circ$ e $\sigma = 135^\circ$) influenciam a delaminação do furo em compósitos poliméricos reforçados com fibras (FRP) devido ao aumento da força de avanço no processo de furação [Abrão et al., 2008; Davim et al., 2007; Durão et al., 2010; Durão et al., 2012; Liu et al., 2012; Marques et al., 2009; Tsao e Hocheng, 2005].
- A influência da velocidade de corte na delaminação do furo em FRP pode ser observada em diferentes configurações: composições de juntas híbridas, tipos de brocas e condições de operação. Para alguns pesquisadores [Davim et al., 2007; Sardinhas et al., 2006], o parâmetro v_c afeta significativamente a delaminação; para outros [Khashaba et al., 2010], não.
- A aresta transversal de corte da broca é responsável por grande parte da força de avanço (F_f) produzida na furação. Assim, a geometria adequada da broca deve ser definida para a produção de furos sem defeitos significativos [Raj e Karunamoorthy, 2016; Srinivasan et al., 2017].
- A furação na direção compósito \Rightarrow metal promove alguns benefícios, como redução da delaminação no FRP devido à menor adesão do metal (Al, Ti) e melhor remoção de cavacos [Wang et al., 2014; Wang et al., 2017; Isbilir e Ghassemieh, 2013; Xu e El Mansori, 2017].
- As temperaturas na região de corte são fortemente dependentes dos parâmetros de corte [Foreman et al., 2010; Sala, 2000; Weinert et al., 2003]. Ao aumentar v_c e f , ocorre o amolecimento térmico do FRP, que pode facilitar a perda de fibras e levar a problemas de estabilidade da matriz. Além disso, outros problemas podem surgir com maior v_c , como aumento da rugosidade e da circularidade dos furos [Rubio et al., 2007]. Sobre o alumínio e titânio, espera-se o aumento da adesão do material sobre as arestas de corte da ferramenta

[Braga et al., 2002; Xu e El Mansori, 2017], além do maior desgaste da ferramenta durante a furação do titânio, impactando sobre os parâmetros de qualidade dos furos, como a circularidade e a rugosidade [Ahmed et.al., 2016].

- A furação em altas velocidades de corte (HSC) utiliza baixo avanço (f) e mostra uma boa capacidade de geração de menores valores de rugosidade, de força de avanço e maior produtividade [Krishnaraj et al., 2012; Kuo et al., 2014; Rawat and Attia, 2009].
- A utilização de fluido de corte em abundância na usinagem de FRP deve ser evitado, pois pode ser absorvido pelo compósito, levando-o a distorções dimensionais, aumento de massa e degradação das propriedades mecânicas [D’Orazio et al., 2017; Weinert et al., 2004]. Por outro lado, o uso de ar comprimido resfriado (ACR) pode reduzir os efeitos térmicos, sem apresentar este problema. Assim, avaliar os efeitos combinados dos parâmetros de usinagem com ACR torna-se essencial na seleção e aplicação em FRP [Hoffmann et al., 2021] e metais [Liu et al., 2013].

Assim, a Figura 3.1 ilustra os fatores que contribuem para a qualidade de furação em juntas híbridas, distribuídos dentro do diagrama de causa e efeito (diagrama de Ishikawa), e baseados nos aspectos supracitados.

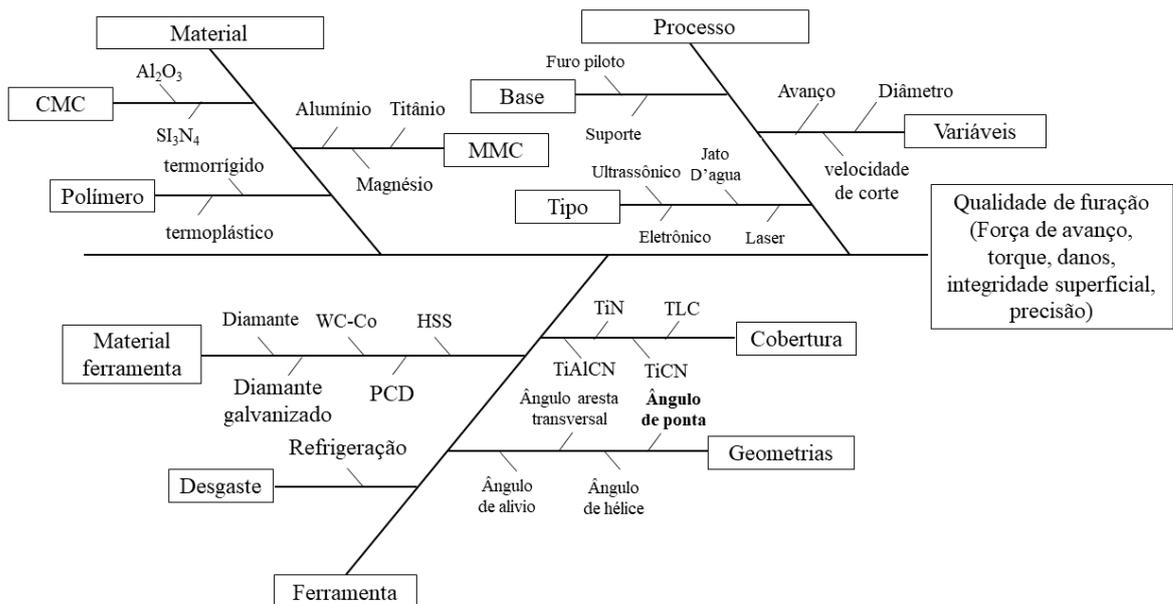


Figura 3.1 – Fatores que afetam a qualidade da furação de juntas híbridas compósito-metal.

Na Figura 3.1, os caminhos relacionados ao material, ao processo e a ferramenta são as causas principais: para o processo de furação, tem-se a aplicação de diferentes parâmetros de

corte e a utilização ou não lubrificação; para a ferramenta, deve-se considerar a influência do material, dos tipos de revestimento, da geometria e das falhas (mecanismos, desgastes e avarias); para os materiais, ponderam-se os tipos de FRP, os metais aplicados, o tipo de junta (simples ou composta) e os defeitos associados.

Dentre os parâmetros considerados relevantes nos estudos, destacam-se o avanço (f), a velocidade de corte (v_c), a lubrificação e o tipo de broca. Quanto à qualidade do furo, deve-se minimizar os defeitos resultantes do processo de furação, destacando a delaminação do compósito (amplamente relacionada com a força de avanço), a formação de rebarbas nos materiais metálicos e os desvios dimensionais e geométricos do furo. Como são possíveis diversas configurações de juntas híbridas compósito-metal, torna-se importante a realização de furos com parâmetros adequados, minimizando os defeitos que possam causar falhas durante a utilização destes materiais. Portanto, optou-se por avaliar, em função dos materiais e recursos disponíveis, o impacto da utilização do ACR em combinação com HSC no acabamento dos furos em juntas híbridas compósito-metal.

A Etapa 2 envolveu o planejamento e a execução de um conjunto de experimentos em juntas multimateriais (FRP e Al 2124) considerando seis variáveis de interesse: tipos de compósito (CFRP e GFRP), geometria de ferramenta (85C e 86C), avanço por rotação (baixo e alto), velocidade de corte (baixo e alto), presença ou ausência de ar comprimido refrigerado e tipo de junta (simples ou composta). Na Etapa 3 foi realizado o experimento em junta simples GFRP/Ti com base nos resultados da Etapa 2 a fim de verificar o impacto do Ti-6Al-4V na furação da junta, visto que esta liga de titânio apresenta características específicas e distintas do Al 2124, que é também amplamente utilizado na indústria.

Os experimentos relativos às Etapas 2 e 3 foram realizados nos laboratórios localizados nas dependências da Universidade do Porto (FEUP-INEGI) e no LAUS (UFRGS). A partir destas definições, com as hipóteses estabelecidas, foi possível elencar as evidências para comprovar as hipóteses levantadas. As análises e os procedimentos experimentais utilizaram os mesmos dispositivos e equipamentos, tanto para os experimentos em FRP/Al e Al/FRP/Al quanto para GFRP/Ti.

4 MATERIAIS E MÉTODOS

As etapas do desenvolvimento da tese são apresentadas pelo fluxograma da Figura 4.1.

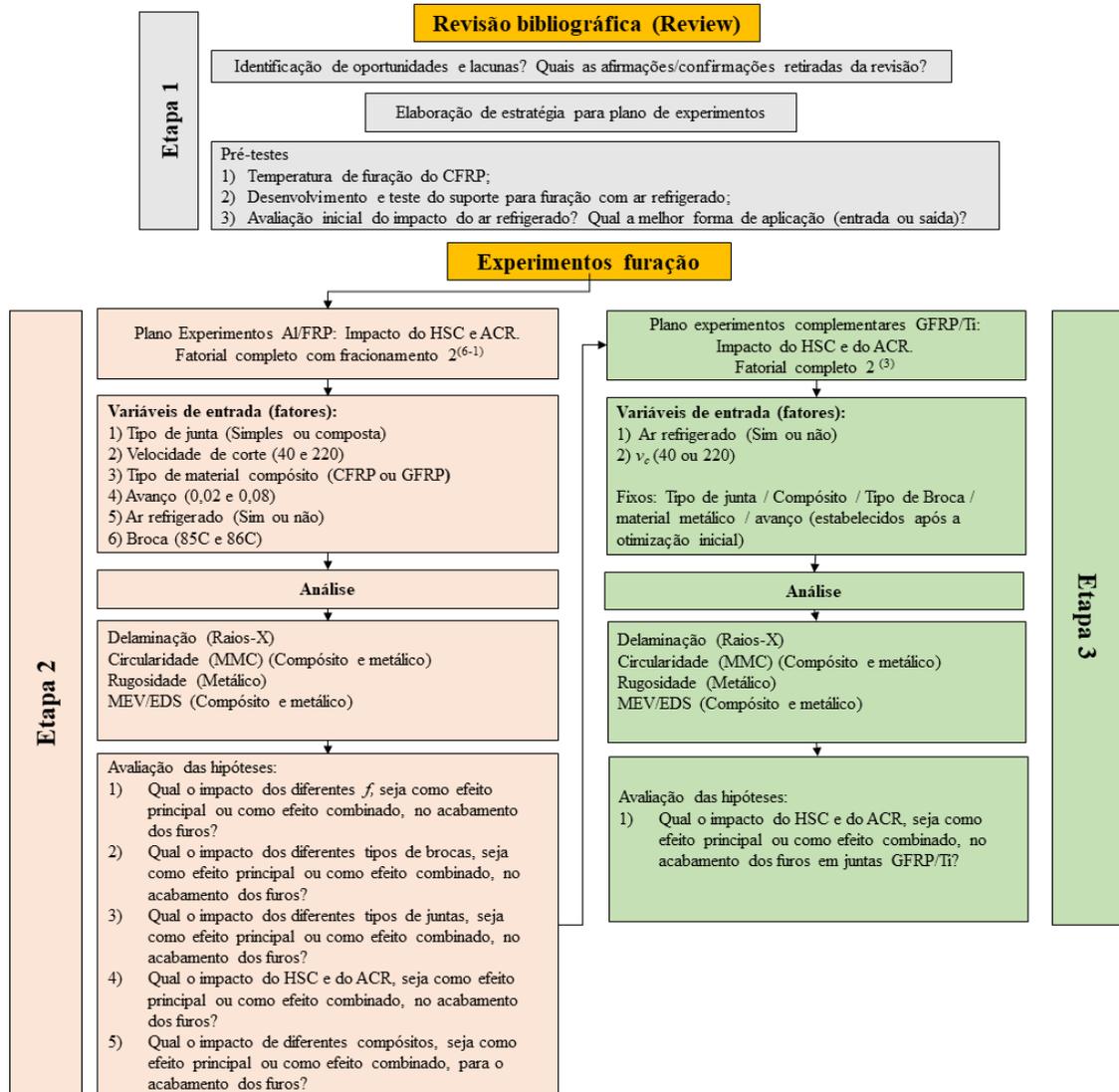


Figura 4.1 – Fluxograma de atividades associadas ao trabalho para avaliação das hipóteses.

4.1 Materiais

As juntas híbridas foram constituídas por polímeros reforçados com fibras (carbono e vidro) e materiais metálicos (ligas de alumínio e titânio).

A fabricação das placas de material polimérico reforçado com fibras foi realizada no Grupo de Estruturas Aeronáuticas da Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo (GEA/EESC/USP). Foram produzidas oito placas (quatro de CFRP e quatro de

GFRP) com dimensões de 280 x 280 mm e espessuras de $(2,1 \pm 0,1)$ mm e $(1,5 \pm 0,1)$ mm, respectivamente, com 10 camadas. Nas placas de CFRP foi utilizado tecido de fibra de carbono unidirecional pré-impregnado com resina epóxi (“prepreg”) (Figura 4.2a) utilizando o processo de moldagem por laminação em bolsa de vácuo. Com isto, obtêm-se camadas mais compactadas para o laminado. Para as placas de GFRP foi aplicado tecido em fibra de vidro unidirecional e resina epóxi (epHoxaL RAL 120/HAL115) (Figura 4.2b) também usando a moldagem manual da resina em bolsa de vácuo. As especificações técnicas dos tecidos estão disponíveis no **Apêndice A.1**. Após sua consolidação, foi realizado o ciclo térmico de cura por estufa com temperatura controlada (Figura 4.2c).

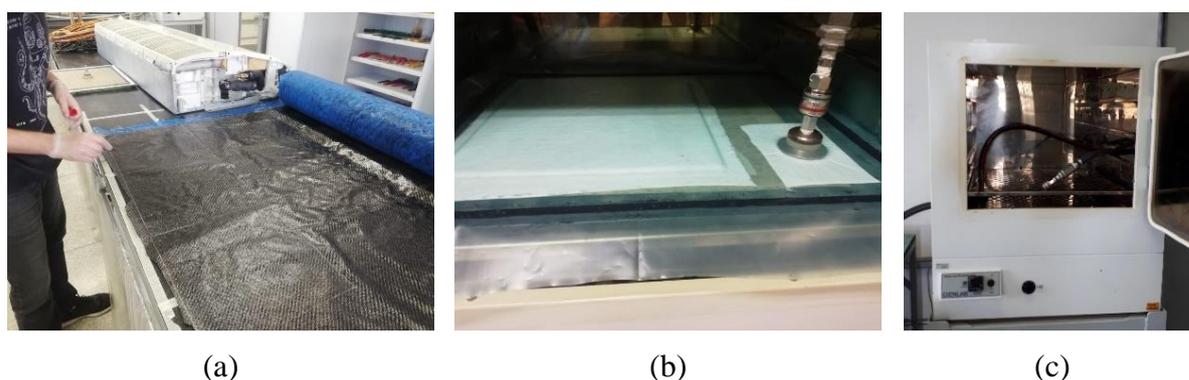


Figura 4.2 – Fabricação do FRP: (a) corte do tecido de fibra de carbono “prepreg” utilizado na fabricação do CFRP; (b) montagem da bolsa de vácuo; (c) estufa para a realização do ciclo térmico de cura.

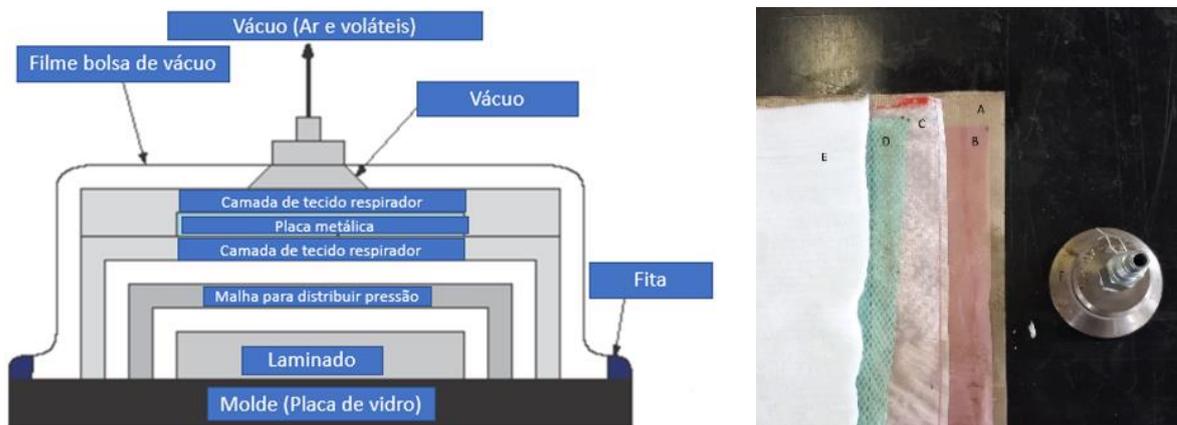
A sequência de materiais utilizados para a moldagem em bolsa de vácuo (Figura 4.3a) e os elementos utilizados no processo de montagem (Figura 4.3b) estão descritos a seguir:

1. Placa de vidro espessa usada como molde para o laminado, prevenindo o empenamento da peça durante o ciclo de cura.
2. Filme de teflon (A) para facilitar a remoção do laminado do molde.
3. Camadas de tecido com resina cada qual com sua orientação de fibras.
4. Filme perfurado (B) para controle do fluxo da resina durante o processo.
5. Filme de polyester *peel-ply* (C).
6. Malha de redistribuição de pressão (D) para homogeneização do vácuo interno da bolsa.
7. Camada de tecido “respirador” (E) para proporcionar a condução de voláteis e do ar preso na bolsa de vácuo até o orifício de pressão (F).
8. Chapa metálica para servir de apoio para a moldagem do laminado.

9. Camada de tecido respirador adicional.
10. Filme da bolsa de vácuo selado.

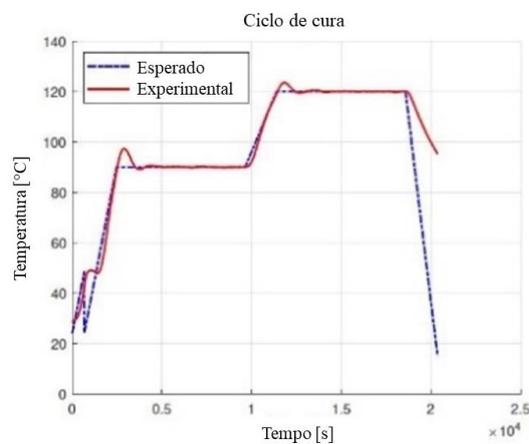
O ciclo de cura adotado para ambos os compósitos está demonstrado na Figura 4.3c:

- Etapa 1 – Rampa de aquecimento A: 30 min da temperatura ambiente até atingir 90 °C;
- Etapa 2 – Rampa de equilíbrio térmico A: 2 h na temperatura constante de 90 °C;
- Etapa 3 – Rampa de aquecimento B: 30 min de 90 °C a 120 °C;
- Etapa 4 – Rampa de equilíbrio térmico B (rampa de cura): 2 h na temperatura constante de 120 °C (temperatura de cura);
- Etapa 5 – Rampa de resfriamento (não controlado): laminado segue de 120 °C até a temperatura ambiente sem o auxílio de estufa, levando o tempo que for necessário.



(a)

(b)



(c)

Figura 4.3 – Moldagem em bolsa de vácuo: (a) sequência de montagem dos elementos do processo de laminação; (b) tecidos e componentes utilizados na montagem; (c) ciclo de cura.

De cada placa foram extraídos 10 corpos de prova retangulares de 250 x 20 mm para serem utilizadas no suporte para furação desenvolvido. Os cortes foram realizados utilizando serramento manual sem utilização de fluido de corte.

As chapas metálicas de ligas de alumínio Al 2124 e titânio Ti-6Al-4V foram doadas com dimensões iniciais de 400 x 400 mm e espessuras de $(4,10 \pm 0,15)$ mm e $(4,0 \pm 0,1)$ mm respectivamente. Tiras metálicas retangulares foram cortadas por jato d'água a alta pressão para evitar a formação de zonas afetadas pelo calor. De cada chapa foram gerados 18 corpos de prova retangulares de 250 x 20 mm. A composição química dos materiais foi obtida pelo método de espectrometria de fluorescência de raios-X no Laboratório de Corrosão, Proteção e Reciclagem dos Materiais (LACOR-UFRGS) utilizando o equipamento Thermo Scientific Niton XL3t. A Tabela 4.1 mostra a composição química para a liga de titânio Ti-6Al-4V em comparação à norma UNS R56200 e a composição química da liga de alumínio Al 2124, comparada à norma ASTM B209. A Tabela 4.2 apresenta as propriedades mecânicas estimadas (Matweb, 2022).

Tabela 4.1 – Composição química das ligas de titânio e alumínio (% massa).

Ti-6Al-4V								
Elemento	Al	V	Fe	Mn	Nb	Ni	W	Ti
Medido	6,68	3,95	0,18	0,08	< 0,001	0,028	0,011	restante
Norma	5,5-6,75	3,3-4,5	< 0,40	< 0,30	< 0,080	< 0,030	< 0,015	restante

Al 2124									
Elemento	Cu	Mg	Mn	Fe	Zn	Si	Ti	Cr	Al
Medido	4,11	1,21	0,56	0,14	0,02	0,19	0,04	0,01	restante
Norma	3,8-4,9	1,2-1,8	0,3-0,9	< 0,30	< 0,25	< 0,20	< 0,15	< 0,10	restante

Tabela 4.2 – Propriedades mecânicas das ligas de titânio e alumínio

Ti-6Al-4V			Al 2124		
σ_{esc} [MPa]	Dureza [HV]	E [GPa]	σ_{esc} [MPa]	Dureza [HV]	E [GPa]
880	349	114	325	137	73

4.2 Máquinas e Equipamentos

As máquinas e equipamentos utilizados na experimentação e na análise dos resultados estão resumidamente demonstrados na Figura 4.4. Na figura estão dispostos os equipamentos, dispositivos e etapas de avaliação necessárias para a obtenção dos dados e posterior análise.

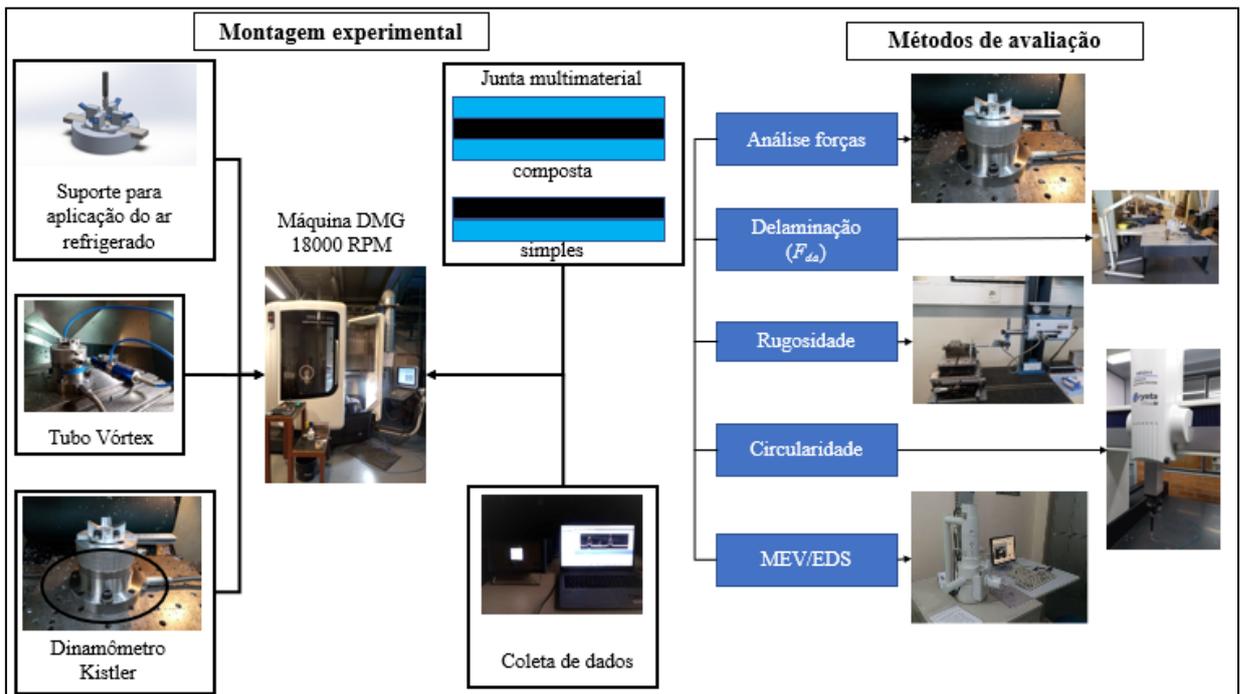


Figura 4.4 – Configuração experimental geral e métodos de avaliação.

A máquina-ferramenta utilizada para a realização dos furos foi o centro de usinagem cinco eixos DMG Mory Seiki DMU eVo com rotação máxima de 18.000 rpm e ano de fabricação 2013. O equipamento está localizado no INEGI (Instituto de Ciência e Inovação em Engenharia Mecânica e Engenharia Industrial) no campus da FEUP (Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto), Portugal.

As ferramentas utilizadas foram brocas helicoidais de metal-duro sem revestimento (classe H10F) Sandvik/Precorps com diferentes ângulos de ponta (σ), ângulo de hélice $\varphi = 27^\circ$ e afiação *split point* (cruzada). Ambas possuem diâmetro de 6 mm, comprimento total de 110 mm, comprimento útil de 45 mm, canais para refrigeração interna. As ferramentas e suas características estão disponíveis na Tabela 4.3. A verificação do batimento (*runout*) das brocas foi realizada em cada troca de ferramenta, e os valores mantiveram-se abaixo de $1,3 \mu\text{m}$.

A fixação dos corpos de prova (juntas híbridas com $250 \times 20 \text{ mm}$) foi realizada em um suporte desenvolvido visando o deslocamento da tira (Figura 4.5), a centralização da furação

(distância entre centros de 15 mm) e a fixação no dinamômetro. Este suporte viabiliza ainda a aplicação do ar comprimido refrigerado (ACR) em múltiplas posições, seja pela entrada ou pela saída do furo. As presilhas superiores permitem a fixação das juntas. O rasgo inferior libera a formação de rebarbas sem deformá-las, caso estejam presentes.

Tabela 4.3 – Especificações das brocas Sandvik®

Série	Precorp	
Tipo	85C	86C
Imagem		
Aplicação principal	CFRP	CFRP + Ti
Aplicação secundária	CFRP + Al	CFRP + Al
σ (ângulo de ponta)	118°	135°

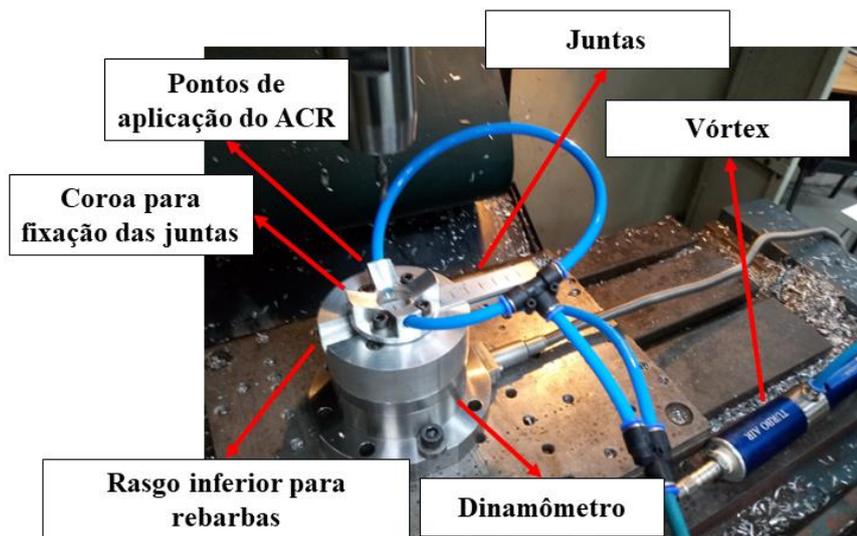


Figura 4.5 – Suporte para realização dos furos nas juntas e aplicação do ACR.

A aquisição de sinais de força foi feita através de um sistema monitor composto pelo dinamômetro piezelétrico Kistler® 9272, pelo condicionador de sinais Kistler 5070A e o computador com placa de aquisição de dados DAQ Measurement Computing® PCIM-DAS 1602/16 (processa até 100 kS/s), além do software Datalogger.

O tubo de vórtice *Eurotools* empregado no resfriamento do ar comprimido possui comprimento de corpo de 250 mm e sistema de fixação magnético. O dispositivo fornece um fluxo de ar de 22,5 m³/h a -10 °C (utilizando 600 kPa de pressão) até 11,2 m³/h a -3 °C (com 300 kPa) O ruído de operação atinge 76 dB com 700 kPa de pressão de ar.

A medição da temperatura do processo foi realizada com um termômetro digital portátil. Durante o experimento, a temperatura e a pressão foram verificadas após cada furação. Nestas, as temperaturas do ACR mantiveram-se entre 0,5 e 2,1 °C e a pressão do fluxo de ar estabilizou-se em 600 kPa. Aguardava-se 120 s entre furações para ocorrer a estabilização da temperatura, e a temperatura ambiente encontrava-se entre 22°C e 26°C durante os experimentos.

4.2.1 Aplicação de radiografia por raios-X

A técnica de análise não-destrutiva utilizada para a verificação dos defeitos internos dos compósitos foi a radiografia por raios-X. A radiografia por raios-X possibilita avaliar a extensão dos danos, defeitos dos furos, trincas e fibras não uniformes. É importante ressaltar que esta técnica não possibilita a identificação da profundidade dos furos, pois a imagem resultante consiste na sobreposição de todos os defeitos observados para a região [Machado, 2012; Mer e Tavares, 2013; Silva, 2016].

O uso de líquido contrastante é necessário porque nem todos os defeitos são visíveis na radiografia, como a delaminação, que não sofre alterações na composição ou quantidade do material que será atravessado pelos raios-X. O contraste deve ter um caráter radiopaco. Os parâmetros de tempo de exposição na solução líquida e tempo de exposição aos raios-X contribuem para o resultado final. O fator de delaminação ajustado (F_{da}) foi resultado do contraste presente nos vazios observados na superfície dos furos. A combinação dos defeitos observados na entrada, na saída e internamente são observados por radiografia [Albuquerque et al., 2010; Machado et al., 2021; Silva et al., 2014].

O procedimento foi realizado com os equipamentos localizados no Laboratório de Ensaio Tecnológicos (LET-FEUP). O equipamento de raios-X Kodak 2100 de 60 kV e 300 kHz (Figura 4.6a) associado ao sensor digital Kodak RVG 5100 System (Figura 4.6b) e este a um computador com o software Kodak Dental Imaging para a aquisição de imagens. Para o contraste foi utilizado o di-iodometano da AnalR NORMATOR. Os insumos e acessórios foram cedidos pelo ISEP (Instituto Superior de Engenharia do Porto, Portugal). As radiografias foram feitas com um tempo de exposição de 0,16 s. Os corpos de prova foram posicionados nas regiões furadas, localizando-se entre o aparelho emissor e o receptor, e as imagens adquiridas

de forma sequencial. O tempo de aquisição foi cerca de 30 s. Todas as imagens foram obtidas na mesma posição e altura, e armazenadas em formato Windows Bitmap (bmp) que, segundo Silva, 2016, não realiza compressões e preserva a resolução original.

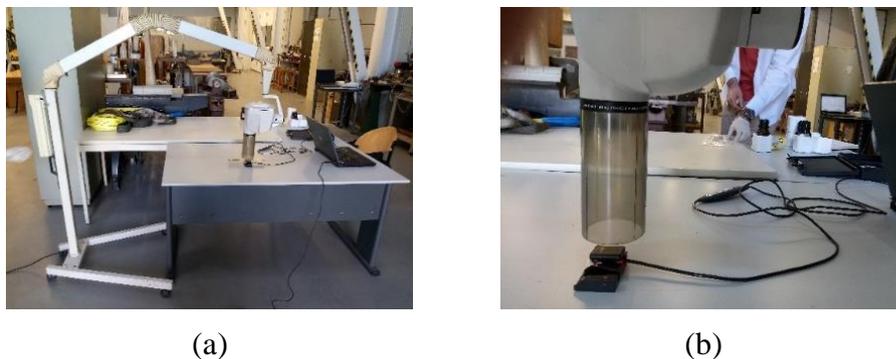


Figura 4.6 – Medição de radiografia por raios-X: (a) emissor de radiação; (b) sensor digital.

4.2.2 Medição da Delaminação

O processamento das imagens contempla a sua obtenção e posterior análise via software. Na avaliação pelo software Matlab R2021, primeiramente, seleciona-se o formato da imagem em bitmap. Depois, com a utilização do *thresholding*, analisa-se o histograma, permitindo encontrar os valores limítrofes e, em seguida, com a rotina *bwtraceboundary*, efetua-se o delineamento da fronteira da delaminação (Figura 4.7c). Posteriormente, calcula-se a área resultante preenchendo o interior da fronteira. Assim, pelo número de pixels e o seu tamanho, pode-se contabilizá-los na imagem [Silva, 2016].

Outro método de verificação é realizado utilizando-se o software ImageJ (domínio público) a partir da imagem radiografada (Figura 4.7a e Figura 4.7b). Ambos os métodos foram testados. A partir disto, optou-se pelas análises utilizando o ImageJ, pois se obteve menor dificuldade de definição do *thresholding*, parte fundamental do procedimento via Matlab, mas suscetível as alterações em função da diferença de tonalidade da imagem. Em contrapartida, o ImageJ, não necessita esta adequação. A partir da imagem segmentada, determinou-se a área afetada pela delaminação, bem como o diâmetro máximo. Assim, as variáveis necessárias para o cálculo de F_d (Eq. 1) e F_{da} (Eq. 3) foram obtidas. A partir da imagem obtida pela radiografia, aplica-se a avaliação dos maiores danos obtidos e da faixa de delaminação observada, caracterizada pela delaminação ajustada [Davim et al., 2007].

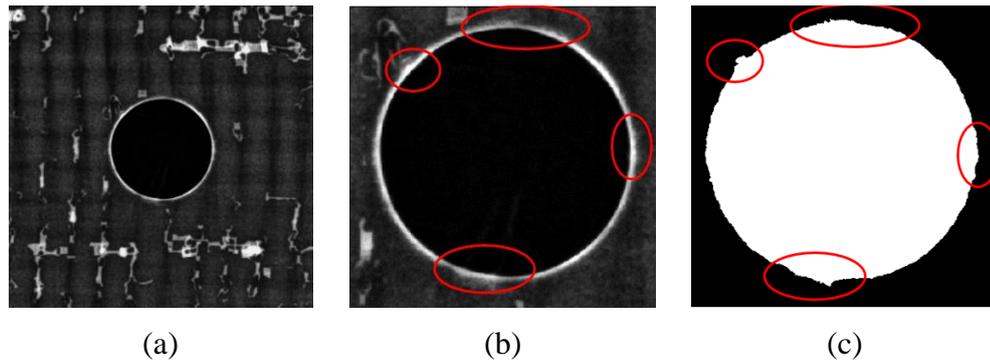


Figura 4.7 – Pontos de interesse na verificação de raios-X: (a) visão geral da região delaminada; (b) pontos de verificação detalhada; (c) projeção binária no Matlab.

4.2.3 Medição de Rugosidade dos Furos

O parâmetro de rugosidade mais utilizado para a caracterização da superfície na maioria dos processos de fabricação é a rugosidade média (R_a). Este parâmetro de amplitude representa o desvio médio aritmético dos valores absolutos das ordenadas de afastamento dos pontos do perfil de rugosidade em relação à linha média, no percurso de medição (l_m). R_a é facilmente aplicável e está presente em praticamente todos os instrumentos de medição de rugosidade; no entanto, como considera a média aritmética, pode ocultar a presença de picos e vales atípicos [Guedes, 2014; ISO 1302, 2002; NBR 4287, 2002; NBR 4288, 2008].

O equipamento utilizado para a medição de R_a foi o perfilômetro Hommelwerke T8000 equipado com o apalpador Hommelwerke TKL300 (raio de ponta de $5 \mu\text{m}$, ângulo de 90° e amplitude $\pm 300 \mu\text{m}$) (Figura 4.8a), disponível no Laboratório de Metrologia e Tribologia Dimensional (CETRIB-INEGI-FEUP). As medições foram realizadas utilizando um comprimento de amostragem de $0,8 \text{ mm}$ e um comprimento de medição de $3 \times 0,8 = 2,4 \text{ mm}$ devido às espessuras das chapas (cerca de 4 mm). Foram realizadas duas medições por furo, com deslocamento de 180° entre um ponto de medição e outro, somente nas chapas metálicas (Al 2124 e Ti-6Al-4V), localizadas nas saídas dos furos realizados nas Etapas 2 e 3. Esta definição ocorreu devido às juntas simples e compostas da Etapa 2 estarem sujeitas ao procedimento e o alumínio estar presente em ambas as condições nestas posições (Figura 4.8b).

4.2.4 Avaliação por Microscopia Eletrônica de Varredura e sonda EDS

A microscopia eletrônica de varredura (MEV) e a espectroscopia por energia dispersiva de raios-X (EDS) foram realizadas no Centro de Microscopia e Microanálise (CMM-UFRGS)

O microscópio utilizado Carl Zeiss AG EVO® 50, com filamento de tungstênio, opera em tensões de 0,2 a 30 kV e resolução de 3 nm na condição com 30 kV. As imagens foram geradas com ampliações de 25x, 50x, 100x, 250x, 1000x e 2500x. A microanálise química por EDS permite identificar materiais e resíduos nas brocas e nas regiões de análise permitindo correlacioná-las ao tipo de elemento gerado na furação.



Figura 4.8 – Aquisição de dados de rugosidade média: (a) perfilômetro e apalpador; (b) exemplo de medição na saída do furo da junta composta (Etapa 2).

4.2.5 Medição da Circularidade

A circularidade é classificada como um desvio de forma macrogeométrico. Para sua verificação, comumente se utilizam máquinas de medição por coordenadas (MMC) [Carlos et al., 2014]. Estes desvios podem ocorrer na seção circular de uma peça em forma de disco, cilindro ou cone. Conforme a norma NBR 6409, 1997, o campo de tolerância de circularidade é limitado na seção de medição por dois círculos concêntricos, que indicam os limites inferior e superior tolerados para o desvio, afastados de uma distância t . A tolerância de circularidade considerada para o processo de furação na qualidade de trabalho até IT8.

A medição da circularidade dos furos nos experimentos foi realizada na empresa Micromazza (Vila Flores, RS) através da MMC Mitutoyo modelo Crysta-Plus M7106, com auxílio do software Geopack V2.4 (Figura 4.9a) que acompanha o equipamento. Foram considerados oito pontos de medição distribuídos ao longo da circunferência de furação para sua determinação (Figura 4.9b). O certificado de calibração do equipamento encontra-se no **Apêndice A.2**, assim como os pontos de medição considerados.

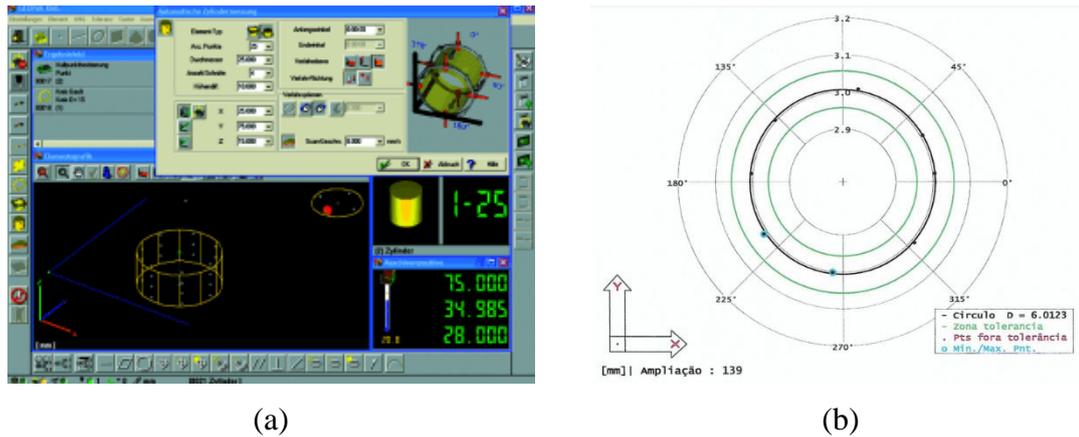


Figura 4.9 – Medição de circularidade dos furos: (a) software Geopak utilizado no procedimento; (b) pontos de medição utilizados para a verificação do desvio.

4.3 Planejamento Experimental

As duas subseções que se seguem exibem o planejamento dos experimentos referentes à furação de diferentes juntas híbridas multimateriais: 1) Furação de juntas GFRP/Al, CFRP/Al e Al/GFRP/Al, Al/CFRP/Al; 2) Furação da junta GFRP/Ti.

4.3.1 Furação de juntas FRP/Al e Al/FRP/Al

Os quatro corpos de prova utilizados nesta etapa foram distribuídos com diferentes combinações. Foram montados em juntas simples e compostas, aplicando a liga Al 2124 e os dois tipos de polímeros reforçados com fibras (GFRP e CFRP) conforme Tabela 4.4.

Tabela 4.4 – Configurações dos corpos de prova

Corpo de Prova	Tipo de junta	Especificação	Espessura (mm)
CP1	Simple	GFRP + Al 2124	5,6
CP2	Simple	CFRP + Al 2124	6,3
CP3	Composta	Al 2124 + GFRP + Al2124	9,7
CP4	Composta	Al 2124 + CFRP + Al2124	10,4

As partes da junta híbrida em tiras foram unidas nas laterais com adesivo instantâneo à base de etil-cianoacrilato (Loctite®) para evitar deslizamento durante o posicionamento e posterior deslocamento no suporte. Após o ajuste no suporte de centralização, as juntas foram posicionadas utilizando o sistema de fixação por parafusos do suporte das tiras. Logo após a furação, o conjunto era deslocado por 15 mm para a realização da nova furação. Como

supracitado, o suporte possui rebaixas inferiores para não obstruir a geração de rebarbas, o fluxo de cavacos e os resíduos de furação.

A Figura 4.10 apresenta as análises realizadas e os corpos de prova com as diferentes combinações, e a Tabela 4.5 os fatores de interesse considerados no experimento.

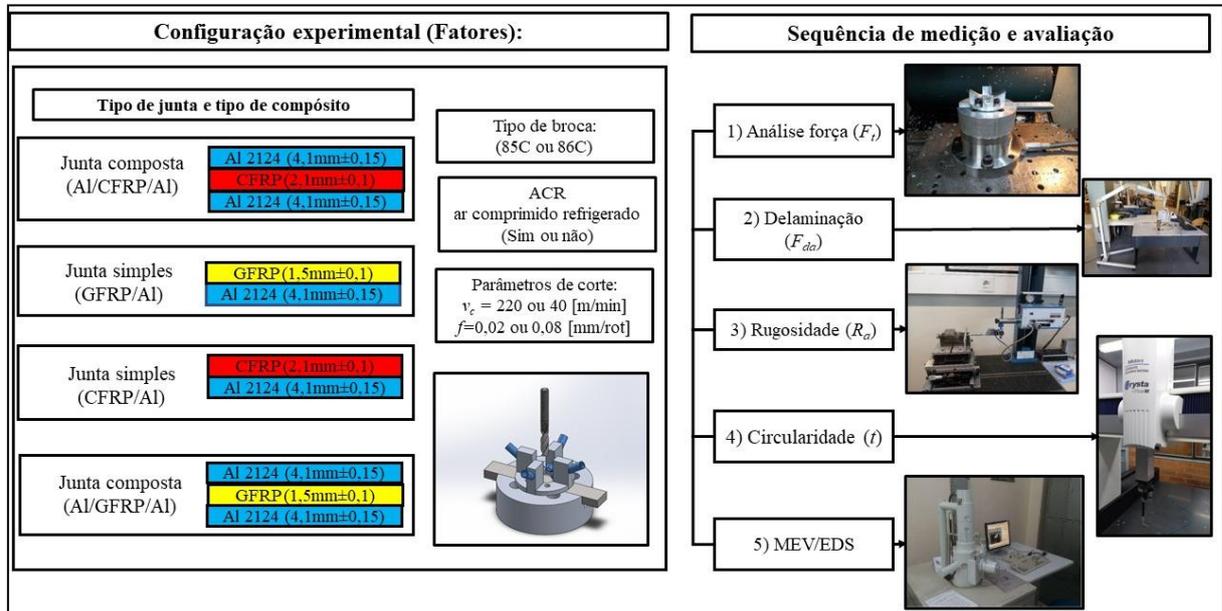


Figura 4.10 – Configuração experimental e análises realizadas.

Tabela 4.5 – Níveis dos parâmetros de entrada utilizados nos experimentos.

Parâmetro	Nível baixo (-1)	Nível alto (+1)
Velocidade de corte (v_c)	40 m/min	220 m/min
Avanço (f)	0,02 mm/volta	0,08 mm/volta
Tipo de compósito (ct)	GFRP	CFRP
Tipo de junta (jt)	Simplex (SJ)	Composta (CJ)
Tipo da ferramenta (tt)	85C	86C
Ar comprimido refrigerado (ca)	Sim (S)	Não (N)

- Velocidade de corte (v_c). Este parâmetro baseou-se no estudo preliminar [Devitte et al., 2021] que demonstrou, para a otimização do processo, 40 m/min como sendo a v_c indicada para aplicação em juntas multimateriais. Assim, a HSC (220 m/min) foi também testada visando avaliar seus efeitos sobre as juntas.
- Avanço por rotação (f). Foi evidenciado pelos pré-testes e por outros pesquisadores [D’Orazio et al., 2017; Zhu et al., 2017; Zitoune et al., 2016] que os menores defeitos são

observados com menores níveis de f . Isto justificou a utilização de valores distintos (0,02 e 0,08 mm/volta), porém próximos, que resultassem em diferentes modos de observação.

O delineamento de experimentos (DOE) utilizou o método estatístico fatorial fracionado 2^{k-1} , com repetição. A análise de variância (ANOVA), com intervalo de confiança de 95%, utiliza na avaliação o valor- $P \leq 0,05$ para fatores significativos. O plano de experimentos contempla seis variáveis de entrada em dois níveis cada, considerando duas execuções (E1 e E2), resultando em 64 furos (32 para cada réplica). A Tabela 4.6 exibe os parâmetros de entrada para cada furo realizado. O delineamento foi realizado com auxílio do software Minitab® 19, considerando a aleatoriedade no sequenciamento da execução dos furos, visando minimizar os erros residuais e aumentando assim a confiabilidade do experimento.

Tabela 4.6 – Combinações para os parâmetros de entrada.

Furos		v_c (m/min)	f (mm/volta)	ct	Jt	tt	ca
E1	E2						
1	33	220	0,08	CFRP	SJ	85C	N
2	34	40	0,08	GFRP	CJ	85C	S
3	35	220	0,02	GFRP	SJ	85C	N
4	36	220	0,08	CFRP	CJ	86C	N
5	37	220	0,08	GFRP	SJ	85C	S
6	38	40	0,02	CFRP	SJ	86C	S
7	39	220	0,08	GFRP	CJ	86C	S
8	40	40	0,08	CFRP	CJ	86C	S
9	41	40	0,02	GFRP	SJ	85C	S
10	42	40	0,02	GFRP	SJ	86C	N
11	43	220	0,08	CFRP	SJ	86C	S
12	44	220	0,02	CFRP	CJ	85C	N
13	45	220	0,02	CFRP	CJ	86C	S
14	46	220	0,08	GFRP	SJ	86C	N
15	47	40	0,02	CFRP	SJ	85C	N
16	48	40	0,08	CFRP	SJ	86C	N
17	49	40	0,08	GFRP	SJ	86C	S
18	50	220	0,02	CFRP	SJ	85C	S
19	51	220	0,02	GFRP	CJ	85C	S
20	52	40	0,02	GFRP	CJ	86C	S
21	53	40	0,08	CFRP	CJ	85C	N
22	54	40	0,08	GFRP	CJ	86C	N

Furos		v_c (m/min)	f (mm/volta)	ct	Jt	tt	ca
E1	E2						
23	55	220	0,02	GFRP	SJ	86C	S
24	56	40	0,08	GFRP	SJ	85C	N
25	57	40	0,08	CFRP	SJ	85C	S
26	58	40	0,02	CFRP	CJ	85C	S
27	59	220	0,02	GFRP	CJ	86C	N
28	60	40	0,02	CFRP	CJ	86C	N
29	61	220	0,02	CFRP	SJ	86C	N
30	62	40	0,02	GFRP	CJ	85C	N
31	63	220	0,08	GFRP	CJ	85C	N
32	64	220	0,08	CFRP	CJ	85C	S

As variáveis de saída (ou de resposta) foram escolhidas devido à sua relevância em outras pesquisas com estas configurações de juntas e definidas por força de avanço (F_f), rugosidade da parede do furo (R_a), circularidade do furo (t) e fator de delaminação ajustado (F_{da}). Após a ANOVA (avaliação dos efeitos principais e das combinações dos fatores de entrada sobre as variáveis de saída), foi realizada a otimização dos parâmetros em função dos resultados observados, categorizando cada resposta como menor-é-melhor. Além disso, o coeficiente de determinação (R^2) para cada variável de interesse foi gerado para a determinação do ajuste dos dados. Por fim, foram realizados três furos com cada condição otimizada.

4.3.2 Furação da junta GFRP/Ti

Após a otimização dos experimentos da etapa anterior, na qual foram avaliados os seis fatores controláveis de entrada (Tabela 4.5), optou-se por verificar a junta híbrida formada pelo polímero reforçado com fibra de vidro e pela liga de titânio. Assim, corpos de prova retangulares (250 x 20 mm) foram constituídos por placas de GFRP com ($1,5 \pm 0,1$) mm de espessura também unidas nas laterais por adesivo instantâneo (Loctite®) às tiras de Ti-6Al-4V com ($4,0 \pm 0,1$) mm de espessura. Após a centralização, as juntas foram ajustadas no sistema de fixação por parafusos do suporte. Após cada furação, os corpos de prova eram deslocados 15 mm para efetuar nova furação.

Os experimentos foram planejados para avaliar o impacto do ar comprimido refrigerado (ACR) e da furação em alta velocidade de corte (HSC) da junta simples GFRP/Ti. Com exceção de ca (sim ou não) e v_c (40 e 220 m/min) os demais fatores de entrada (baseados nos resultados

da otimização) foram mantidos fixos. A Figura 4.11 resume a experimentação e as variáveis a serem analisadas.

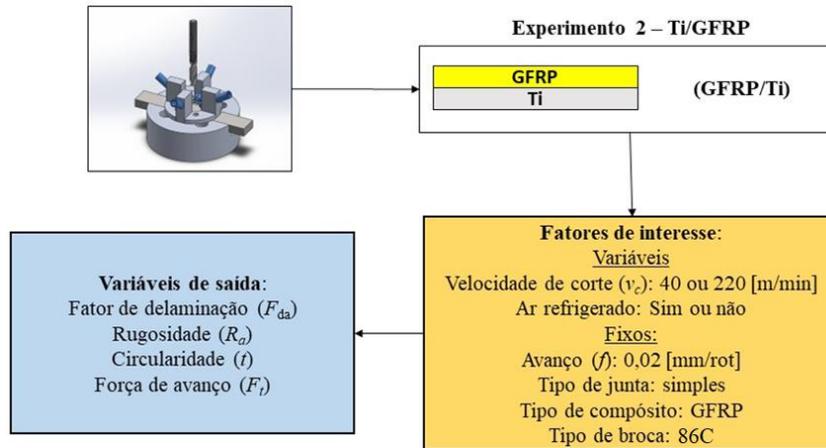


Figura 4.11 – Fatores de interesse e variáveis de saída da experimentação 2 (furação da junta híbrida GFRP/Ti).

A partir disto, foi estabelecida a sequência de execuções aleatorizada via Minitab® 19 (Tabela 4.7) para a minimização dos níveis de ruído associados ao experimento. Foram consideradas duas variáveis em dois níveis cada, com uma repetição, totalizando oito execuções. O intervalo de confiança foi mantido em 95% (fatores significativos para valor- $P \leq 0,05$). Por fim, a otimização realizada buscou o formato da resposta menor-é-melhor para as variáveis de resposta consideradas nos experimentos. Novamente, o coeficiente de determinação (R^2) para cada variável de resposta (rugosidade, circularidade, força de avanço e fator de delaminação ajustado) foi determinado.

Tabela 4.7 – Sequência de experimentos definida para a avaliação da composição GFRP/Ti.

Furo	v_c (m/min)	ACR
H1	220	N
H2	40	N
H3	220	N
H4	220	S
H5	40	S
H6	220	S
H7	40	S
H8	40	N

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

As seções que se seguem apresentam os resultados e as respectivas discussões referentes à influência do ar comprimido refrigerado (ACR) e da alta velocidade de corte (HSC) na furação de diferentes juntas híbridas multimateriais.

5.1 Efeito de HSC e ACR na Furação de Juntas FRP/Al e Al/FRP/Al

A análise dos resultados foi concentrada na avaliação dos diferentes impactos dos fatores controláveis de entrada sobre as variáveis de resposta do processo de furação de juntas simples e compostas. Tais variáveis foram apresentadas em quatro subseções: 1) força de avanço (F_f), 2) rugosidade média (R_a), 3) circularidade do furo (t) e 4) fator de delaminação ajustado (F_{da}). A subseção 5 apresenta a avaliação das brocas utilizadas quanto a possíveis desgastes, e na subseção 6 buscou-se determinar os parâmetros que minimizem as variáveis de saída do processo.

5.1.1 Força de avanço e fator de delaminação ajustado

A Tabela 5.1 mostra os efeitos dos fatores principais e das interações entre os fatores de entrada sobre a força de avanço (F_f). Dentre os fatores principais, apenas o tipo de compósito (ct) não foi influente para um nível de significância $\alpha \leq 0,05$. Vale salientar que o elevado coeficiente de determinação ($R^2 = 99,1\%$) mostra que o modelo de estimação se adapta muito bem aos dados.

Tabela 5.1 – Valor-P para os efeitos principais e combinados para a F_f .

Fatores principais	Valor-P	Interações entre os fatores	Valor-P
avanço (f)	< 0,001	tipo de junta (jt) x ACR (ca)	0,002
tipo de ferramenta (tt)	< 0,001	tipo de compósito (ct) x ACR (ca)	0,017
ACR (ca)	< 0,001	velocidade de corte (v_c) x tipo de ferramenta (tt)	0,002
tipo de junta (jt)	< 0,001	tipo de compósito (ct) x tipo de ferramenta (tt)	0,032
velocidade de corte (v_c)	0,002		
$R^2 = 99,1\%$			

A Figura 5.1 ilustra os gráficos dos efeitos principais sobre F_f . Considerando os fatores significativos, o avanço (f) é indicado por diversos pesquisadores como o de principal influência [Durão et al., 2010; Durão et al., 2012; Shyha et al., 2009].

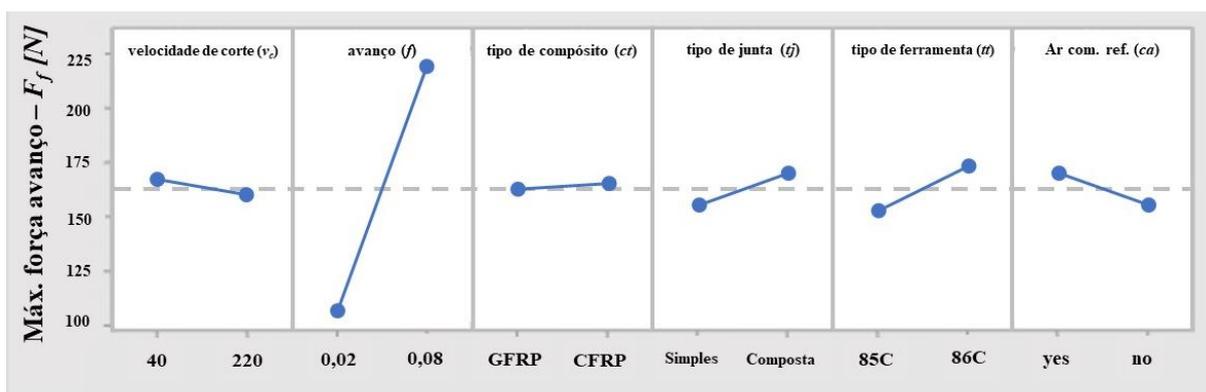


Figura 5.1 – Gráfico dos efeitos principais sobre a força de avanço.

Na análise da força de avanço (F_f), observa-se o menor valor obtido para a condição de furação com o menor valor de avanço ($f = 0,02$ mm/volta). Os ângulos de ponta das brocas 85C e 86C possuem diferentes áreas de contato durante o processo de furação, o que pode influenciar na F_f [Akhil et al., 2017; Lazar et al., 2011; Liu et al., 2012; Velaga e Cadambi, 2017]. No caso, a menor força ocorreu com a broca 85C ($\sigma = 118^\circ$). O tipo de junta (simples ou composta) possivelmente sofreu grande influência devido ao aumento significativo da pressão específica de corte com a presença de duas camadas de metal [Fernandez-Pérez et al., 2019; Zitoune et al., 2012]. O ar comprimido refrigerado (ACR) favorece a fragilização dos FRP e pode auxiliar na remoção dos cavacos pelos canais da broca, gerando menores obstáculos para o avanço durante o corte [Abish et al., 2018; Hoffmann et al., 2021; Hou et al., 2021; Joshi et al., 2018; Xu et al., 2013; Wang et al., 2019]. No entanto, tende a provocar o endurecimento no alumínio, dificultando a usinagem e aumentando a pressão específica de corte devido ao menor aumento de temperatura gerado pelo ACR [Biermann e Iovkov, 2015; Kumar et al., 2016; Santos et al., 2016; Zitoune et al., 2012]. Por fim, o efeito da velocidade de corte (v_c) também foi significativo, onde a diminuição do F_f com $v_c = 220$ m/min possivelmente ocorre pela menor adesão do alumínio nas arestas da broca. Com $v_c = 40$ m/min, a adesão gera aresta postiça de corte (APC) e diminui a capacidade de corte da ferramenta, contribuindo para lascamentos e possíveis falhas das ferramentas. Quando se utiliza HSC, a APC não é identificada [Diniz et al., 2014]. A constatação da redução da força de avanço (F_f) quando utilizados menores valores de avanço em combinação a maiores velocidades de corte foi observada por Phadnis et al., 2012.

De acordo com Kumar e Sing, 2017, a força de avanço (F_f) e a delaminação estão intimamente interligadas; um aumento nessa força induz ao aumento no fator de delaminação, reforçando a necessidade de se obter baixos valores de F_f .

Para os efeitos combinados sobre F_f , a interação $jt \times ca$ promove diferenças de pressão específica de corte originadas por deformações associadas possivelmente à geração de rebarbas pela chapa superior e pelas cargas compressivas das chapas metálicas. Por outro lado, existe a contribuição do ACR em facilitar a remoção dos cavacos e elementos que causem interrupções no movimento da ferramenta [Zhang et al., 2015; Zitoune et al., 2012]. No caso da interação $ct \times ca$, esta pode contribuir para a redução da delaminação do compósito devido à ruptura das fibras promovida pela redução da resiliência sob ACR, evitando o arrancamento de fibras e gerando superfícies mais coesas após a furação [Abish et al., 2018; Fu et al., 2018b; Hoffmann et al., 2021; Hou et al., 2020; Joshi et al., 2018]. Para a interação $v_c \times tt$, o efeito pode estar associado aos diferentes ângulos de ponta das brocas (118° e 135°) que tendem a afetar a força de avanço (F_f), além das diferentes velocidades de corte utilizadas influírem sobre F_f . Segundo a ANOVA, os fatores isolados são significativos, e a combinação pode gerar efeitos térmicos sobre as propriedades dos materiais [Akhil et al., 2017; Khashaba et al., 2010; Kumar e Sing, 2017; Velaga e Cadambi, 2017]. Por fim, a interação $ct \times tt$ é influenciada por diferentes forças críticas de delaminação (F_{cr}) que podem influenciar nas maiores cargas axiais, além do efeito dos ângulos de ponta das brocas [Khashaba et al., 2010; Kumar e Sing, 2017; Wong et al., 2008; Xu e El Mansori, 2016; Xu et al., 2016].

Na análise do fator de delaminação ajustado (F_{da}), foram consideradas as medições nos polímeros reforçados com fibras (GFRP e CFRP). Pela Tabela 5.2, os fatores principais com efeitos significativos (intervalo de confiança de 95%) sobre F_{da} foram a velocidade de corte (v_c), o tipo de compósito (ct) e o tipo de junta (jt). O coeficiente de determinação (R^2) foi 77,93%, mostrando boa correlação entre os valores estimados pelo modelo os dados obtidos experimentalmente. A Figura 5.2 ilustra os gráficos dos efeitos principais sobre F_{da} .

Tabela 5.2 – Efeitos principais e combinados para o fator de delaminação ajustado (F_{da}).

Fatores principais	Valor-P	Interações entre os fatores	Valor-P
velocidade de corte (v_c)	< 0,001	avanço (f) x tipo ferramenta (tt)	0,004
tipo de compósito (ct)	< 0,001	avanço (f) x tipo compósito (ct)	0,008
tipo de junta (jt)	< 0,001	tipo de compósito (ct) x tipo de ferramenta (tt)	0,009
		tipo de compósito (ct) x tipo de junta (jt)	0,041
$R^2 = 77,93\%$			

A maior v_c (220 m/min) promove maior F_{da} em comparação à menor v_c (40 m/min). Isto pode ser associado ao atrito gerado na interface ferramenta-peça pelo aparecimento no FRP de

regiões com sobreaquecimento (queimas superficiais) [Gaitonde et al., 2008; Rawat e Attia, 2009]. Isto é indesejável para o material devido à proximidade com a temperatura de transição vítrea da matriz do compósito, o que reduz sua estabilidade e durabilidade [Davim et al., 2007; D’Orazio et al., 2017; Malacarne et al., 2019; Merino-Perez et al., 2016; Phadnis et al., 2012].

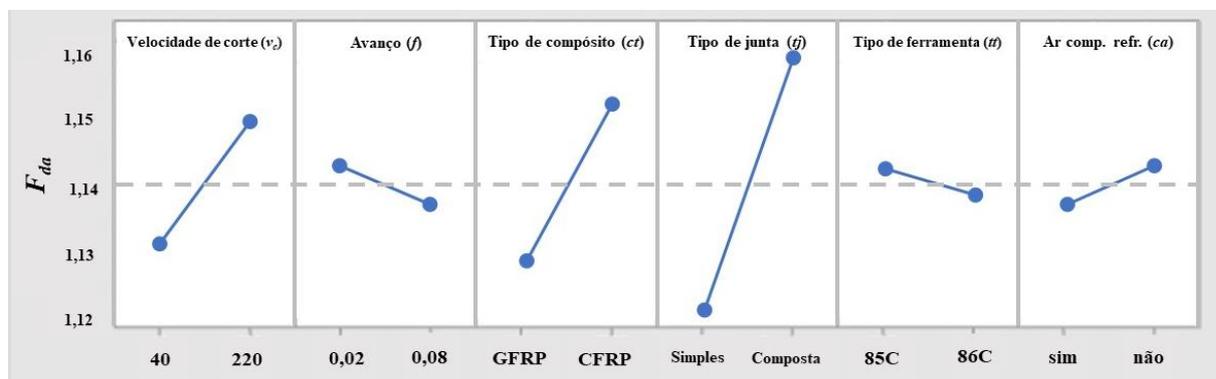


Figura 5.2 – Gráfico dos efeitos principais sobre F_{da} .

O F_{da} produzido no GFRP é significativamente menor que o gerado no CFRP. Este comportamento era esperado, pois obtêm-se níveis de defeitos de delaminação diferentes para cada FRP. A resistência associada ao tipo de fibra utilizado e as diferenças para a força crítica de delaminação (F_{cr}) relacionadas aos compósitos são distintas, podendo associá-las aos danos (maiores e menores) devido à dependência da tenacidade à fratura em relação à espessura do material e do tipo de resina, sendo maior para o GFRP.

Para o tipo de junta, observam-se menores danos de delaminação nas justas simples em comparação às compostas. Isto pode ser associado com a presença de rebarbas na saída do material metálico (liga de alumínio Al 2124), posicionadas na entrada do furo, que exercem carga compressiva sobre o FRP e aumentam a quantidade de defeitos. Dentre os tipos característicos de rebarba (chapéu, coroa e uniforme) apresentados por Ko e Lee, 2001, as do tipo coroa podem ser consideradas as mais difíceis de remover, podendo necessitar de processos de usinagem posteriores (rebarbação), gerando aumento de custos ao processo.

Os efeitos associados ao avanço ($f = 0,02$ mm/volta e $f = 0,08$ mm/volta), ao tipo de ferramenta (brocas 85C e 86C), e ao ar comprimido refrigerado (ACR sim ou não) não foram significativos sobre F_{da} . Notou-se que os valores de delaminação são similares independentemente do tipo de broca utilizada. Contudo, observam-se menores defeitos de delaminação com a utilização de maior avanço (0,08 mm/volta) combinado com ACR.

Para as interações de dois fatores, quatro combinações mostraram-se significativas (valor- $P \leq 0,05$): avanço (f) \times tipo ferramenta (tt), avanço (f) \times tipo compósito (ct), tipo de compósito (ct) \times tipo de ferramenta (tt), e tipo de compósito (ct) \times tipo de junta (jt).

Na interação $f \times tt$, nota-se que ao utilizar $f = 0,08$ mm/volta (maior espessura de corte), a delaminação aumenta com a broca 85C e diminui com a broca 86C. Entretanto, com $f = 0,02$ mm/volta, a situação se inverte: menor F_{da} para a broca 85C e maior F_{da} para broca 86C. Estas diferenças podem ser atribuídas às diferenças nos ângulos de ponta das ferramentas (118° e 135°) por ocasionarem diferentes formatos de defeitos. No caso, o corte das fibras é facilitado pela broca 86C (maior ângulo σ), combinado ao sentido das fibras no FRP (0° e 90°), pois fica mais próximo do melhor ângulo de corte para as fibras (45°) [Hou et al., 2020; Kumar et al., 2017; Park et al., 2014]. Outra contribuição está associada com as forças de avanço distintas geradas pelos dois avanços, como demonstrado por outros pesquisadores [Carlos et al., 2014; Kumar e Sing, 2017; Malacarne et al., 2019; Shyha et al., 2009; Silva et al., 2014].

Na combinação $f \times ct$, o maior avanço na furação de CFRP, promove aumento do F_{da} ; contudo, na furação de GFRP, ocorre a diminuição do F_{da} . Esta característica pode ser associada a suscetibilidade do FRP ao contato entre a ferramenta e o material, contribuindo para menores efeitos de arrancamento das fibras e da matriz do compósito do GFRP em comparação ao CFRP [Khashaba et al., 2010; Khashaba, 2013; Merino-Pérez et al., 2016; Ramirez et al., 2014]. Além disto, pode demonstrar a menor incidência da delaminação sobre o GFRP por ter menor carga crítica de delaminação (F_{cr}) em comparação ao CFRP. Para o GFRP, o limite é atingido com menores valores de carga, promovido pelo menor f . Quando aumentam os valores de f , os valores das cargas axiais aumentam e as delaminações tendem a se propagar com maior facilidade, aumentando o F_{da} [Carlos et al., 2014; Davim e Reis, 2005; Hocheng e Tsao, 2006; Kuo et al., 2014; Lachaud et al., 2001; Rubio et al., 2007; Shyha et al., 2009].

A interação $ct \times tt$ mostra o aumento da delaminação quando se modifica o compósito (de GFRP para CFRP), independentemente da broca utilizada. No entanto, na furação de CFRP, a maior delaminação é observada quando se utiliza a broca 86C.

Para a combinação $ct \times jt$, o F_{da} obtido quando se utiliza GFRP, seja em juntas simples ou compostas, é menor que o F_{da} observado quando se aplica CFRP. Como supracitado, isso pode estar associado com a força crítica de delaminação, que no CFRP é maior que no GFRP. Esta diferença proporciona maior qualidade na furação do GFRP devido à estabilidade da matriz em suportar e transferir cargas durante o corte das fibras [Carlos et al., 2014; Davim e Reis, 2005; Kuo et al., 2014; Lachaud et al., 2001; Rubio et al., 2007; Shyha et al., 2009].

A Figura 5.3 mostra os gráficos da interação do ar comprimido refrigerado (ACR) com os fatores principais e os seus efeitos sobre o fator de delaminação ajustado (F_{da}).

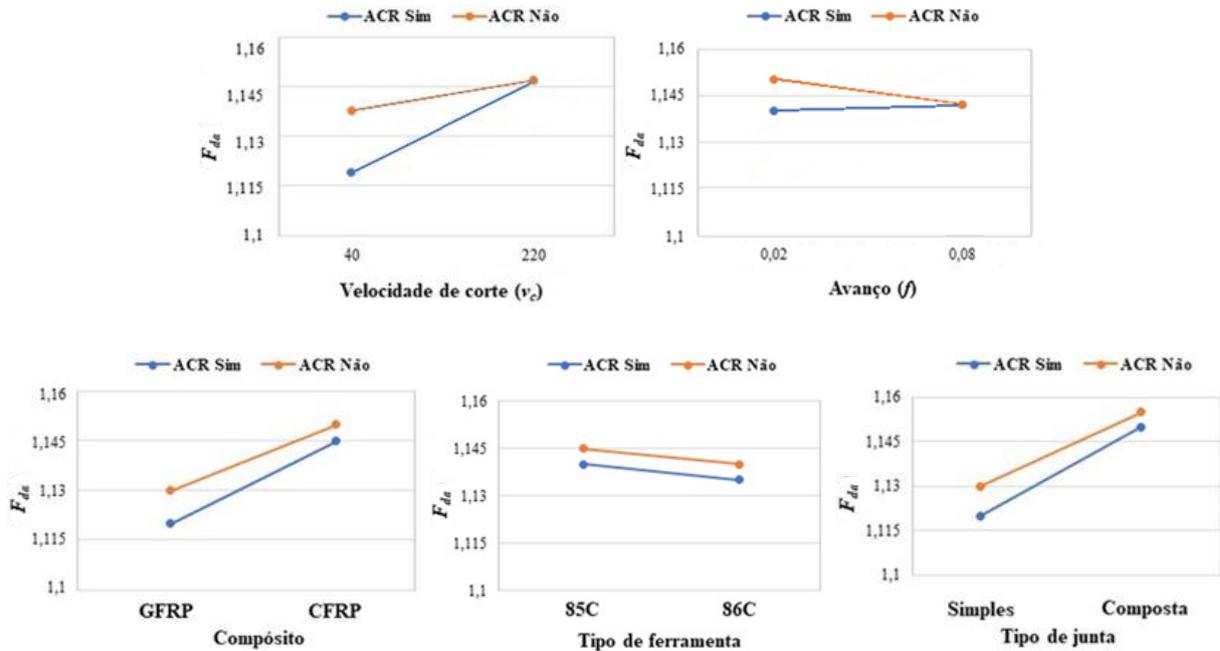


Figura 5.3 – Gráfico dos efeitos principais para o F_{da} na interação com ACR

Mesmo o efeito de ca (presença ou ausência de ar comprimido refrigerado) não ter sido significativo sobre o fator de delaminação ajustável, observa-se uma tendência de diminuição do F_{da} com a presença do ACR para todas as situações analisadas (com exceção das condições com HSC e $f = 0,08$ mm/volta, em que a refrigeração não interfere e os valores são próximos).

Isto pode estar relacionado com os efeitos térmicos causados na matriz dos compósitos, que podem aprimorar a sua integridade e o acabamento dos furos na presença de temperaturas menores. Isto facilita a fratura das fibras, evitando o arrancamento e contribuindo para menores delaminações [Hoffmann et al., 2021; Khashaba et al., 2010; Khashaba, 2013; Lachaud et al., 2001; Merino-Pérez et al., 2016; Ramirez et al., 2014]. Sendo assim, a presença do ACR na furação contribui para a diminuição da temperatura de contato ferramenta/matriz e tem, como consequência, a maior estabilidade do material durante o processo de corte. Nesse caso, a eficácia da remoção de calor na furação (ferramenta, material e cavaco) reduz os efeitos da alta temperatura na matriz e nas fibras [Qi et al., 2021]. Isto pode estabilizar o contato entre ferramenta e material, proporcionando cortes regulares com o ACR em comparação ao processo sem ACR (cortes irregulares). Como consequência ocorre o aumento da variação superficial,

resultando em aumento da rugosidade e delaminação sem o ACR [Fu et al., 2018a; Lachaud et al., 2001; Weinert e Kempmann, 2004].

Os impactos na redução na delaminação estão condizentes com os obtidos por Abish et al., 2018, e Hoffmann et al., 2021, no processo de furação do CFRP. Além disso, Joshi et al., 2018, evidenciaram a influência positiva da baixa temperatura na redução da delaminação, em consonância com o observado nos resultados. Apesar de serem temperaturas criogênicas, os autores concluíram que a delaminação diminuiu gradualmente com a redução da temperatura.

A Figura 5.4 mostra o aspecto superficial do furo 43 (junta simples CFRP/Al e broca 86C) em comparação ao do furo 64 (junta composta Al/CFRP/Al e broca 85C), ambos furados com $v_c = 220$ m/min, $f = 0,08$ mm/volta e ACR. Embora a broca 86C tendesse a reduzir F_{da} , essa comparação foi selecionada porque o tipo de ferramenta (tt) não foi significativo para um intervalo de confiança de 95%.

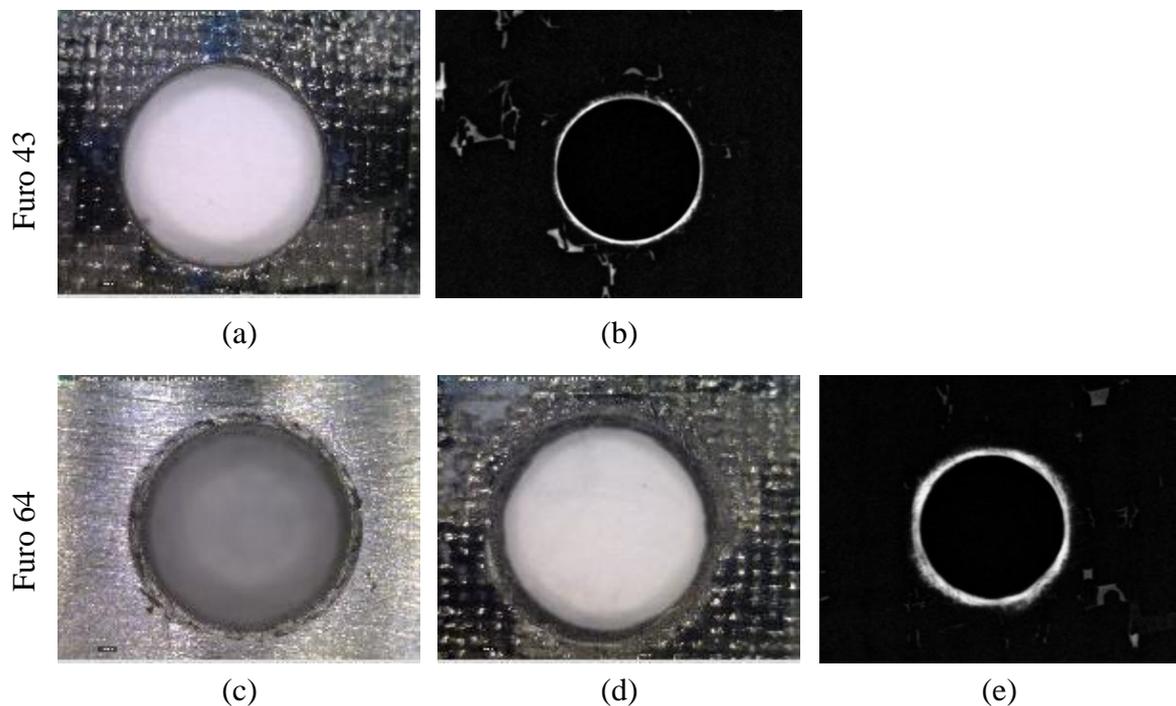


Figura 5.4 – Imagens dos furos: (a) aspecto superficial do compósito no furo 43 (junta simples); (b) radiografia do compósito no furo 43 (junta simples); (c) aspecto superficial do alumínio no furo 64 (junta composta); (d) aspecto superficial do compósito no furo 64 (junta composta); (e) radiografia do compósito no furo 64 (junta composta).

Observa-se pelas imagens que os danos no CFRP são menores na entrada direta do furo 43 (Figura 5.4a) em relação à entrada no CFRP do furo 64 (Figura 5.4d) após furar a primeira

chapa metálica. Por consequência, o F_{da} é significativamente maior em juntas compostas quando comparadas a juntas simples devido à carga compressiva exercida pela rebarba na saída da chapa superior de alumínio, que acaba sobrecarregando o compósito. A deformação plástica ocorrida pela formação da rebarba acaba danificando o compósito, aumentando os defeitos na região do furo [Davim et al., 2007; Shyha et al., 2009]. Em muitas situações, estes efeitos são ocasionados por rebarbas no formato indesejado, como indicado por diversos autores [Ballou et al., 2007; Ko et al., 2001; Qin et al., 2014; Silva et al., 2009]. A radiografia do furo no CFRP (Figura 5.4b) demonstra o impacto reduzido no compósito no entorno da circunferência do furo 43, sem danos significativos na superfície (Figura 5.4a). A formação da rebarba observada na saída da chapa metálica do furo 64 (Figura 5.4c) interfere na região da entrada do compósito, promovendo danos na sua superfície (Figura 5.4d). Isto acaba promovendo danos significativos no entorno da circunferência observados pela radiografia do furo do CFRP (Figura 5.4e).

A Figura 5.5 ilustra as imagens obtidas por MEV dos furos 43 e 64 no CFRP.

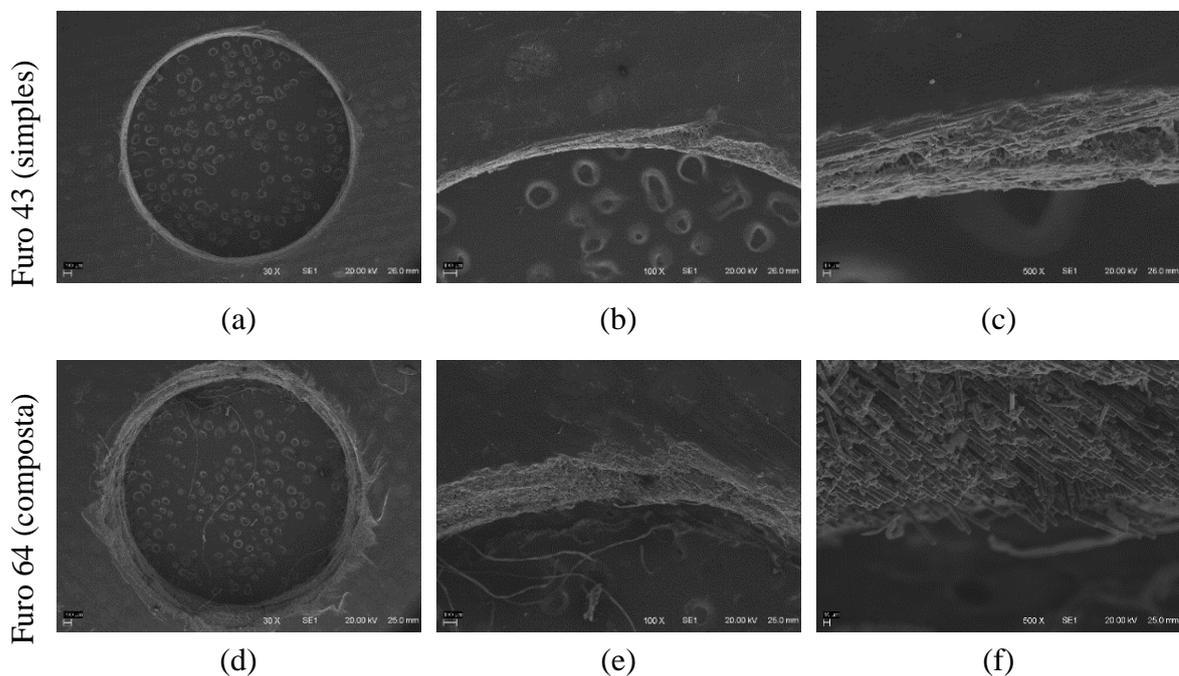


Figura 5.5 – Aspecto superficial do CFRP via MEV: a) furo 43 (aumento 30x); b) furo 43 (aumento 100x); c) furo 43 (aumento 500x); d) furo 64 (aumento 30x); e) furo 64 (aumento 100x); f) furo 64 (aumento 500x).

Na avaliação da superfície de entrada do furo 43 ($F_{da} = 1,12$) não são observadas falhas superficiais pronunciadas (Figura 5.5a). A região do contorno do furo mostra-se regular (Figura

5.5b,c). Quando analisado o mesmo efeito na entrada do furo 64 ($F_{da} = 1,24$), são observados múltiplos defeitos no entorno da superfície do furo, gerando marcas superficiais sobre o compósito (Figura 5.5d) no contorno do furo (Figura 5.5e) e no corte das fibras e matriz (Figura 5.5f). Com isto, ficam identificadas falhas caracterizadas pelo rompimento de fibras e pela degradação da matriz, possivelmente originadas pelas rebarbas na saída dos furos metálicos nas juntas compostas [Montoya et al., 2013].

A Figura 5.6 exhibe o aspecto superficial via imagens MEV para a saída dos furos 3 (GFRP com ACR) e 50 (CFRP sem ACR) após a furação da junta simples (FRP/Al) utilizando $v_c = 220$ m/min, $f = 0,02$ mm/volta e broca 85C. A visão geral do furo 50 (Figura 5.6d), com $F_{da}=1,11$, demonstra o formato das fibras na circunferência (Figura 5.6e), confirmadas pelo corte regular das fibras do CFRP (Figura 5.6f).

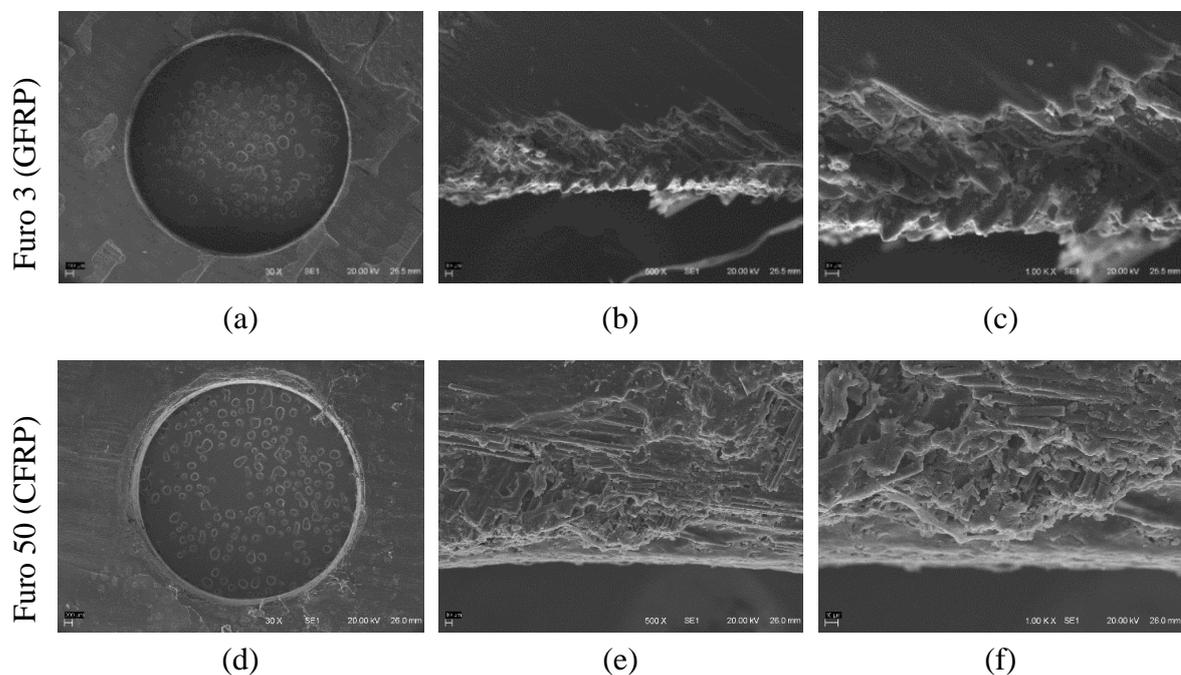


Figura 5.6 – Aspecto superficial do FRP via MEV: a) furo 3 (aumento 30x); b) furo 3 (aumento 500x); c) furo 3 (aumento 1000x); d) furo 50 (aumento 30x); e) furo 50 (aumento 500x); f) furo 50 (aumento 1000x).

Na comparação do furo 50 com o furo 03 (GFRP com $F_{da} = 1,13$), a partir da visão geral (Figura 5.6a), observa-se, em detalhe, as fibras na circunferência e o corte irregular (Figura 5.6b), além da degradação da matriz (Figura 5.6c), denotando as diferenças entre as características dos compósitos (fibra, matriz e forças críticas de delaminação) associadas a cada

um dos materiais. Esta observação pode ser atribuída ao maior contato da extremidade da ferramenta com a superfície da junta, que prejudica a integridade do compósito e resulta em maior fragmentação e degradação térmica. Estes resultados de delaminação foram semelhantes aos obtidos por diferentes pesquisadores [Gaitonde et al., 2008; Merino-Perez et al., 2016]. Embora o ar comprimido refrigerado gere a tendência de redução para o F_{da} , esta comparação foi selecionada pois o ACR não foi significativo, considerando o valor- $P \leq 0,05$.

5.1.2 Rugosidade média e circularidade dos furos

Foram consideradas as medições abrangendo apenas o furo na liga de alumínio Al 2124. Conforme a Tabela 5.3, os fatores principais considerados significativos sobre a rugosidade média (R_a) foram a velocidade de corte (v_c), o avanço (f) e o tipo de ferramenta (tt). A aplicação de baixa v_c , a utilização de alto f e/ou o emprego da broca 86C ($\sigma = 135^\circ$) tendem a gerar menores valores de R_a (Figura 5.7).

Tabela 5.3 – Efeitos principais e combinados para a rugosidade (R_a).

Fatores principais	Valor-P	Interações entre os fatores	Valor-P
velocidade de corte (v_c)	< 0,001	velocidade de corte (v_c) x avanço (f)	< 0,001
avanço (f)	< 0,001	velocidade de corte (v_c) x tipo de ferramenta (tt)	0,002
tipo de ferramenta (tt)	0,008		
$R^2 = 78,31\%$			

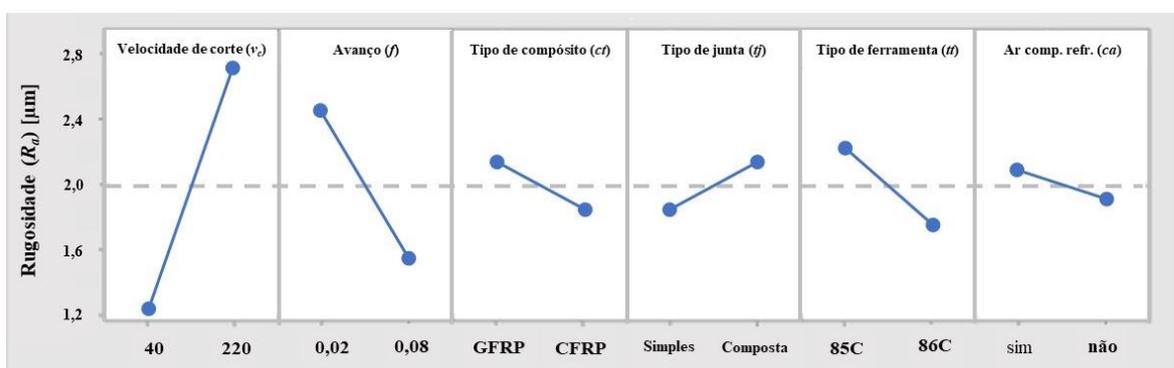


Figura 5.7 – Gráfico dos efeitos principais sobre a rugosidade média.

O alumínio possui alta ductilidade, e a utilização de baixo avanço (f) tende a formar cavacos longos e contínuos. Estes cavacos tendem a ter dificuldade para sair do furo, prejudicando o acabamento [Diniz et al., 2014; Santos et al., 2016]. Para facilitar a quebra e o

escoamento do cavaco (geração de cavacos curtos e rígidos), deve-se aumentar a espessura de corte. Isso pode ser conseguido pelo incremento de f e/ou do ângulo σ (equivalente a $2 \cdot \chi_r$) [Diniz et al., 2014; Stemmer et al., 2005; Kumar et al., 2016]. Além disso, maiores velocidades de corte tendem a aumentar a temperatura, produzindo também cavacos mais longos [Biermann e Iovkov, 2015; Kishawy et al., 2005; Rivero et al., 2006; Roy et al., 2009; Zaghbani e Songmene, 2009; Zhu et al., 2020; Zitoune et al., 2010] e favorecendo o desgaste da ferramenta [Santos et al., 2016; Zitoune et al., 2012].

A interação $v_c \times f$ se mostrou significativa, aumentando a rugosidade para ambos os avanços com o incremento de v_c . Entretanto, a rugosidade obteve menor crescimento com $f = 0,08$ mm/volta em relação ao $f = 0,02$ mm/volta. O mesmo ocorre para a interação $v_c \times tt$: a rugosidade aumenta com o maior v_c (220 m/min), independentemente do tipo de broca, e o menor incremento com a broca 86C. Como citado na seção 2.3, à medida que v_c aumenta, geralmente há crescimento na taxa de deformação do alumínio no plano de cisalhamento, aumentando a temperatura de furação [Kishawy et al., 2005; Rivero et al., 2006; Roy et al., 2009; Santos et al., 2016; Zaghbani e Songmene, 2009; Zhu et al., 2020; Zitoune et al., 2010], gerando cavacos longos e incentivando o desgaste da broca. Após a ANOVA, observou-se um coeficiente de determinação (R^2) relativo à rugosidade média (R_a) de 78,31%.

Mesmo não apresentando influências significativas sobre a rugosidade (pois a análise foi realizada na chapa metálica), observa-se na figura que o tipo de compósito (CFRP), o tipo de junta (simples) e a ausência de ACR também favorecem a rugosidade da parede do furo.

A Figura 5.8 mostra as imagens obtidas por MEV do furo 59 ($v_c = 220$ m/min e Al/GFRP/Al) e do furo 10 ($v_c = 40$ m/min e GFRP/Al) na entrada da parte inferior da chapa metálica com ferramenta 86C e $f = 0,02$ mm/volta. Ao analisar o aspecto superficial, observam-se diferenças pronunciadas na qualidade dos furos. Como o tipo de junta não foi significativo, optou-se por realizar a avaliação dos furos com diferentes velocidades de corte (v_c). Em termos de irregularidades superficiais, qualitativamente, notam-se diferenças e pontos irregulares quando se compara o furo 59 (maiores sulcos e pontos irregulares) em comparação ao furo 10 (superfície mais coesa e regular). Isto fica demonstrado com os valores de R_a obtidos nestas condições (respectivamente 3,06 μm e 1,59 μm). Alguns autores justificam estes resultados pela presença de microlascamentos e queimas superficiais nas ferramentas [Kilickap, 2010; Kuo et al., 2014; Montoya et al., 2013], e pela facilidade de escoamento do cavaco de alumínio [Diniz et al., 2014; Santos et al., 2016; Zitoune et al., 2012].

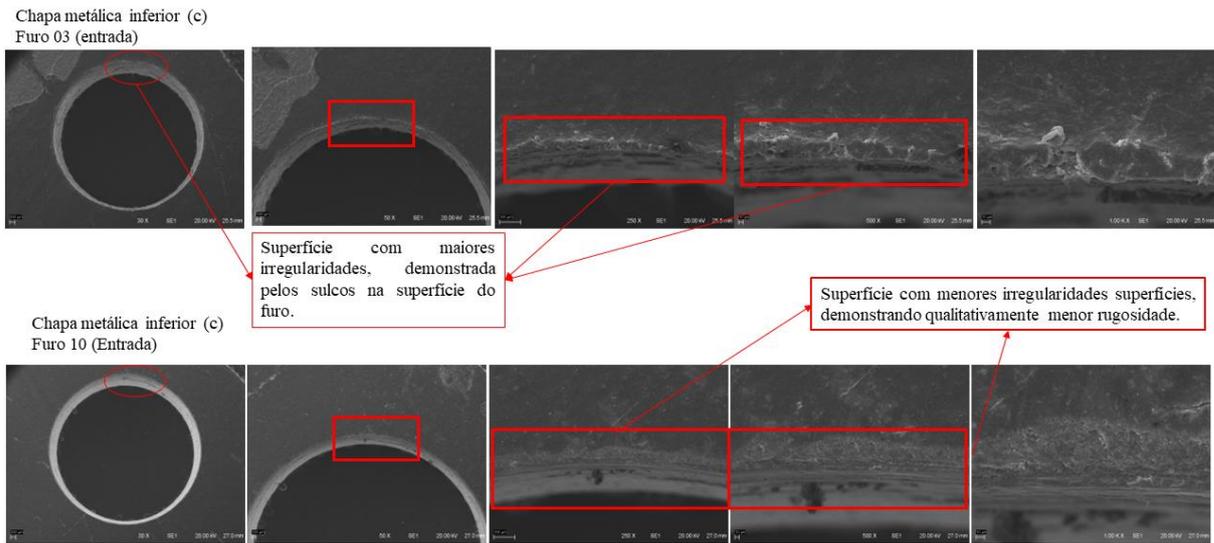


Figura 5.8 – Comparativo por MEV da rugosidade superficial e das irregularidades na entrada dos furos 03 e 10 na entrada da chapa de alumínio.

A análise da circularidade dos furos foi dividida entre compósito e o metal. Nas juntas compostas, foi considerado o valor mensurado da chapa metálica inferior da junta, para efeito de comparação com as juntas simples. A Tabela 5.4 apresenta os efeitos principais e combinados para a circularidade (t) dos furos nos materiais da junta.

Tabela 5.4 – Efeitos principais e combinados para a circularidade dos furos (t).

Metal (t_{metal})		Compósito (t_{comp})	
Fatores principais	Valor-P	Interações entre os fatores	Valor-P
velocidade de corte (v_c)	0,005	tipo de junta (jt)	<0,001
avanço (f)	0,038	tipo de compósito (ct)	0,011
		tipo de junta (jt) x tipo de compósito (ct)	<0,001
$R^2 = 47,92\%$		$R^2 = 60,44\%$	

Para a chapa metálica, os fatores principais velocidade de corte (v_c) e avanço (f) foram considerados significativos (valor-P $\leq 0,05$) sobre a circularidade no furo do alumínio (t_{metal}) com coeficiente de determinação relativamente baixo ($R^2 = 47,9\%$). Isto representa que as variações de t_{metal} são parcialmente aleatórias e também explicadas pelas variações de outros fatores (controláveis ou não) além de v_c e f . Ao mesmo tempo, o tipo de junta (jt), tipo de compósito (ct) e a interação $jt \times ct$ influenciaram significativamente a circularidade no furo do compósito (t_{comp}), que apresentou $R^2 = 60,4\%$. No caso, as variações de t_{comp} são razoavelmente

explicadas pelas variações de jt , ct e $jt \times ct$. Fontes de ruído relacionados às variáveis não controláveis de entrada podem resultar em maior variabilidade de resíduos, afetando a repetitividade [Ribeiro e ten Caten, 2011]. Entre eles, a progressão de desgastes na ferramenta que, apesar de não expressiva, pode ter contribuído para o aumento dos resíduos. No entanto, optou-se por apresentar os resultados nas análises.

A Figura 5.9 mostra os gráficos dos efeitos principais para a circularidade nos furos do alumínio. Além dos efeitos significativos de v_c e f , chama a atenção também os efeitos não significativos de ct e ca sobre t_{metal} . Isso pode ter influenciado nos resíduos e no baixo valor de R^2 . Quando as velocidades de corte (v_c) e os avanços (f) são analisados, observam-se maiores valores de t_{metal} associados com alta v_c e baixo f . No entanto, os desvios não ultrapassam 25 μm . Esta associação de efeitos é corroborada por outros pesquisadores [Krishnaraj et al., 2010; Lachaud et al., 2001; Malacarne et al., 2019; Meshreki et al., 2016; Shyha et al., 2009].

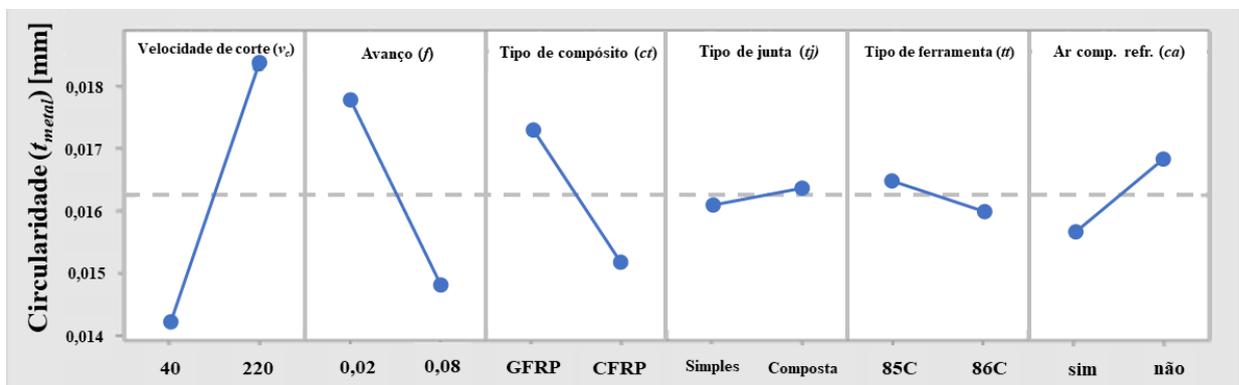


Figura 5.9 – Gráfico dos efeitos principais sobre a circularidade do furo no metal.

O tipo de compósito (CFRP) e a aplicação de ACR apresentam a tendência de reduzir o valor da circularidade do furo na chapa metálica; o CFRP provavelmente em função do favorecimento na fragilização do compósito [Abish et al., 2018; Hoffman et al., 2021; Hou et al., 2021; Joshi et al., 2018; Xu et al., 2013; Wang et al., 2019], enquanto que o ACR tende a reduzir o efeito dilatação térmica do alumínio [Biermann e Iovkov, 2015; Kumar et al., 2016; Santos et al., 2016; Zitoune et al., 2012].

A Figura 5.10 apresenta os gráficos dos efeitos principais para a circularidade nos furos do compósito (t_{comp}). Observa-se que ct e jt e a combinação $ct \times jt$ impactaram de maneira significativa no t_{comp} . No caso, a aplicação de CFRP e juntas compostas promoveram o aumento do desvio. Isto pode estar atrelado à tendência de movimentar a placa superior, após a passagem do material, criando maior instabilidade e contribuindo para a deformação elástica

observada na furação do compósito, mais relevante quando as camadas são sobrepostas (como a condição em questão), além da carga compressiva gerada pela rebarba na saída dos furos da chapa metálica superior. Quando observadas as juntas simples, estes efeitos não são observados.

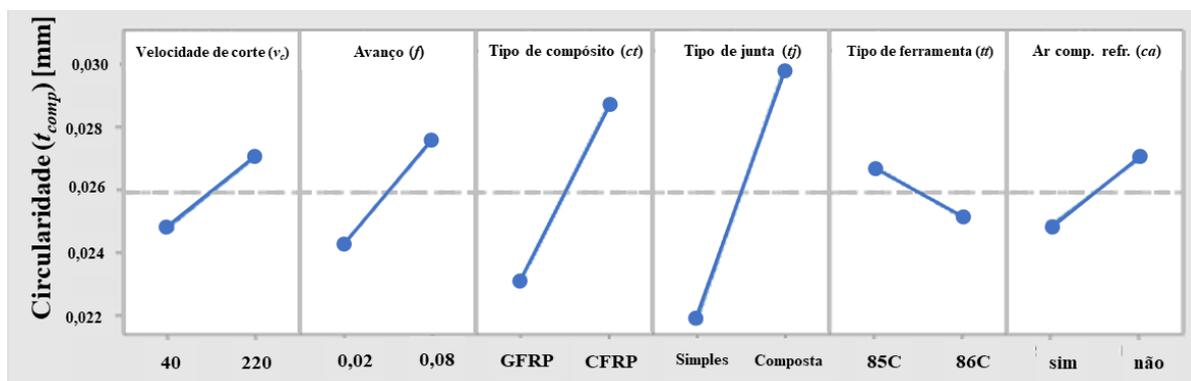


Figura 5.10 – Gráfico dos efeitos principais sobre a circularidade dos furos no compósito.

Apesar de não significativos para o intervalo de confiança de 95%, alto v_c , alto f , e a ausência de ACR também contribuem para o crescimento de t_{comp} . Isso está em consonância com o trabalho de Gaitonde et al., 2008, que observaram aumento na circularidade do furo com o aumento de v_c . Por outro lado, o efeito combinado $v_c \times f$ resultou em maior desvio com $v_c = 220$ m/min e $f = 0,02$ mm/volta. Nesta interação, o maior tempo de contato ferramenta-peça (devido ao menor f) pode desgastar ou deformar a matriz do compósito devido ao atrito, como demonstrado por outros autores [Debnath et al., 2015; Krishnaraj et al., 2012]. Além disso, o movimento de passagem da broca pelas fibras causa uma deformação elástica na região que, quando ocorre o retorno a posição inicial, após a falha por cisalhamento, promove um aperto em torno da broca, resultando em diâmetros perfurados menores em comparação com o tamanho da broca [Debnath et al., 2015; Durão et al., 2013; Lachaud et al., 2001; Makhdum et al., 2014b]. No caso do efeito combinado $v_c \times ca$, a maior v_c (220 m/min) gera maiores desvios independentemente da presença ou não de ACR. No entanto, os valores encontrados não ultrapassam 55 μ m. Considerando a combinação $f \times ca$, para o menor f (0,02 mm/volta) com ACR, observou-se a diminuição de t_{comp} . Isso está de acordo com alguns trabalhos [Ben et al., 2012; Ha et al., 2017; Krishnaraj et al. 2012] que associam a diminuição dos desvios geométricos e defeitos superficiais com a redução da temperatura.

Considerando a melhor produtividade obtida com maiores valores de v_c , associada ao reduzido impacto sobre a circularidade dos furos, justifica-se a utilização de HSC. No entanto,

quando considerados os efeitos do ACR, não são observados benefícios na sua utilização, individualmente ou combinado a outra variável de entrada.

5.1.3 Avaliação do estado das ferramentas

Buscou-se avaliar o estado das brocas após a experimentação, verificando se houve desgastes e/ou avarias, assim como analisar os mecanismos de desgastes após 32 furos realizados com cada ferramenta de corte. A Figura 5.11 apresenta a análise da broca 85C e a Figura 5.12 da broca 86C.

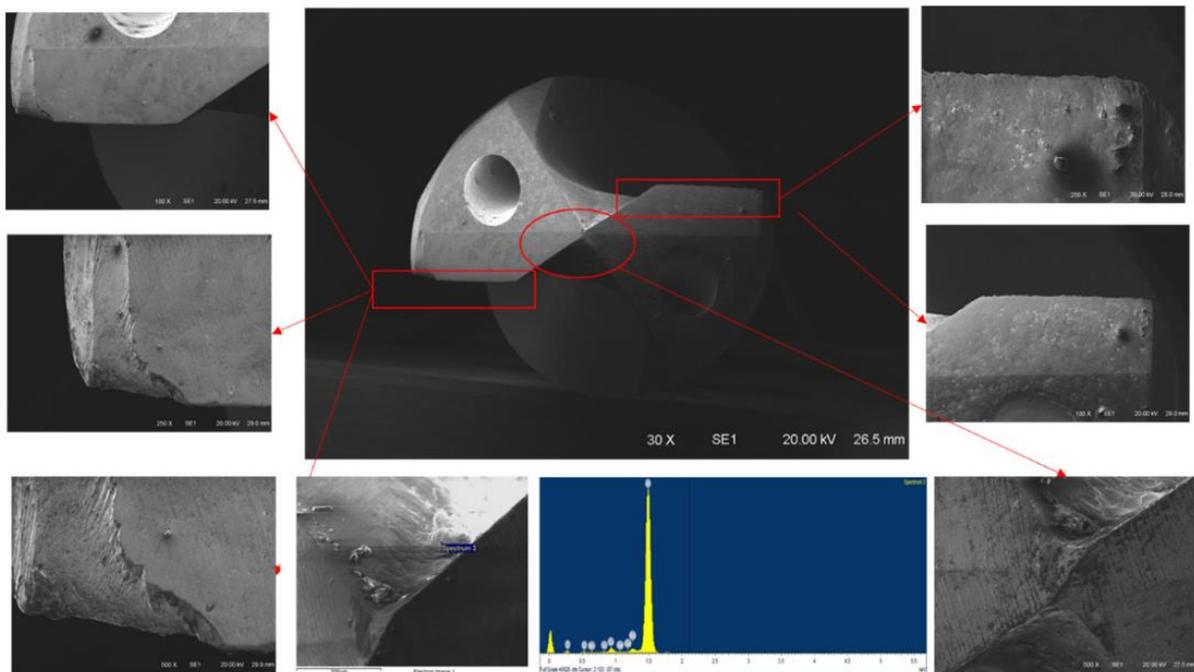


Figura 5.11 – Broca 85C após ser utilizada na experimentação e verificação com EDS.

Notou-se na broca 85C ($\sigma = 118^\circ$) a presença de desgaste abrasivo na quina. Outra característica observada foi a adesão de material sobre a aresta transversal. A análise química por EDS permitiu identificar e caracterizar os resíduos observados na aresta transversal. O elemento predominante (como esperado) foi alumínio, condizente com o material usinado. Esta adesão resulta em perda de eficiência de corte da ferramenta [Kumar et al., 2016; Montoya et al., 2013; Qin et al., 2014].

Na broca 86C ($\sigma = 135^\circ$) observou-se a presença de resíduos e algumas adesões nas arestas principal e transversal. Não foram observados desgastes nas quinas e na aresta transversal, que poderiam comprometer o processo de furação [D’Orazio et al., 2017]. Além

disto, constatou-se a presença do alumínio residual (confirmado pelo EDS) na aresta transversal, como esperado. Não foi observada a presença residual de matriz e fibras do material compósito. Isto pode ser justificado pelo sentido de furação, onde a sequência de furos finaliza sempre na chapa metálica. [Wang et al., 2014].

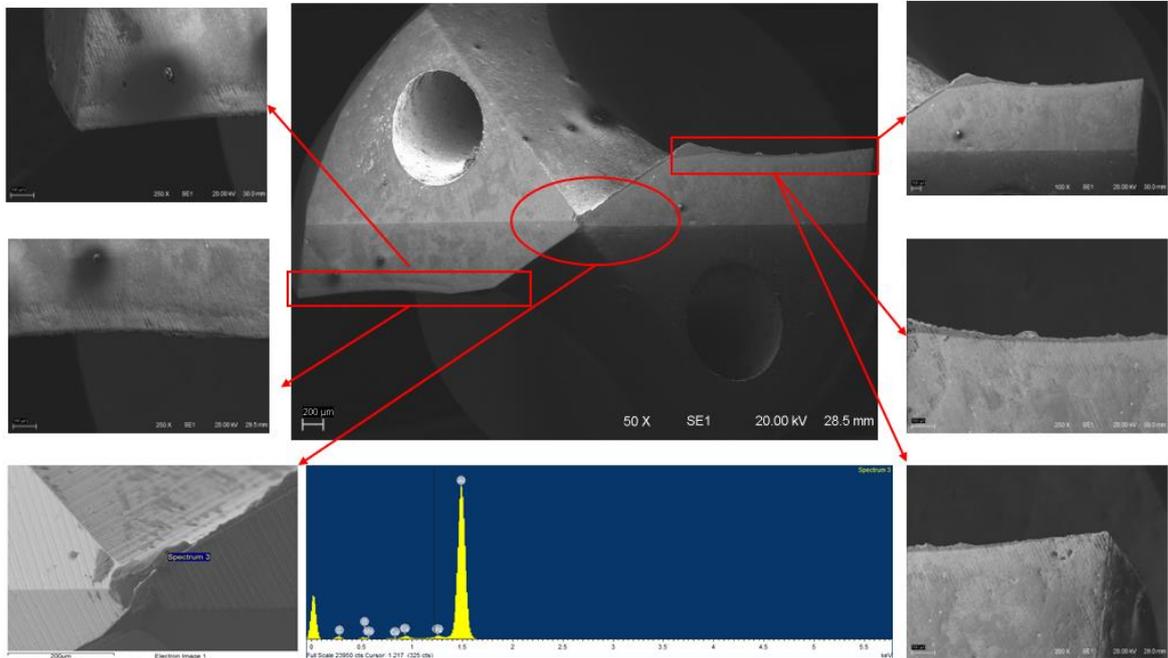


Figura 5.12 – Broca 86C após ser utilizada na experimentação e verificação com EDS.

Portanto, existem semelhanças e diferenças para os efeitos observados nas brocas. Em ambas, notou-se a presença de alumínio aderido na aresta transversal. Na 85C observou-se o desgaste aparente nas quinas, o que não foi detectado na 86C. O desgaste de quina pode contribuir para o aumento dos defeitos observados nas furações, incluindo a geração de maiores delaminações [Fernandez-Pérez et al., 2019].

5.1.4 Otimização

Na otimização, os fatores fixos foram definidos para avaliação dos resultados. Esta limitação foi estabelecida em função da pequena quantidade de corpos de prova e materiais disponíveis. Os parâmetros básicos estabelecidos pela otimização experimental foram: junta simples GFRP/Al, broca 86C e avanço $f = 0,02$ mm/volta. As condições testadas foram:

- OTM 1: $v_c = 220$ m/min sem ACR;
- OTM 2: $v_c = 220$ m/min com ACR;

- OTM 3: $v_c = 40$ m/min com ACR;
- OTM 4: $v_c = 40$ m/min sem ACR.

Foram realizados três furos para cada condição: Furos 1 ao 3 (OTM 1), furos 4 ao 6 (OTM 2), furos 7 ao 9 (OTM 3) e furos 10 ao 12 (OTM 4).

As variáveis de resposta avaliadas consideraram a máxima força de avanço durante a furação do GFRP/Al ($F_{f, comp}$ e $F_{f, metal}$), o fator de delaminação ajustado (F_{da}) na placa de GFRP, e a rugosidade média (R_a) e a circularidade dos furos (t_{metal}) na chapa de Al. Os resultados da otimização (média de três medições) encontram-se na Tabela 5.5.

Tabela 5.5 – Parâmetros otimizados e variáveis de saída testados.

Teste	Fatores Controláveis de Entrada		Variáveis de Resposta				
			GFRP		Al 2124		
	v_c (m/min)	ACR	$F_{f, comp}$ (N)	F_{da}	$F_{f, metal}$ (N)	R_a (μm)	t_{metal} (μm)
OTM 1	220	N	25,4	1,103	99,3	3,52	16,3
OTM 2	220	S	27,0	1,093	106,4	4,16	20,4
OTM 3	40	S	36,8	1,055	104,8	1,53	12,5
OTM 4	40	N	35,5	1,094	93,8	1,10	10,5

A OTM 1 promoveu o maior valor para o fator de delaminação ajustado ($F_{da} = 1,103$) obtido com maior v_c (220 m/min) sem ACR. Por outro lado, valor ligeiramente menor foi observado ($F_{da} = 1,093$) com ACR para a mesma v_c (OTM 2). Para OTM 3 e OTM 4, diferenças relevantes são observadas para F_{da} com a presença (1,055) e a ausência (1,094) do ACR, respectivamente, com menor v_c (40 m/min). Em geral, a aplicação do ACR impactou positivamente na redução do F_{da} (principalmente para a menor v_c), comprovando a análise apresentada na Figura 5.3. Esses resultados estão de acordo com diferentes autores [Abish et al., 2018; Hou et al., 2020; Joshi et al., 2018]. Além disso, devido às poucas diferenças de delaminação observadas no processo com ambas as velocidades de corte, é viável utilizar HSC sem prejudicar o material compósito no corte da fibra e preservando a matriz polimérica, com a utilização de resfriamento efetivo para garantir isso.

A força de avanço (F_f) permaneceu uniforme durante os testes, com poucas diferenças mesmo usando diferentes v_c . Isto se deve ao avanço ($f = 0,02$ mm/volta) mantido constante, visto que afeta significativamente os valores de F_f gerados na furação das juntas híbridas [Liu et al., 2012; Tan et al., 2016]. No entanto, tanto para a alta quanto para a baixa v_c , a F_f foi maior com a presença de ACR (OTM 2 e OTM 3). Este efeito pode ser atribuído as cargas axiais e

radiais geradas pelo ACR durante o processo de furação [Abish et al., 2018]. Esta menor temperatura modifica as propriedades mecânicas do Al 2124 e, por conseguinte, aumenta as forças associadas ao processo. Essa correlação também foi realizada por outros pesquisadores [Li e Shih, 2007; Sharif e Rahim, 2007]. Em todas as condições de otimização, a F_f gerada durante a furação na chapa de Al ($F_{f, metal}$) é cerca de três vezes maior que a desenvolvida na placa de GFRP ($F_{f, comp}$). Além disso, maior v_c resultou em valores 28% mais baixos de $F_{f, comp}$ e valores ligeiramente maiores (3,6%) de $F_{f, metal}$. Essas características podem ser atribuídas à usinabilidade dos materiais e à geração por diferentes métodos de corte. No alumínio, a remoção se dá por cisalhamento, enquanto nos materiais compósitos ocorrem pequenas fraturas frágeis. Isso resulta em pressões específicas de corte diferentes para cada material [Xu e El Mansori, 2017; Wang et al., 2015; Krishnaraj et al., 2010 ; Zitoune et al., 2016].

Em relação à rugosidade da parede do furo metálico, os maiores valores de R_a foram gerados com maior v_c , (OTM 1 e OTM 2). A presença do ACR não ocasionou diferenças significativas de valores de rugosidade, apesar de os valores serem 23% maiores. Alguns autores atribuem possíveis aumentos de rugosidade à formação de aresta postiça de corte e posterior arrancamento de partículas duras da ferramenta durante a furação do alumínio, as quais podem atritar contra a peça e danificar a superfície usinada [Santos et al., 2016]. Outros autores associam a maior v_c ao aumento da ductilidade do material em decorrência do aumento de temperatura, resultando na obstrução dos canais da broca pelos cavacos longos gerados [Hamade e Ismail, 2005]. Tem-se ainda a ausência de elementos de liga facilitadores da fragilização do cavaco [Biermann e Heilmann, 2010].

Para a circularidade do furo na chapa metálica, foram observados valores de t_{metal} 60% maiores com alta v_c em comparação com baixa v_c , como esperado e indicado nas análises anteriores. No entanto, a utilização de ACR gerou desvios 23% maiores que a furação sem ACR. Essas variações podem ser atribuídas à temperatura do processo, desgaste da ferramenta, falta de rigidez do sistema de fixação, entre outros [Zhu et al., 2017a; Zitoune et al., 2010].

Para definir a melhor condição de furação na junta GFRP/Al, foi considerado um peso maior (2) para delaminação no GFRP e pesos menores (1) para as forças de avanço ($F_{f, metal}$ e $F_{f, comp}$), rugosidade da parede do furo (R_a) e circularidade no furo na chapa metálica (t_{metal}). Assim, apesar de produzir os maiores valores de $F_{f, metal}$ (104,8 N) e $F_{f, comp}$ (36,8 N), a melhor condição de furação foi a OTM 3 ($v_c = 40$ m/min com ACR), pois forneceu o menor fator de delaminação ajustado ($F_{da} = 1,055$), a segunda menor rugosidade média ($R_a = 1,53 \mu\text{m}$) e a segunda menor circularidade ($t_{metal} = 12,5 \mu\text{m}$). A redução desses valores contribuiu diretamente

para a diminuição dos defeitos esperados para compósitos e bons níveis de acabamento, que proporcionam melhor fixação e ajustes [Akhil et al., 2017; Lazar et al., 2011; Wu et al., 2012; Xu e El Mansori, 2016; Zitoune et al., 2010].

A Figura 5.13 ilustra a análise comparativa por MEV na saída do furo em GFRP para as quatro condições de otimização testadas.

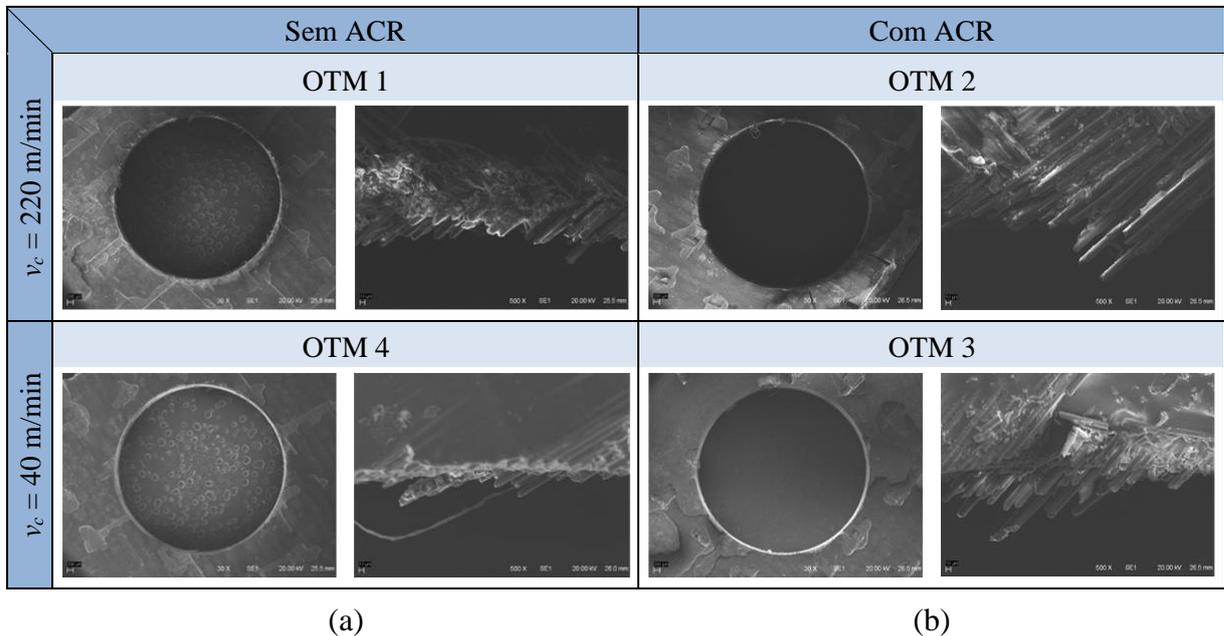


Figura 5.13 – Análise por MEV na saída do GFRP: (a) comparativo entre os furos 3 (OTM 1) e 10 (OTM 4); (b) comparativo entre os furos 5 (OTM 2) e 7 (OTM 3).

Na comparação entre OTM 1 e OTM 4 (Figura 5.13a), o aspecto superficial do GFRP para o furo 3 ($v_c = 220$ m/min) mostra cortes regulares e pequenas delaminações na superfície do furo, enquanto no furo 10 ($v_c = 40$ m/min) são observados cortes regulares das fibras e preservação da matriz polimérica. Assim, na situação sem ACR, não são evidenciadas diferenças relevantes para a v_c no processo de furação da junta híbrida GFRP/Al. Ao analisar as diferenças entre OTM 2 e OTM 3 (Figura 5.13b) observam-se diferenças na fratura das fibras GFRP na situação com ACR. Cortes regulares e menor delaminação são observados na superfície dos furos 5 ($v_c = 220$ m/min) e 7 ($v_c = 40$ m/min). Novamente, nenhuma diferença significativa é evidenciada para as diferentes velocidades de corte ao aplicar ACR. Por fim, a OTM 3 apresenta cortes de fibra estáveis e preservação da matriz polimérica.

5.2 Efeito de HSC e ACR na Furação da Junta GFRP/Ti

A partir da Etapa 2, houve indicações de que:

- a junta simples (FRP/Al) resultou em menos defeitos do que a junta composta Al/FRP/Al;
- o GFRP gerou menos defeitos e é menos comum em estudos do que o CFRP;
- a broca 86C ($\sigma = 135^\circ$), recomendada pelo fabricante (Sandvik) para furação da junta híbrida, apresentou resultados melhores que a broca 85C ($\sigma = 118^\circ$);
- o avanço mais baixo ($f = 0,02$ mm/volta) apresentou menos defeitos que o avanço mais alto ($f = 0,08$ mm/volta).

Portanto, os fatores de interesse utilizados na definição do experimento foram dois níveis de velocidade de corte (40 m/min e 220 m/min) e a aplicação ou não de ar comprimido refrigerado (ACR) na furação da junta simples GFRP/Ti-6Al-4V usando broca 86C e $f = 0,02$ mm/volta. Vale lembrar que a sequência estabelecida de execuções foi apresentada na Tabela 4.7, em que foram consideradas as duas variáveis em dois níveis cada, com uma repetição, totalizando oito furos (H1 a H8). Além disso, pré-testes foram conduzidos para a definição do plano de experimentos. Nesta avaliação, a broca 85C não obteve êxito no processo de furação do titânio (ocorreu o colapso), enquanto a 86C foi efetiva para o processo.

A Figura 5.14 mostra as imagens das entradas e saídas dos furos na junta GFRP/Ti. Resíduos (queimas) são observados nas entradas dos furos da chapa de titânio com $v_c = 220$ m/min (H1 e H4). Por outro lado, essas marcas não são observadas nos furos H2 e H5 ($v_c = 40$ m/min). O alto encruamento e resistência à fratura do Ti durante a furação em HSC promove um aumento da temperatura [Li e Shih, 2007] gerando esses resíduos na superfície metálica [Veiga et al., 2013; Zhang et al., 2008], independente da presença ou não do ACR. Este efeito pode ser atribuído à dificuldade do ACR atingir a interface entre o GFRP e o Ti, uma vez que o fornecimento do ACR limita-se à área superficial dos furos [Abish et al., 2018; Hoffmann et al., 2021; Wang et al., 2015].

Os efeitos principais e as interações que afetaram as variáveis de saída (forças de avanço $F_{f,comp}$ e $F_{f,metal}$; fator de delaminação ajustado F_{da} , rugosidade R_a na parede do furo de Ti; circularidades dos furos t_{comp} e t_{metal}), tanto os significativos quanto os não significativos, foram analisados. Além disto, foram apontadas tendências durante as análises. Também foi avaliado o coeficiente de determinação (R^2) para cada variável de interesse, que demonstra o quanto os dados são explicados pelo modelo.

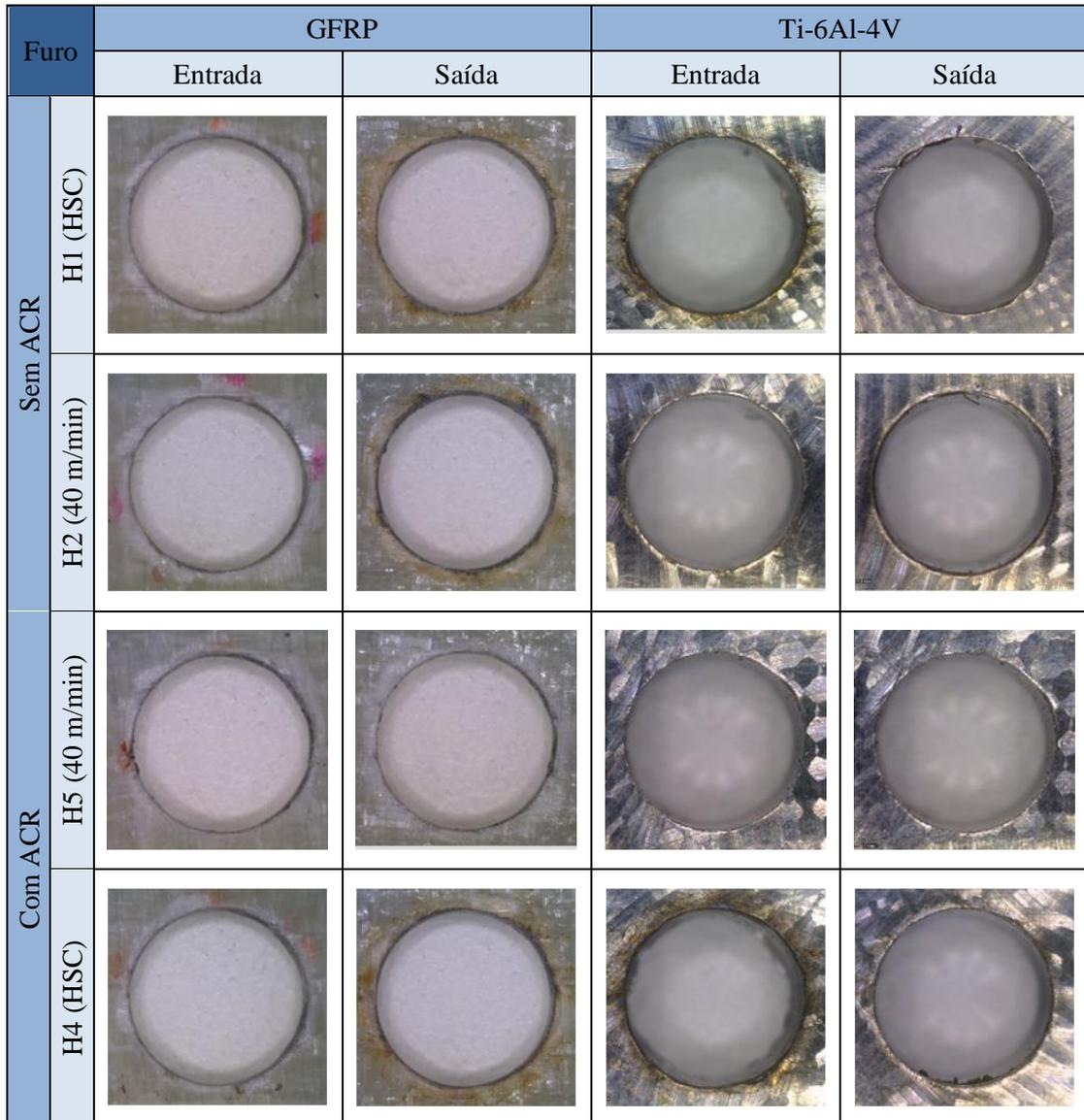


Figura 5.14 – Aspecto superficial na entrada e na saída de furos realizados na junta GFRP/Ti.

5.2.1 Força de avanço e fator de delaminação ajustado

A Figura 5.15 apresenta o gráfico da força de avanço (F_f) resultante dos furos H1 ($v_c = 220$ m/min) e H2 ($v_c = 40$ m/min), ambos realizados sem ACR. O aumento de F_f é evidente quando a broca passa da placa de GFRP para a chapa de Ti. Para H1, o aumento foi de 487%, enquanto para H2, a força aumentou 575%. Além disso, a maior v_c reduziu o valor da força em 28% para GFRP e 17% para o Ti, possivelmente devido à diminuição da adesão do Ti na aresta transversal e nas arestas de corte principais, combinado com um baixo avanço ($f = 0,02$ mm/volta). Em baixa v_c , a aderência do metal é frequentemente mais comum, o que

diminui a capacidade de corte da ferramenta e pode contribuir para lascamento e outras falhas da broca [Sharif e Rahim, 2007; Zhang et al., 2008].

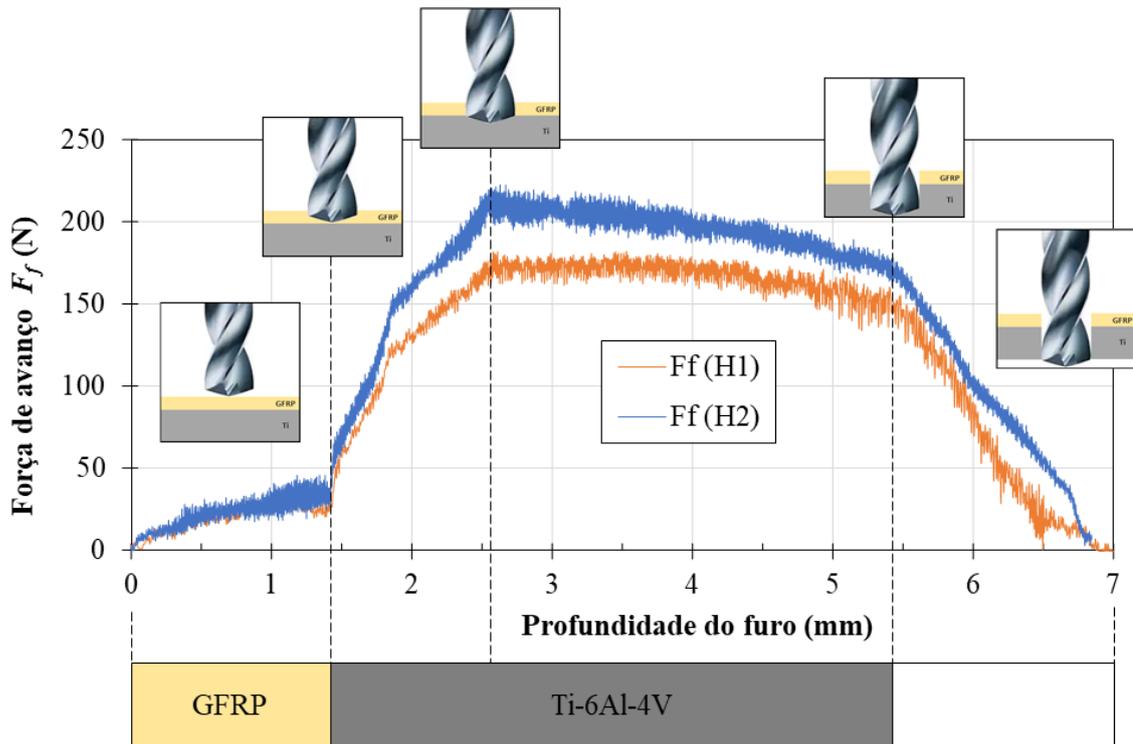


Figura 5.15 – Comportamento da força de avanço durante a furação da junta GRFP/Ti com $v_c = 220$ m/min (H1) e $v_c = 40$ m/min (H2) sem ACR.

A Figura 5.16 exibe o gráfico relacionando os valores obtidos das forças de avanço no GRFP ($F_{f,comp}$) e no Ti-6Al-4V ($F_{f,metal}$) e os resultados do fator de delaminação ajustado (F_{da}) do GRFP para as combinações de parâmetros: M1 = média (H1, H3), M2 = média (H2, H8), M3 = média (H4, H6) e M4 = média (H5, H7). Para este gráfico, os valores de $F_{f,metal}$ com presença de ACR são maiores em comparação à sua ausência, independentemente da velocidade de corte empregada (220 m/min ou 40 m/min). Sun et al., 2010, explicam que esse aumento de força advém das temperaturas mais baixas produzidas durante a furação do titânio em comparação com a usinagem sem ACR, aumentando o encruamento do material e a dificuldade de usinagem. Este comportamento da força de avanço ($F_{f,metal}$) também é citado por outros autores [Li e Shih, 2007; Sharif e Rahim, 2007; Veiga et al., 2013]. Desempenho semelhante foi observado no GRFP, ou seja, maiores valores de $F_{f,comp}$ na furação com ACR para ambas as velocidades de corte. Esse padrão pode estar associado à menor resistência térmica da matriz do compósito devido ao aumento das temperaturas na região de corte sem

ACR. Esta condição possivelmente facilita o corte devido à degradação mais significativa da resina polimérica, reduzindo a resistência ao cisalhamento e gerando menores valores de $F_{f, comp}$ [D’Orazio et al., 2017; Khashaba, 2013; Khashaba e El-Keran, 2017; Khasahaba et al., 2010; Ramirez et al., 2014; Zitoune et al., 2010]. Assim, a redução da temperatura do processo faz com que sejam necessárias maiores cargas para o corte do compósito, o que não ocorre sem o ACR [Fu et al., 2018a; Hou et al., 2020; Ramirez et al., 2014].

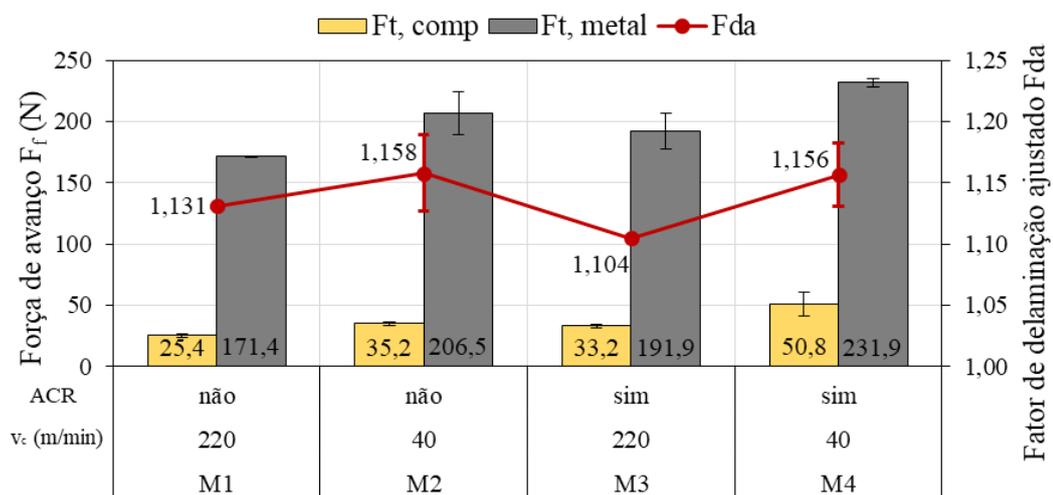


Figura 5.16 – Máxima força de avanço (F_f) durante a furação do GFRP/Ti e fator de delaminação ajustado (F_{da}) no compósito.

A Figura 5.17 mostra o gráfico de efeito principal, o gráfico de interação de dois fatores e o gráfico de Pareto das forças de avanço no compósito ($F_{f, comp}$) e no metal ($F_{f, metal}$). De acordo com a ANOVA, os efeitos principais dos fatores de entrada foram significativos para o intervalo de confiança de 95% sobre a variável resposta $F_{f, comp}$; ao mesmo tempo, a interação $v_c \times$ ACR não afetou significativamente. Neste caso, observou-se um coeficiente de determinação (R^2) de 87,2%. Assim, há uma diminuição substancial em $F_{f, comp}$ usando maior v_c ou sem ACR. Como mencionado anteriormente, esta condição pode estar relacionada a temperaturas mais altas produzidas na região de corte que diminuem a resistência ao cisalhamento da matriz do compósito. Os efeitos principais também foram considerados muito influentes sobre $F_{f, metal}$ ($\alpha \leq 0,05$), e a interação não teve impacto significativo. O coeficiente de determinação (R^2) foi 79,3%. Conseqüentemente, a força de avanço decrescente com HSC ou sem ACR é substancial. Os resultados estão de acordo com outros autores [Joshi et al., 2018; Kumar e Sing, 2017; Phadnis et al., 2012; Qi et al., 2021; Wang et al., 2015].

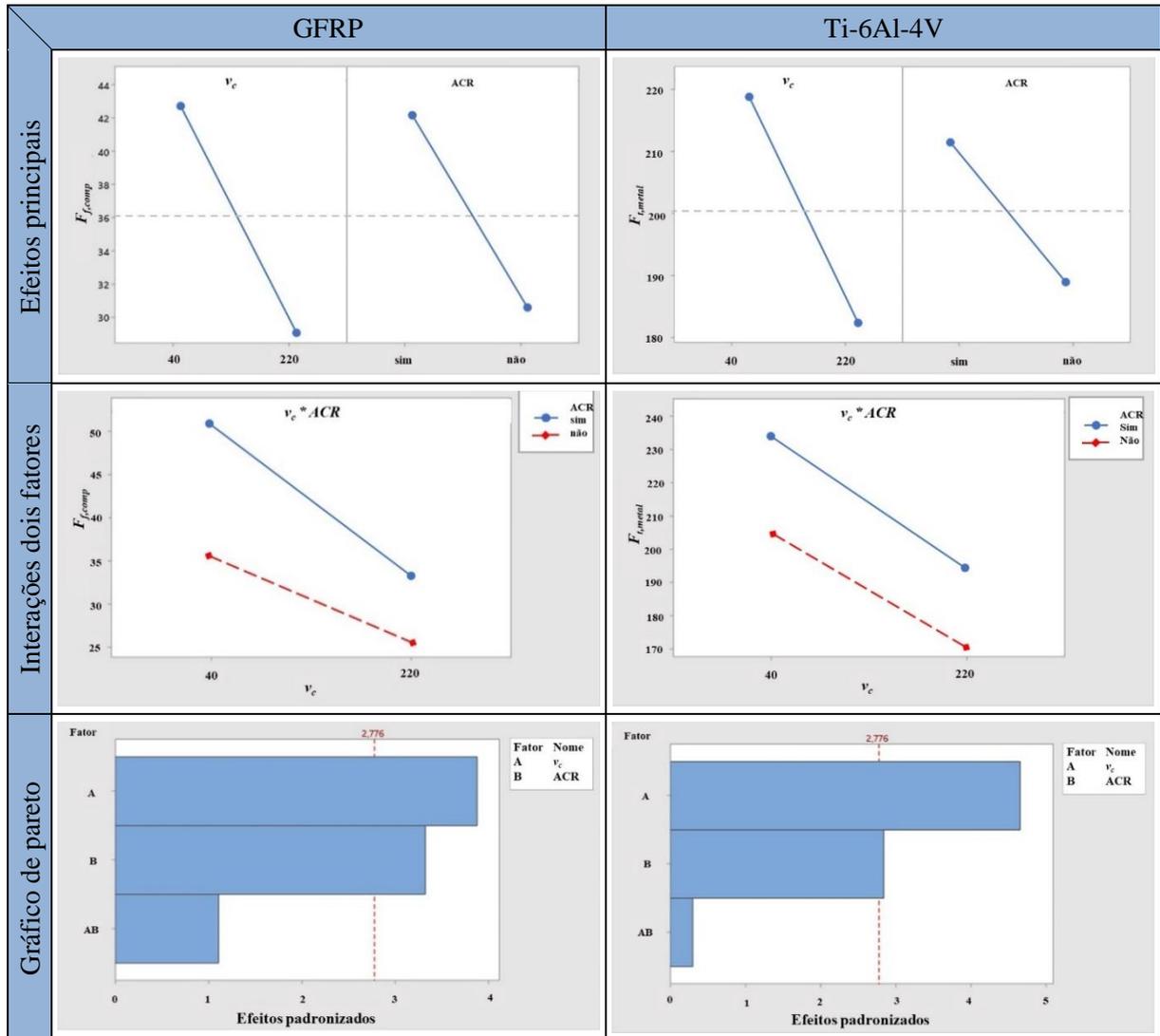


Figura 5.17 – Gráfico dos efeitos principais, da interação de dois fatores e de Pareto para $F_{f, comp}$ e $F_{f, metal}$.

Os gráficos de efeitos principais, de interação de dois fatores, e de Pareto para o fator de delaminação ajustado (F_{da}) do GFRP são apresentados na Figura 5.18. A ANOVA demonstrou que os fatores principais e suas interações não foram significativos para um intervalo de confiança de 95% com $R^2 = 70,1\%$. No entanto, apresenta uma tendência de diminuição do F_{da} com HSC (220 m/min) e ACR. O aumento do atrito devido ao maior tempo de contato entre a ferramenta e a superfície do furo com a menor v_c (40 m/min) pode aumentar a temperatura do processo e estimular a delaminação [Krishnaraj et al., 2012; Kuo et al., 2014; Rawat e Attia, 2009; Wang et al., 2015; Wang et al., 2019]. A menor adesão metálica na aresta transversal da broca ao utilizar maior v_c possivelmente melhorou capacidade de corte e contribuiu para a redução de F_{da} [Diniz et al., 2014; Zitoune et al., 2010; Zitoune et al., 2016].

No entanto, o maior atrito na região de corte pela maior frequência de contato das arestas de corte principais com a superfície usinada pode resultar em regiões com superaquecimento (queimaduras superficiais) indesejadas para o material [Davim et al., 2007; Debnath et al., 2015; Merino-Pérez et al., 2016; Phadnis et al., 2012; Wang et al., 2015].

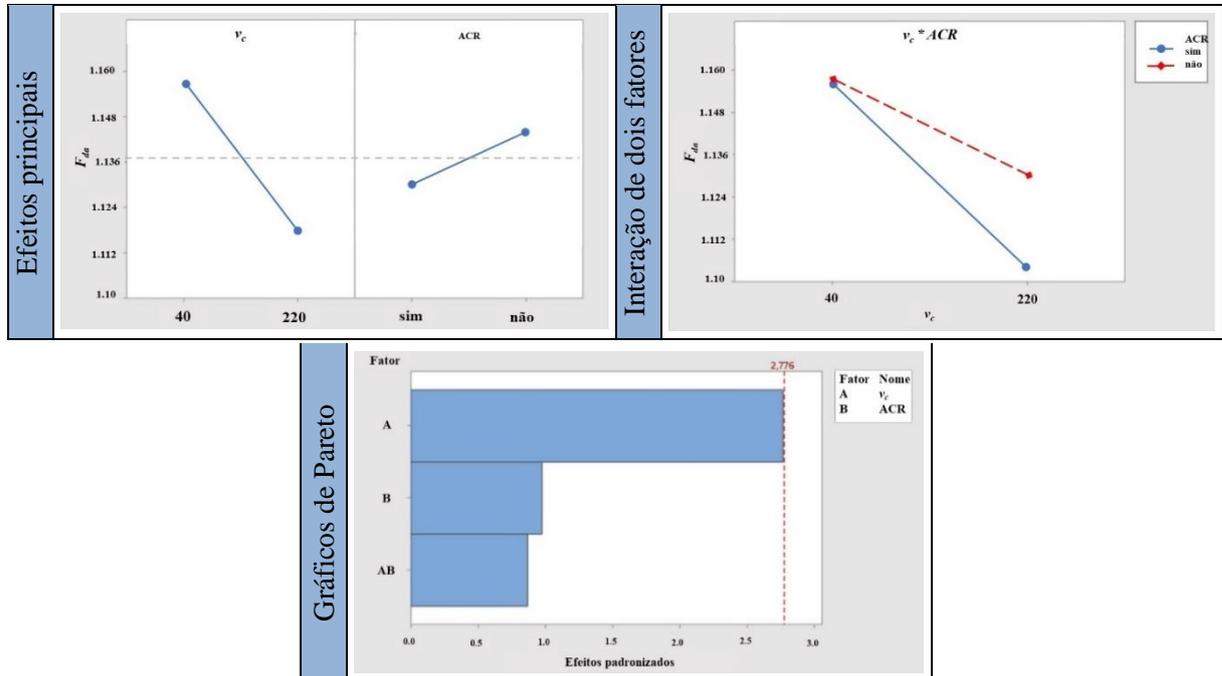


Figura 5.18 – Gráfico dos efeitos principais, interação de dois fatores e de Pareto para F_{da} .

O ACR reduz a temperatura de contato ferramenta-peça, promovendo boa estabilidade térmica durante a furação gerando cortes mais regulares em relação à condição sem ACR. Como mencionado em alguns trabalhos [Abish et al., 2018; Fu et al., 2018a; Hoffmann et al., 2021; Khashaba et al., 2017; Lachaud et al., 2001; Wang et al., 2019; Weinert e Kempmann, 2004], o efeito do ACR na matriz do compósito pode melhorar a integridade e a qualidade dos furos.

Apesar de não serem significativos, os gráficos apresentam menores valores para o F_{da} com a utilização de ACR e HSC. O efeito da presença do ar comprimido refrigerado reflete na diminuição da temperatura de contato ferramenta-peça e tem, como consequência, a maior estabilidade térmica durante o processo de corte. Isto proporciona melhor fluidez no contato entre a broca e a matriz, proporcionando cortes regulares com ACR em comparação ao processo sem ACR (cortes irregulares) como consequência, ocorre a diminuição dos efeitos térmicos causados na matriz dos compósitos pode melhorar a integridade e o acabamento dos furos [Lachaud et al., 2001]. O impacto positivo na redução na delaminação estão condizentes com

os obtidos por Abish et al., 2018, que verificaram influência positiva da baixa temperatura na redução da delaminação.

A Figura 5.19 apresenta imagens obtidas por MEV da entrada dos furos do GFRP. Ao comparar os furos com HSC, as fibras cortadas apresentam forma irregular sem ACR (furo H1) e formato regular com ACR (furo H4). Para a baixa v_c (40 m/min), os defeitos associados ao corte das fibras foram mais regulares com a furação com ACR (furo H7) em relação ao processo sem ACR (furo H2).

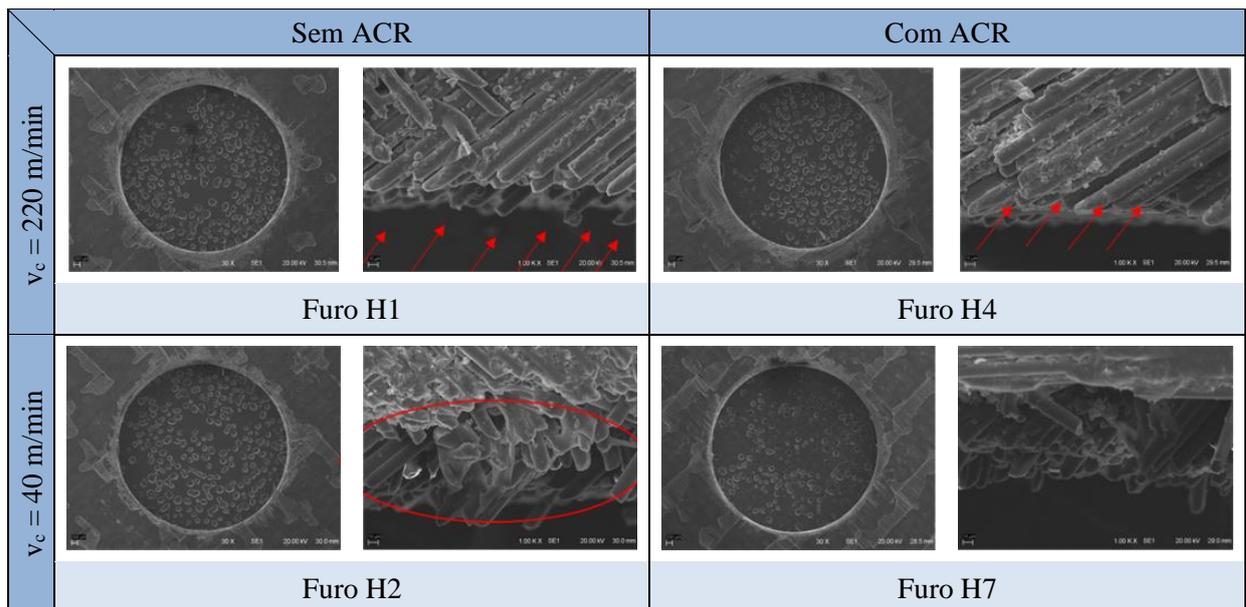


Figura 5.19 – Análise por MEV da qualidade dos furos na entrada da placa de GFRP.

As melhores características associadas ao furo no GFRP utilizando ACR podem ser atribuídas à maior estabilidade da matriz polimérica e melhor regularidade no corte da fibra [Abish et al., 2018; Fu et al., 2018a; Hoffmann et al., 2021; Hou et al., 2020; Khashaba et al., 2010; Khashaba e El-Keran, 2017; Ramirez et al., 2014; Wang et al., 2019]. Su et al., 2022, indicam que, sob ACR, o material pode ser totalmente removido e extraído do furo através dos canais helicoidais, resultando em uma força de arrancamento menor quando comparada à condição sem ACR. Além disso, possivelmente a força de união interfacial entre fibra e resina aumenta com o uso de ACR, inibindo a extrusão da fibra e reduzindo a distância de extensão das fissuras nas direções axial e radial. Isso resulta em uma superfície de furo com menor rugosidade e menor F_{da} . Como consequência, ocorre a diminuição das irregularidades superficiais, como abordado por Lachaud et al., 2001, e Weinert et al., 2004.

A Figura 5.20 exibe as imagens por MEV na saída dos furos da placa de GFRP. Independentemente da v_c empregada ou da utilização ou não de ACR, queimas superfícies são vistas na saída do compósito. Isto se deve, provavelmente, ao contato deste com a superfície metálica. Estas queimas superficiais são associadas ao aumento da temperatura na ferramenta durante a furação do Ti-6Al-4V [Li e Shih, 2007].

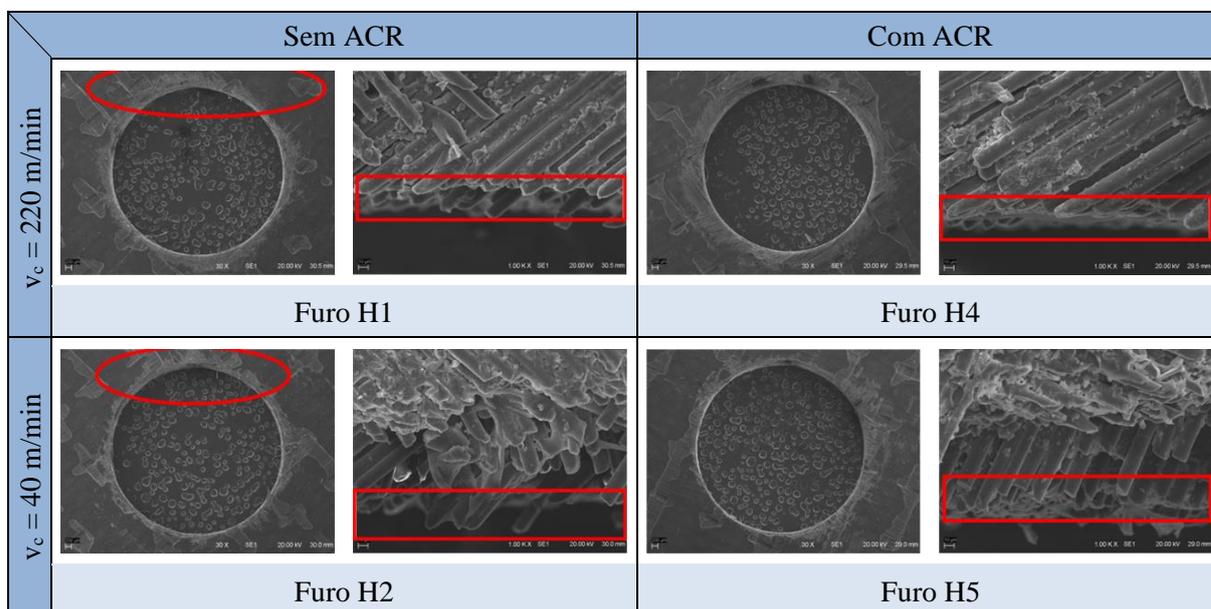


Figura 5.20 – Análise por MEV do aspecto superficial dos furos na saída da placa de GFRP.

Vale destacar que isso não ocorre na entrada dos furos (Figura 5.19) em função de os materiais (GFRP e Ti) não estarem em contato [Veiga et al., 2013]. Por outro lado, não foram observadas diferenças significativas na entrada do furo da chapa de titânio em relação às deformações da superfície (Figura 5.21). No caso, apenas alguns resíduos de GFRP foram observados no entorno dos furos devido às queimaduras superficiais mencionadas [Veiga et al., 2013; Zhang et al., 2008].

A Figura 5.22 mostra as imagens obtidas por MEV na saída dos furos da chapa de titânio. Não foram observadas diferenças significativas nas rebarbas formadas pelas duas velocidades de corte com e sem ACR, tanto nas dimensões quanto no formato. Nestes casos prevaleceram as rebarbas uniformes pequenas [Aurich et al., 2009], mais fáceis de serem removidas, i.e., sem que haja necessidade de operações de usinagem posteriores [Ko e Lee, 2001], e que não prejudicam a funcionalidade da junta multimaterial [Pena et al., 2005]. As rebarbas menores no furo H5 podem estar associadas à menor velocidade de corte (40 m/min) combinada com a presença de ACR. Essa combinação pode ter promovido maior fragilização

do material devido às temperaturas mais baixas, gerando assim rebarbas menores na saída do furo do Ti [Aurich et al., 2009; Ávila et al., 2005; Ko et al., 2003; Pena et al., 2005].

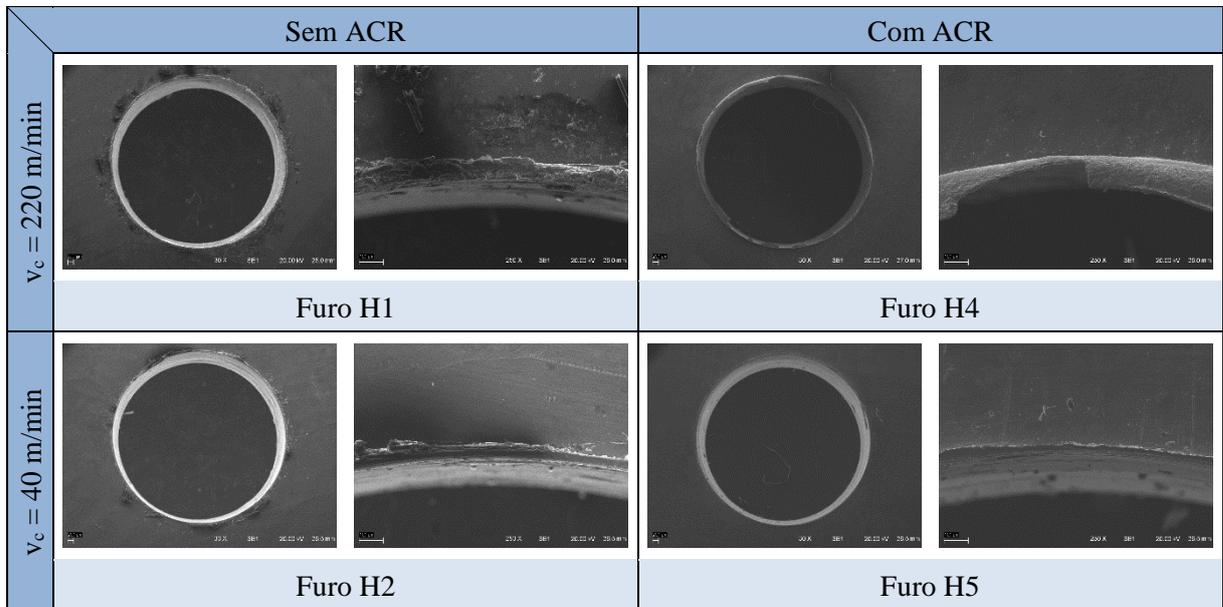


Figura 5.21 – Análise por MEV da qualidade dos furos na entrada da chapa de Ti-6Al-4V.

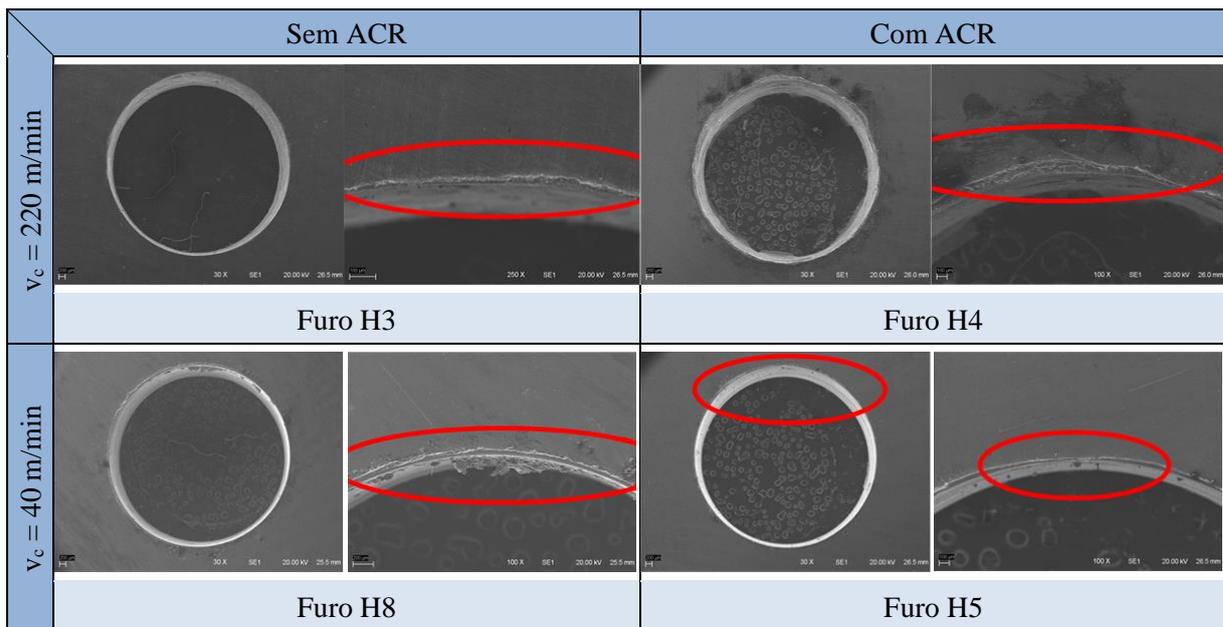


Figura 5.22 – Análise por MEV da qualidade dos furos na saída da chapa de Ti-6Al-4V.

5.2.2 Rugosidade média e circularidade dos furos

A Figura 5.23 exibe o gráfico contendo os valores de circularidade dos furos no GFRP (t_{comp}) e no Ti-6Al-4V (t_{metal}) e os da rugosidade média (R_a) na parede do furo metálico para as combinações de parâmetros avaliadas: M1 = média (H1, H3), M2 = média (H2, H8), M3 = média (H4, H6) e M4 = média (H5, H7).

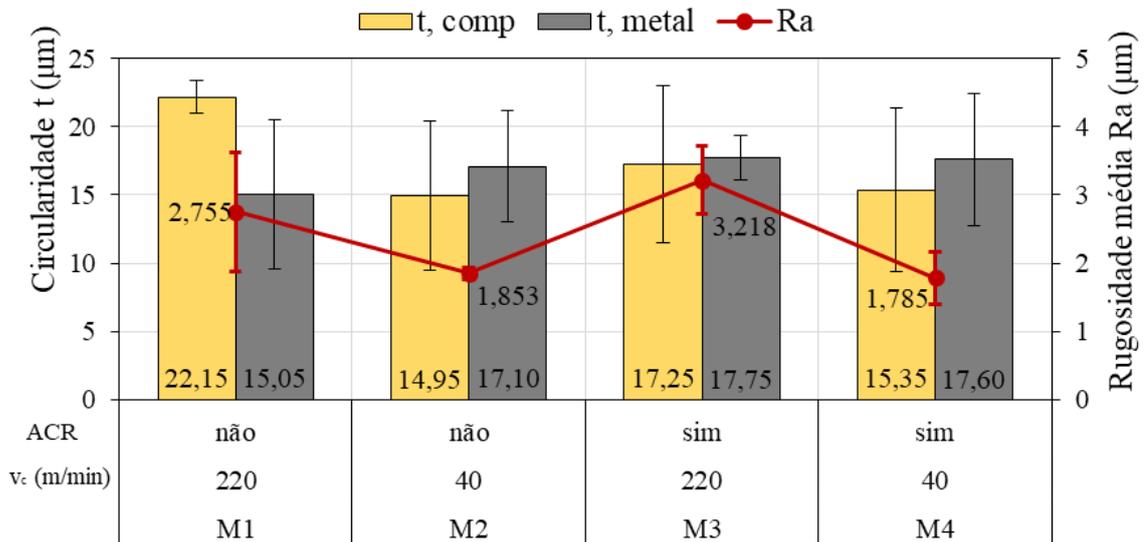


Figura 5.23 – Valores de circularidade (em ambos os materiais) e rugosidade média (no metal) dos furos após a furação da junta simples GFRP/Ti.

Os maiores desvios observados para a circularidade dos furos no compósito (t_{comp}) foram gerados na furação com HSC sem ACR. Isto pode estar associado com as maiores cargas e temperaturas que aumentaram a deformação elástica das fibras no compósito após a passagem da broca [Debnath et al., 2015; Krishnaraj et al., 2012]. Além disso, o maior tempo de contato entre a ferramenta e o material (devido ao baixo avanço) aumenta os efeitos de flexão sobre as fibras durante o movimento de passagem da broca, promovendo deformação elástica na região. Quando ocorre o retorno à posição inicial, após a falha por cisalhamento, ocorre uma compressão em torno da broca, resultando em diâmetros perfurados menores em comparação com o tamanho da broca. Isto, por conseguinte, resulta em aumento da circularidade do furo [Lachaud et al., 2001; Makhdum et al., 2014a].

Para o t_{metal} não foram observadas diferenças significativas para as combinações avaliadas. Pode-se atribuir esta constância às características do Ti-6Al-4V em manter sua estabilidade dimensional, mesmo nas condições de corte mais severas [Zhang et al., 2008; Zhu

et al., 2017a]. Apesar disso, há uma tendência de aumento da circularidade do furo com HSC, provavelmente devido ao desgaste da ferramenta gerado na furação do Ti [Li et al., 2018].

Em relação à rugosidade da parede do furo no Ti-6Al-4V, os menores valores de R_a foram produzidos na furação com baixa v_c (40 m/min) em comparação com HSC (220 m/min). Resultados semelhantes foram encontrados por Kuo et al., 2014, e Zhang et al., 2008. Nota-se que o ACR não afetou os valores de R_a , possivelmente porque o ar comprimido refrigerado não age fortemente na redução do atrito, não garante resfriamento eficiente na região de corte e, conseqüentemente, não altera significativamente a qualidade da superfície usinada (parede do furo). Acredita-se que se algum lubrificante fosse fornecido internamente à broca, os resultados seriam diferentes, como a aplicação de MQL [Zeilmann e Weingaertner, 2007].

A Figura 5.24 mostra o gráfico de efeito principal, o gráfico de interação de dois fatores e o gráfico de Pareto da circularidade dos furos no compósito (t_{comp}) e no metal (t_{metal}). A partir da ANOVA, considerando um intervalo de confiança de 95%, a presença de ar comprimido refrigerado reduziu significativamente t_{comp} . O coeficiente de determinação (R^2) foi 68,7%. Apesar de não ter significância estatística, t_{comp} tende a diminuir com a baixa v_c (40 m/min). Por outro lado, não foram observados fatores significativos para a circularidade do furo na chapa metálica (t_{metal}). No entanto, t_{metal} tende a crescer com HSC, como detectado por Ahmed et al., 2016, que citam o efeito térmico na superfície do furo devido ao aumento de v_c como a causa do erro (embora a ausência do ACR tenha reduzido o t_{metal}). Para o efeito combinado, a furação com ACR e baixa v_c foi positiva em ambos os materiais, e o valor de t_{metal} pouco se alterou com HSC na ausência de ACR. Além disso, os desvios permaneceram abaixo de 25 μm ; assim, a tolerância IT7 foi contemplada [Meshreki et al., 2016].

A Figura 5.25 mostra o gráfico dos efeitos principais, gráfico de interação de dois fatores e o gráfico de Pareto da rugosidade da parede do furo (R_a) na chapa metálica. A ANOVA mostrou que a velocidade de corte (v_c) é significativa (valor-P $\leq 0,05$) para a rugosidade média, onde a maior v_c aumenta os valores de R_a . Os resultados concordam com os obtidos por Ahmed et al., 2016, que atribuem o aumento da temperatura com o incremento de v_c ao aumento de R_a . Shyha et al., 2011, explicam que a rugosidade aumenta devido ao deslocamento de resíduos de titânio nos canais da broca transferidos para a superfície e pressionados na parede do furo. Esta mesma conclusão foi obtida por Sharman et al., 2008, na furação da superliga à base de níquel Inconel 718. No entanto, Kuo e Soo, 2014, associam maiores valores de R_a com as falhas nas arestas de corte da broca mais usuais com alta v_c (desgaste por abrasão e lascamentos). Embora o efeito não tenha sido significativo, a ausência do ACR favoreceu a obtenção de menores

valores de R_a . No entanto, com menor v_c (40 m/min), o ACR não afetou a rugosidade da parede do furo metálico. Nesse caso, a ANOVA resultou em um $R^2 = 71,5\%$.

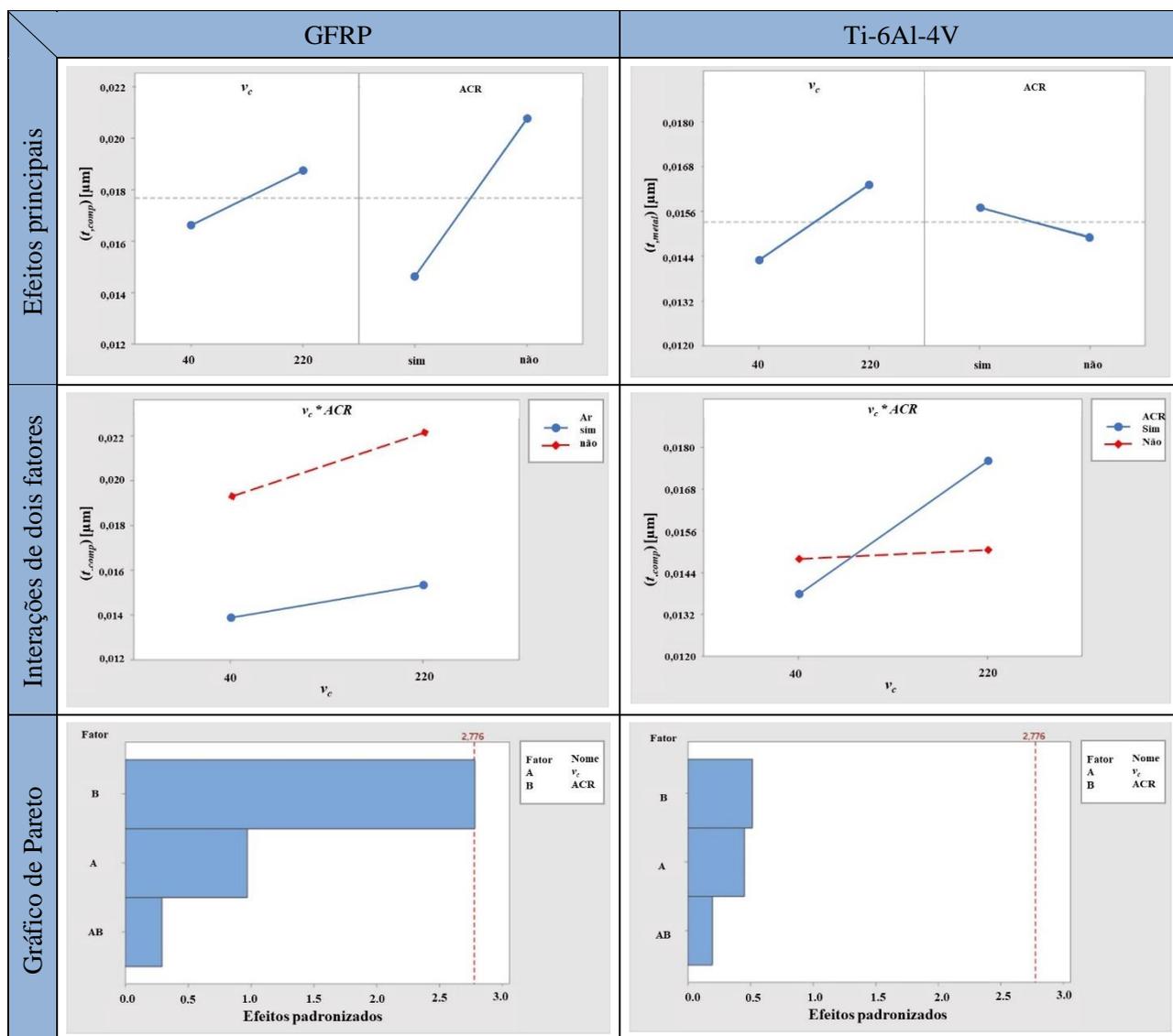


Figura 5.24 – Gráficos dos efeitos principais, da interação de dois fatores e de Pareto para

t_{comp} e t_{metal}

Assim, a incidência de menores valores de rugosidade média e de circularidade no furo da chapa de Ti em baixa v_c possivelmente advém à maior capacidade de resfriamento da região de corte.

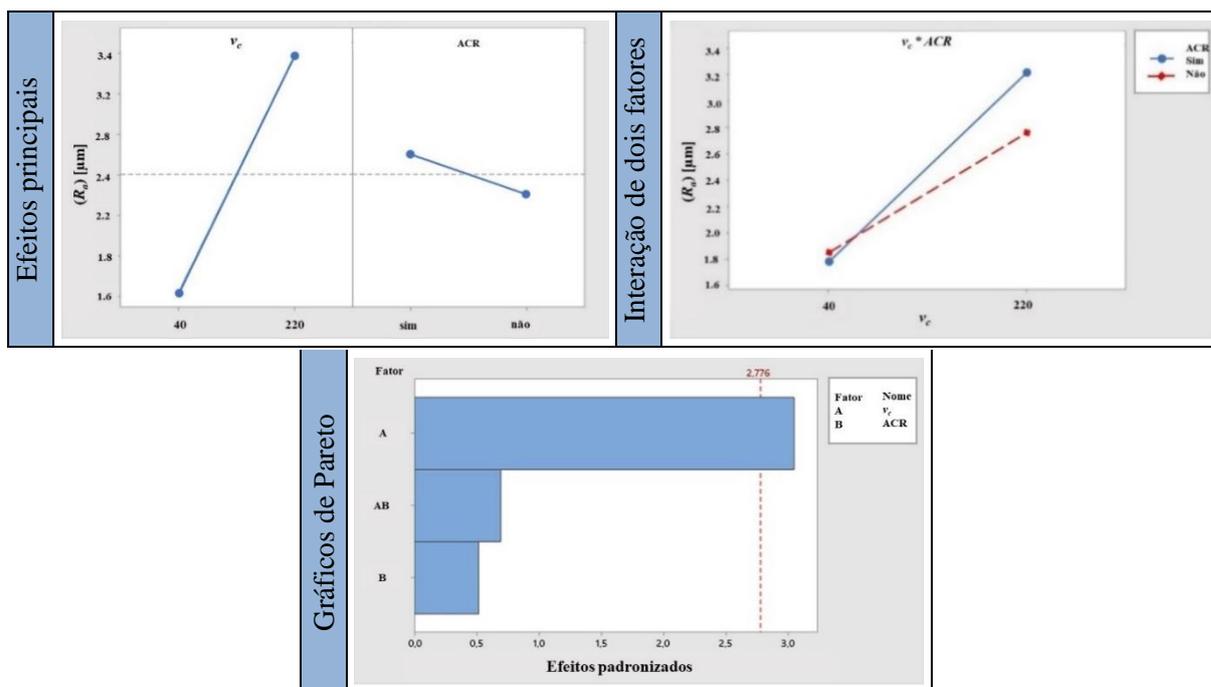


Figura 5.25 – Gráficos dos efeitos principais, da interação de dois fatores e de Pareto para R_a para o Ti-6Al-4V.

5.2.3 Análise do estado da ferramenta

O desgaste da broca durante a furação do GFRP pode contribuir para o aumento dos problemas causados na matriz polimérica dos compósitos. Isto afeta diretamente a integridade dos furos [Fernandez-Pérez et al., 2019; Pereira et al., 2017; Ramirez et al., 2014]. Portanto, realizou-se a análise por MEV/EDS das condições da broca 86C utilizada em toda a Etapa 3 (oito furos), como mostrado na Figura 5.26. Nesta análise verificou-se a presença de queimas superficiais, superaquecimentos, adesão de materiais e desgastes.

A Figura 5.26a exibe a aresta transversal de corte, onde não se observa desgaste abrasivo. Na Figura 5.26b são identificados pontos com adesão de material sobre a aresta principal de corte. A sua caracterização foi realizada por análise química elementar (EDS) identificada como Ti (Figura 5.26c). A identificação da presença de resíduos de Ti-6Al-4V nas brocas demonstrou a ocorrência de adesão em partes da ferramenta devido ao alto aquecimento gerado no processo, como esperado, principalmente em condições severas de corte (HSC sem ACR). Foram encontradas micropartículas de Ti aderido na superfície de folga da broca, possivelmente causado pela baixa v_c (Figura 5.26d). Com a continuidade da utilização da broca, poderia se tornar um ponto de falha crítico, prejudicando a usinagem. Ao final do experimento, observou-se desgaste abrasivo acentuado na quina da ferramenta (Figura 5.26e). Finalmente,

na Figura 5.26f, nota-se a presença de resíduos nos canais internos da broca, possivelmente titânio, originários da furação. Shyha et al., 2011, citam que estes resíduos de material podem contribuir para o aumento da rugosidade da parede dos furos.

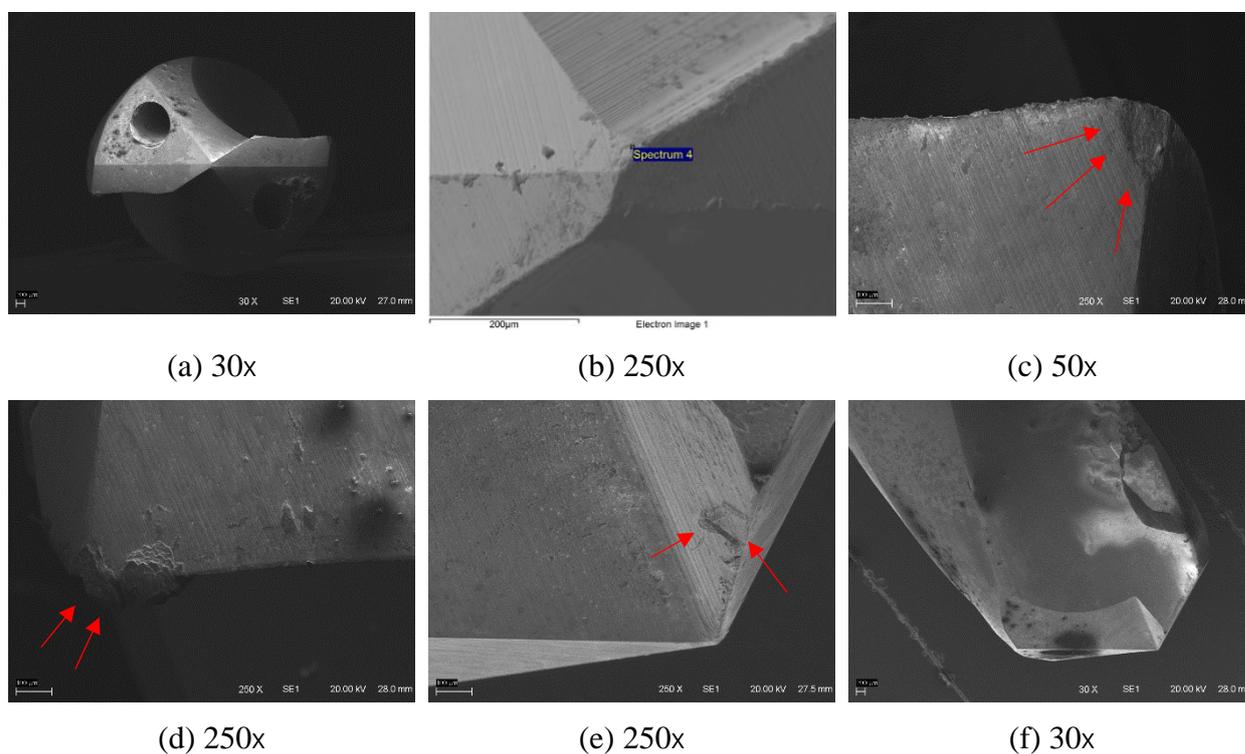


Figura 5.26 – Análise MEV/EDS da broca 86C após experimentação: (a) vista frontal; (b) EDS da aresta transversal; (c) desgaste de quina; (d) indicação de material aderido na aresta principal; (e) material aderido na superfície de folga; (f) região interna do canal da broca.

6 CONCLUSÕES

A tese foi desenvolvida visando avaliar o efeito do ar comprimido refrigerado (ACR) e da furação em alta velocidade de corte (HSC) sobre a qualidade dos furos em juntas híbridas compósito-metal sob diferentes configurações. Com base no estado da arte, algumas hipóteses foram levantadas, tais como a influência da HSC, do ACR, do tipo de junta (simples ou composta), do tipo de polímero reforçado com fibras (CFRP e GFRP), do tipo de broca helicoidal, e da combinação ACR e HSC, no acabamento desses furos.

A qualidade dos furos e a eficiência do processo de furação são determinados pelo fator de delaminação ajustado (F_{da}), da circularidade dos furos (t), da rugosidade média da parede do furo (R_a), da força de avanço do processo (F_f) e do estado da broca ao final da operação de corte. Assim, foram analisados os efeitos de HSC e ACR na furação de juntas híbridas simples e compostas sob diferentes combinações de compósitos, ferramentas e parâmetros de corte visando a otimização do processo. Com os dados da otimização, foi possível avaliar os impactos de HSC e ACR sobre a qualidade dos furos gerados pela furação da junta simples (GFRP/Ti).

As principais conclusões sobre o impacto de HSC e ACR na furação das juntas híbridas simples (GFRP/Al e CFRP/Al) e compostas (Al/GFRP/Al e Al/CFRP/Al) foram:

- A velocidade de corte (v_c) mostrou-se significativa para o fator de delaminação ajustado (F_{da}). No entanto, a interação da v_c com o ar comprimido refrigerado (ACR) não demonstrou diferença significativa, permitindo que seja aplicado alta velocidade de corte (HSC) sem prejudicar a furação em juntas híbridas simples ou compostas.
- Embora não significativo, o efeito do ACR é positivo para manter as propriedades da matriz do compósito, preservando sua resistência, conservando as fibras e, conseqüentemente, gerando menor F_{da} .
- O tipo de compósito (GFRP e CFRP) demonstrou influência significativa para os defeitos observados no processo.
- O tipo de junta (simples ou composta) demonstrou influência significativa na delaminação dos materiais compósitos. As juntas compostas (Al/GFRP/Al e Al/CFRP/Al) impactaram significativamente no aumento da circularidade dos furos e na delaminação do compósito devido ao efeito da rebarba do alumínio na primeira interface (Al/GFRP e Al/CFRP).
- O avanço (f), nos níveis analisados, demonstrou influência significativa sobre a força de avanço (F_f), a rugosidade média (R_a) e a circularidade do furo na chapa de Al (t_{metal}) e,

quando combinado com o tipo de ferramenta ($f \times tt$) e com o tipo de compósito ($f \times ct$), afeta significativamente o fator de delaminação ajustado (F_{da}).

- A baixa influência da v_c na circularidade dos furos contribuiu para a obtenção de desvios dentro da tolerância IT7 com HSC ($v_c = 220$ m/min). Isso permite a sua implementação na furação com esta especificação de tolerância dimensional, melhorando a produtividade.
- A rugosidade mostrou-se dependente da v_c na furação da chapa de Al. Pode-se recomendar a utilização da menor v_c (40 m/min) quando este fator for considerado fundamental.
- Por fim, as variáveis de resposta combinadas mostram que a furação com ACR, $v_c = 40$ m/min e $f = 0,02$ mm/volta produzem furos com a melhor qualidade.

As conclusões mais importantes acerca do impacto de HSC e ACR na furação da junta híbrida simples GFRP/Ti foram:

- A contribuição do ar comprimido refrigerado (ACR) para o não aquecimento da matriz polimérica do GFRP, preservando sua resistência e conservando as fibras, promove menores valores de fator de delaminação (F_{da}) e de circularidade do furo (t_{comp}).
- Houve aumento da força de avanço ($F_{f,comp}$) devido à menor resistência térmica da matriz polimérica do GFRP, possivelmente devido à maior temperatura do processo sem ACR.
- O HSC resultou em valores mais baixos de F_{da} e $F_{f,comp}$ na furação de GFRP. No entanto, mesmo não tendo efeito significativo, o aumento de v_c promoveu crescimento em t_{comp} , provavelmente devido a $F_{f,comp}$ e ao efeito da deformação elástica em altas temperaturas.
- A ausência de ACR na furação do Ti-6Al-4V favoreceu a obtenção de menores valores de força de avanço ($F_{f,metal}$), circularidade do furo (t_{metal}) e rugosidade média (R_a) da parede do furo. Embora o ACR não tenha afetado significativamente a diminuição de R_a (pois não influenciou na redução do atrito), o efeito foi significativo em $F_{f,metal}$.
- A baixa v_c (40 m/min) gerou menores valores de t_{metal} e R_a na furação do Ti, mesmo sem efeito significativo. No entanto, HSC reduziu significativamente $F_{f,metal}$. Atribui-se para $v_c = 220$ m/min o aumento do arrasto dos resíduos do titânio pela superfície, afetando o acabamento dos furos, além do aumento do desgaste abrasivo da broca com maior v_c .
- O efeito combinado da furação com $v_c = 40$ m/min e ACR diminuiu a circularidade do furo e a rugosidade da parede no furo no Ti, possivelmente por causa do menor calor gerado na região de corte.

- Finalmente, a combinação de HSC com ACR alcança maior produtividade sem aumentar significativamente os defeitos observados nos furos na placa de compósito após a furação de juntas híbridas GFRP/Ti.

6.1 Sugestões para Trabalhos Futuros

- Avaliar a furação de juntas compostas com FRP reforçado com fibras naturais, que possuem características próprias de usinabilidade.
- Investigar o efeito de processos não convencionais, como a furação assistida por ultrassom, na furação das juntas híbridas compósito-metal.
- Determinar experimentalmente a pressão específica de corte para as diferentes composições de juntas compósito-metal em condições de lubrificação e refrigeração distintas.
- Aplicar dinamômetro piezelétrico não estacionário (rotativo) na determinação das forças de usinagem, as quais permitem avaliar as cargas distribuídas em diferentes pontos durante a furação e, por conseguinte, facilitar a correlação entre forças e desgastes nas brocas.
- Implementar um sistema de avaliação da delaminação utilizando micro-CT, possibilitando a análise da superfície interna distribuída e a quantificação dos danos internos.
- Analisar as variáveis que impactam na furação de elementos com diferentes FRP fabricados por enrolamento filamentar, como o ângulo de filamento.
- Estudar o efeito de HSC e ACR na tenacidade à fratura e na força crítica de delaminação (F_{cr}) para diferentes materiais compósitos reforçados por fibras.

7 REFERÊNCIAS

Aamir, M., Tolouei-Rad, M., Giasin, K., Nosrati, A. Recent advances in drilling of carbon fiber-reinforced polymers for aerospace applications: a review, **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, Vol. 105, pp. 2289-2308, 2019.

Abdelhafeez, A. M., Soo, S. L., Aspinwall, D. K., Dowson, A., Arnold, D. Burr formation and hole quality when drilling titanium and aluminium alloys, **Procedia CIRP**, Vol. 37, pp. 230-235, 2015.

Abhishek, K., Datta, S., Mahapatra, S. S. Optimization of thrust, torque, entry, and exist delamination factor during drilling of CFRP composites, **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, Vol. 76, pp. 401-416, 2014.

Abish, J., Samal, P., Narenther, M. S., Kannan, C., Balan, A. S. S. Assessment of drilling-induced damage in CFRP under chilled air environment, **Materials and Manufacturing Processes**, Vol. 33, pp. 1361-1368, 2018.

Abrão, A. M., Rubio, J. C. C., Faria, P. E., Davim, J. P. The effect of cutting tool geometry on thrust force and delamination when drilling glass fibre reinforced plastic composite, **Materials & Design**, Vol. 29, pp. 508-513, 2008.

Abrate, S., Walton, D. A. Machining of composite materials. Part I: Traditional methods, **Composites Manufacturing**, Vol. 3, pp. 75-83, 1992.

Ahmed, L. S., Govindaraju, N., Kumar, M. P. Experimental investigations on cryogenic cooling in the drilling of titanium alloy, **Materials and Manufacturing Processes**, Vol. 31, pp. 603-607, 2016.

Akhil, K. T., Shunmugesh, K., Aravind, S. Pramodkumar, M. Optimization of drilling characteristics using grey relational analysis (GRA) in glass fiber reinforced polymer (GFRP), **Materials Today: Proceedings**, Vol. 4, pp. 1812-1819, 2017.

Albuquerque, V. H. C., Tavares, J. M. R. S., Durão, L. M. P. Evaluation of delamination damage on composite plates using an artificial neural network for the radiographic image analysis, **Journal of Composite Materials**, Vol. 44, pp. 1139-1159, 2010.

Allegrini, A. Aspectos da furação do titânio 6Al4V com broca de aço rápido sinterizado e broca de metal-duro. Dissertação de Mestrado, UNESP, Guaratinguetá, 2014.

Alniak, M. O., Bedir, F. Changes of grain sizes and flow stresses of AA2014 and AA6063 aluminum alloys at high temperatures in various strain rates, **Turkish Journal of Engineering and Environmental Sciences**, Vol. 27, pp. 59-64, 2003.

Altin Karataş, M. Gökkaya, H. A review on machinability of carbon fiber reinforced polymer (CFRP) and glass fiber reinforced polymer (GFRP) composite materials, **Defence Technology**, Vol. 14, pp. 318-326, 2018.

AMS 4911R. Titanium alloy, sheet, strip, and plate 6Al-4V annealed, **Aerospace Material Specification**, AMS L vol. 4911, 2019.

Andrade, F., Cheikh, E., Ferreira, G. D. Análise do processo de furação de suportes em Alumínio 7075 para a fixação de grampos pneumáticos na indústria. **10° Congresso Brasileiro de Engenharia de Fabricação (COBEF)**, 2019.

Arola, D., Wang, D. H., Ramulu, M. Chip formation graphite/epoxy in orthogonal trimming of composite, **Composites**, Vol. 27, pp. 121-133, 1996.

Aurich, J. C., Dornfeld, D., Arrazola, P. J., Franke, V., Leitz, L., Min, S. Burrs - Analysis, control and removal, **CIRP Annals**. Vol. 58, pp. 519-542, 2009.

Aurich, J. C., Sudermann, H., Braun, O. Experimental investigation of burr formation in the surface grinding of tool steel, **Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture**, Vol. 220, pp. 489-497, 2006.

Ballou, J. R., Joshi, S. S., DeVor, R. E., Kapoor, S. G. Burr formation in drilling intersecting holes with machinable austempered ductile iron (MADITM), **Journal of Manufacturing Processes**, Vol. 9, pp. 35-46, 2007.

Ben Soussia, A., Mkaddem, A., El Mansori, M. Rigorous treatment of dry cutting of FRP – Interface consumption concept: A review, **International Journal of Mechanical Sciences**, Vol. 83, pp. 1-29, 2014.

Ben, W., Hang, G., Quan, W., Maoqing, W., Songpeng, Z. Influence of cutting heat on quality of drilling of carbon/epoxy composites, **Materials and Manufacturing Processes**, Vol. 27, pp. 968-972, 2012.

Bhagwat, P. M., Ramachandran, M. Raichurkar, P. Mechanical properties of hybrid glass/carbon fiber reinforced epoxy composites, **Materials Today: Proceedings**, Vol. 4, pp. 7375-7380, 2017.

Bhowmick, S., Alpas, A. T. Minimum quantity lubrication drilling of aluminium-silicon alloys in water using diamond-like carbon coated drills, **International Journal of Machine Tools and Manufacture**, Vol. 48, pp. 1429-1443, 2008.

Biermann, D., Heilmann, M. Improvement of workpiece quality in face milling of aluminum alloys, **Journal of Materials Processing Technology**, Vol. 210, pp. 1968-1975, 2010.

Biermann, D., Iovkov, I. Investigations on the thermal workpiece distortion in MQL deep hole drilling of an aluminium cast alloy, **CIRP Annals**, Vol. 64, pp. 85-88, 2015.

Braga, D. U., Diniz, A. E., Miranda, G. W., Coppini, N. L. Using a minimum quantity of lubricant (MQL) and a diamond coated tool in the drilling of aluminum–silicon alloys, **Journal of Materials Processing Technology**, Vol. 122, pp. 127-138, 2002.

Brinksmeier, E., Janssen, R. Drilling of multi-layer composite materials consisting of carbon fiber reinforced plastics (CFRP), titanium and aluminum alloys, **CIRP Annals**, Vol. 51, pp. 87-90, 2002.

Cantero, J. L., Tardío, M. M., Canteli, J. A., Marcos, M., Miguélez, M. H. Dry drilling of alloy Ti-6Al-4V, **International Journal of Machine Tools and Manufacture**, Vol. 45, pp. 1246-1255, 2005.

Carlos, J., Gutiérrez, H., Carlos, J., Rubio, C., Faria, P. E. usinabilidade de materiais compósitos poliméricos para aplicações automotivas, **Polímeros**, Vol. 24, pp. 711-719, 2014.

Çelik, A., Lazoglu, I., Kara, A., Kara, F. Wear on SiAlON ceramic tools in drilling of aerospace grade CFRP composites, **Wear**, Vol. 338, pp. 11-21, 2015.

Chen, W. C. 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.

Choi, J. Min, S., Dornfeld, D. A. modeling of inter-layer gap formation in drilling of a multi-layered material. **Consortium on Deburring and Edge Finishing (CODEF)**, Laboratory for Manufacturing and Sustainability (LMAS), University of California, Berkeley, pp. 36-41, 2003.

D’Orazio, A., El Mehtedi, M., Forcellese, A., Nardinocchi, A., Simoncini, M. Tool wear and hole quality in drilling of CFRP/AA7075 stacks with DLC and nanocomposite TiAlN coated tools, **Journal of Manufacturing Processes**, Vol. 30, pp. 582-592, 2017.

Dave, S., Vora, J. J., Thakkar, N., Singh, A., Srivastava, S., Gadhvi, B., Kumar, A. Optimization of EDM drilling parameters for aluminum 2024 alloy using response surface methodology and genetic algorithm, **Key Engineering Materials**, Vol. 706, pp. 3-8, 2016.

Davim, J. P., Reis, P. Damage and dimensional precision on milling carbon fiber-reinforced plastics using design experiments, **Journal of Materials Processing Technology**, Vol. 160, pp. 160-167, 2005.

Davim, J. P., Rubio, J. C., Abrao, A. M. 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.

Davim, J. P., Sreejith, P. S., Gomes, R., Peixoto, C. Experimental studies on drilling of aluminium (AA1050) under dry, minimum quantity of lubricant, and flood-lubricated conditions, **Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture**, Vol. 220, pp. 1605-1611, 2006.

Debnath, K., Singh, I., Dvivedi, A. Rotary mode ultrasonic drilling of glass fiber-reinforced epoxy laminates, **Journal of Composite Materials**, Vol. 49, pp. 949-963, 2015.

Devitte, C., Souza, G. S. C., Souza, A. J., Tita, V. Optimization for drilling process of metal-composite aeronautical structures, **Science and Engineering of Composite Materials**, Vol. 28, pp. 264-275, 2021.

Diniz, A. E. Marcondes, F. C., Coppini, N. L. **Tecnologia da Usinagem dos Materiais**, Artliber, São Paulo, 2014.

Dixit, U. S., Sarma, D. K. e Davim, J. P. **Environmentally Friendly Machining**, Springer, New York, 2012.

Dornfeld, D. A., Kim, J. S., Dechow, H., Hewson, J., Chen, L. J. Drilling burr formation in titanium alloy, Ti-6Al-4V, **CIRP Annals**, Vol. 48, pp. 73-76, 1999.

Durão, L. M. P., Gonçalves, D. J. S., Tavares, J. M. R. S., De Albuquerque, V. H. C., Marques, A. T. T. Comparative analysis of drills for composite laminates, **Journal of Composite Materials**, V. 46, pp. 1649-1659, 2012.

Durão, L. M. P., Gonçalves, D. J., Tavares, J. M. R., de Albuquerque, V. H. C., Vieira, A. A., Marques, A. T. Drilling tool geometry evaluation for reinforced composite laminates, **Composite Structures**, Vol. 92, pp. 1545-1550, 2010.

Durão, L. M. P., Tavares, J. M. R. S., de Albuquerque, V. H. C., Gonçalves, D. J. S. Damage evaluation of drilled carbon/epoxy laminates based on area assessment methods, **Composite structures**, Vol. 96, pp. 576-583, 2013.

Enemuoh, E. U., El-Gizawy, A. S., Chukwujekwu Okafor, A. An approach for development of damage-free drilling of carbon fiber reinforced thermosets, **International Journal of Machine Tools and Manufacture**, Vol. 41, pp. 1795-1814, 2001.

Ezugwu, E. O. Titanium alloys and their machinability a review, **Journal of Materials Processing Technology**, Vol. 68, pp. 262-274, 1997.

Faraz, A., Biermann, D., Weinert, K. Cutting edge rounding: An innovative tool wear criterion in drilling CFRP composite laminates, **International Journal of Machine Tools and Manufacture**, Vol. 49, pp. 1185-1196, 2009.

Faria, P. E. **Estudo Sobre a Furação de Compósito de Resina Epóxi Reforçado com Fibras de Vidro**. Tese de Doutorado, UFMG, Belo Horizonte, 2007.

Feito, N., López-Puente, J., Santiuste, C. Miguélez, M. H. Numerical prediction of delamination in CFRP drilling, **Composite Structures**, Vol. 108, pp. 677-683, 2014.

Fernández-Pérez, J., Cantero, J. L., Díaz-Álvarez, J., Miguélez, M. H. Hybrid composite-metal stack drilling with different minimum quantity lubrication levels, **Materials (Basel)**, Vol. 12, A. 448, 2019.

Foreman, J. P., Porter, D., Behzadi, S., Curtis, P. T., Jones, F. R. Predicting the thermomechanical properties of an epoxy resin blend as a function of temperature and strain rate, **Composites Part A: Applied Science and Manufacturing**, Vol. 41, pp. 1072-1076, 2010.

Fu, R., Jia, Z., Wang, F., Jin, Y., Sun, D., Yang, L., Cheng, D. Drill-exit temperature characteristics in drilling of UD and MD CFRP composites based on infrared thermography, **International Journal of Machine Tools and Manufacture**, Vol. 135, pp. 24-37, 2018.

Gaitonde, V., Karnik, S. R., Rubio, J. C., Correia, A. E., Abrao, A. M., Davim, J. P. Analysis of parametric influence on delamination in high-speed drilling of carbon fiber reinforced plastic composites, **Journal of Materials Processing Technology**, Vol. 203, pp. 431-438, 2008.

Garrick, R. Drilling advanced aircraft structures with PCD (poly-crystalline diamond) drills. **SAE Aerospace Technology Conference and Exposition**, 2007

Gaugel, S., Stripathy, P., Haeger, A., Meinhard, D., Bernthaler, T., Lissek, F., Schneider, G. A comparative study on tool wear and laminate damage in drilling of carbon-fiber reinforced polymers (CFRP), **Composite Structures**, Vol. 155, pp. 173-183, 2016.

Geng, D., Liu, Y., Shao, Z., Lu, Z., Cai, J., Li, X., Zhang, D. Delamination formation, evaluation and suppression during drilling of composite laminates: A review, **Composite Structures**, Vol. 216, pp. 168-186, 2019.

Giasin, K. Ayvar-Soberanis, S. Evaluation of workpiece temperature during drilling of GLARE fiber metal laminates using infrared techniques: Effect of cutting parameters, fiber orientation and spray mist application, **Materials (Basel)**, Vol. 9, A. 622, 2016.

Giasin, K., Ayvar-Soberanis, S. Microstructural investigation of drilling induced damage in fibre metal laminates constituents, **Composites Part A: Applied Science and Manufacturing**, Vol. 97, pp. 166-178, 2017.

Gill, A. F., Robinson, P., Pinho, S. Effect of variation in fibre volume fraction on modes

I and II delamination behaviour of 5HS woven composites manufactured by RTM, **Composites Science and Technology**, Vol. 69, pp. 2368-2375, 2009.

Giroto, F., Dau, F., Gutiérrez-orrantia, M. E. New analytical model for delamination of CFRP during drilling, **Journal of Materials Processing Technology**, Vol. 240, pp. 332-343, 2017.

Guedes, D. E. **Análise Metrológica de Acabamento de Superfícies Aplicada a Componentes Mecânicos**, Dissertação de Mestrado, Universidade Nova de Lisboa, 2014.

Guibert, N., Paris, H., Rech, J., Claudin, C. Identification of thrust force models for vibratory drilling, **International Journal of Machine Tools and Manufacture**, Vol. 49, pp. 730-738, 2009.

Ha, S. J., Kim, K. B., Yang, J. K., Cho, M. W. Influence of cutting temperature on carbon fiber-reinforced plastic composites in high-speed machining, **Journal of Mechanical Science and Technology**, Vol. 31, pp. 1861-186, 2017.

Hale, J. Boeing 787 from the ground up, **Aero Magazine**, Vol. 6, pp. 17-23, 2006.

Hamade, R. F., Ismail, F. A case for aggressive drilling of aluminum, **Journal of Materials Processing Technology**, Vol. 166, pp. 86-97, 2005.

Hewson, J. Exit burr size and shape in backplate assisted drilling of Ti-6Al-4V. **Consortium on Deburring and Edge Finishing (CODEF)**, Laboratory for Manufacturing Automation (LMA), University of California, Berkeley, pp. 35-36, 1998.

Hocheng, H., Dharan, C. K. H. Delamination during drilling in composite laminates, **Journal of Manufacturing Science and Engineering**, Vol. 112, pp. 236-239, 1990.

Hocheng, H., Tsao, C. C. Effects of special drill bits on drilling-induced delamination of composite materials, **International Journal of Machine Tools and Manufacture**, Vol. 46, pp. 1403-1416, 2006.

Hocheng, H.; Tsao, C. C. The path towards delamination-free drilling of composite materials, **Journal of Materials Processing Technology**, Vol. 167, pp. 251-264, 2005.

Hoffmann, N., Souza, G. S. C., Souza, A. J., Tita, V. Delamination and hole wall roughness evaluation in air-cooled drilling of carbon fiber-reinforced polymer, **Journal of Composite Materials**, Vol. 55, pp. 3161-3174, 2021.

Hou, G., Qiu, J., Zhang, K., Cao, S., Cheng, H., Luo, B., Cheng, Y. Comparative tool wear and hole quality investigation in drilling of aerospace grade T800 CFRP using different external cooling lubricants, **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, Vol. 106, pp. 937-951, 2020.

Houseman, O., Tiwari, A. Roy, R. **A Methodology for the Selection of New Technologies in the Aviation Industry**, Decision Engineering Report (DEG) Series, Cranfield University, 2004.

Huda, Z., Taib, N. I., Zaharinie, T. Characterization of 2024-T3: An aerospace aluminum alloy, **Materials Chemistry and Physics**, Vol. 113, pp. 515-517, 2009.

Iliescu, D., Gehin, D., Gutierrez, M. E., Girot, F. Modeling and tool wear in drilling of CFRP, **International Journal of Machine Tools and Manufacture**, Vol. 50, pp. 204-213, 2010.

Isbilir, O., Ghassemieh, E. Comparative study of tool life and hole quality in drilling of CFRP/titanium stack using coated carbide drill, **Machining Science and Technology**. Vol. 17, pp. 380-409, 2013.

Isbilir, O., Ghassemieh, E. Numerical investigation of the effects of drill geometry on drilling induced delamination of carbon fiber reinforced composites, **Composite Structures**, Vol. 105, pp. 126-133, 2013.

ISO 1302, 2002. **Geometrical Product Specifications (GPS) - Indication of surface texture in technical product documentation**, Geneva, Switzerland, 2002.

Joshi, S., Rawat, K., Balan, A. S. S. A novel approach to predict the delamination factor for dry and cryogenic drilling of CFRP, **Journal of Materials Processing Technology**, Vol. 262, pp. 521-531, 2018.

Karatas, M. A. A review on machinability of carbon fiber reinforced polymer (CFRP) and glass fiber reinforced polymer (GFRP) composite materials, **Defence Technology**, V. 14, pp. 318-326, 2018.

Katiyar, P. K., Singh, P. K., Singh, R., Kumar, A. L. Modes of failure of cemented tungsten carbide tool bits (WC/Co): A study of wear parts, **International Journal of Refractory Metals and Hard Materials**, Vol. 54, pp. 27-38, 2016.

Katnam, K. B., Da Silva, L. F. M., Young, T. M. Bonded repair of composite aircraft structures: A review of scientific challenges and opportunities, **Progress in Aerospace Sciences**, Vol. 61, pp. 26-42, 2013.

Kelly, J. F., Cotterell, M. G. Minimal lubrication machining of aluminium alloys, **Journal of Materials Processing Technology**, Vol. 120, pp. 327-334, 2002.

Khashaba, U. A. Drilling of polymer matrix composites: A review, **Journal of Composite Materials**, Vol. 47, pp. 1817-1832, 2013.

Khashaba, U. A., El-Keran, A. A. Drilling analysis of thin woven glass-fiber reinforced

epoxy composites, **Journal of Materials Processing Technology**, Vol. 249, pp. 415-425, 2017.

Khashaba, U. A., El-Sonbaty, I. A., Selmy, A. I., Megahed, A. A. Machinability analysis in drilling woven GFR/epoxy composites: Part I - Effect of machining parameters, **Composites Part A: Applied Science and Manufacturing**, Vol. 41, pp. 391-400, 2010.

Kihlman, H. **Affordable Automation for Airframe Assembly: Developing of Key Enabling Technologies**. Linköping University Electronic Press, 2005.

Kilickap, E. Modeling and optimization of burr height in drilling of Al-7075 using Taguchi method and response surface methodology, **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, Vol. 49, pp. 911-923, 2010.

Kim, D., Beal, A., Kwon, P. Effect of tool wear on hole quality in drilling of carbon fiber reinforced plastic–titanium alloy stacks using tungsten carbide and polycrystalline diamond tools, **Journal of manufacturing science and engineering**, Vol. 138, pp. 1-11, 2016.

Kim, D., Ramulu, M. Drilling process optimization for graphite/bismaleimide-titanium alloy stacks, **Composite structures**, Vol. 63, pp. 101-114, 2004.

Kim, D., Ramulu, M. Study on the drilling of titanium/graphite hybrid composites, **Journal of Engineering materials and Technology**, Vol. 129, pp. 99-106, 2007.

Kim, D., Ramulu, M., Garbini, J. Hole quality in drilling of graphite/bismaleimide-titanium stacks. **33th International SAMPE Technical Conference**, pp. 1315-1326, 2001.

Kishawy, H. A., Dumitrescu, M., Ng, E. G., Elbestawi, M. A. Effect of coolant strategy on tool performance, chip morphology and surface quality during high-speed machining of A356 aluminum alloy, **International Journal of Machine Tools and Manufacture**. Vol. 45, pp. 219-227, 2005.

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

Ko, S. L., Lee, J. K. Analysis of burr formation in drilling with a new-concept drill, **Journal of Materials Processing Technology**, Vol. 113, pp. 392-398, 2001.

Ko, S.-L., Chang, J.-E., Yang, G.-E. Burr minimizing scheme in drilling, **Journal of Materials Processing Technology**, Vol. 140, pp. 237-242, 2003.

Krishnaraj, V., Prabukarthi, A., Ramanathan, A., Elanghovan, N., Kumar, M. S., Zitoune, R., Davim, J. P. Composites : Part B Optimization of machining parameters at high speed drilling of carbon fiber reinforced plastic (CFRP) laminates, **Composites Part B: Engineering**, Vol. 43, pp. 1791-1799, 2012.

Krishnaraj, V., Zitoune, R., Collombet, F. Comprehensive review on drilling of

multimaterial stacks, **Journal of Machining and Forming Technologies**, Vol. 2, pp. 1-32, 2010.

Krishnaraj, V., Zitoune, R., Collombet, F. Investigations on drilling of multimaterial and analysis by ANN, **Key Engineering Materials**, Vol. 443, pp. 347-352, 2010.

Kumar, D. Sing, K. K. K. 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, pp. 7618-7627, 2017.

Kumar, D., Singh, K. K., Zitoune, R. Experimental investigation of delamination and surface roughness in the drilling of GFRP composite material with different drills, **Advanced Manufacturing: Polymer & Composites Science**, Vol. 2, pp. 47-56, 2016.

Kuo, C. L., Soo, S. L., Aspinwall, D. K., Thomas, W., Bradley, S., Pearson, D., Leahy, W. The effect of cutting speed and feed rate on hole surface integrity in single-shot drilling of metallic-composite stacks, **Procedia CIRP**, Vol. 13, pp. 405-410, 2014.

Kurt, M., Kaynak, Y., Bagci, E. Evaluation of drilled hole quality in Al 2024 alloy, **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, V. 37, pp. 1051-1060, 2008.

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

Lazar, M.-B., Xirouchakis, P. Experimental analysis of drilling fiber reinforced composites, **International Journal of Machine Tools and Manufacture**. Vol. 51, pp. 937-946, 2011.

Lee, S. H., Saito, Y., Sakai, T. Utsunomiya, H. Microstructures and mechanical properties of 6061 aluminum alloy processed by accumulative roll-bonding, **Materials Science and Engineering: A**, Vol. 325, pp. 228-235, 2002.

Lees, J. Makarov, G. Mechanical/bonded joints for advanced composite structures, **Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Structures and Buildings**, Vol. 157, pp. 91-97, 2004.

Li, H., He, G., Qin, X., Wang, G., Lu, C., Gui, L. Tool wear and hole quality investigation in dry helical milling of Ti-6Al-4V alloy, **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, Vol. 71, pp. 1511-1523, 2014.

Li, R., Shih, A. J. Tool temperature in titanium drilling. **Journal of Manufacturing Science and Engineering**, Vol. 129, pp. 740-749, 2007.

Li, S., Qin, X., Jin, Y., Sun, D., Li, Y. A comparative study of hole-making performance

by coated and uncoated WC/Co cutters in helical milling of Ti/CFRP stacks, **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, Vol. 94, pp. 2645-2658, 2018.

Linbo, Z., Lijang, W., Xin, W. Study on vibration drilling of fiber reinforced plastics with hybrid variation parameters method, **Composites Part A: Applied Science and Manufacturing**, Vol. 34, pp. 237-244, 2003.

Liu, D., Tang, Y. Cong, W. L. A review of mechanical drilling for composite laminates, **Composite Structures**, Vol. 94, pp. 1265-1279, 2012.

Ribeiro, J. L. D., ten Caten, C. S. **Projeto de Experimentos** (Apostila). Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção, UFRGS, Porto Alegre, 2011.

Machado, C. M. M. **Empirical Models for Quantification of Machining Damage in Composite Materials**. Dissertação de Mestrado, Universidade Nova de Lisboa, 2012.

Machado, C. M., Silva, D., Vidal, C., Soares, B., Teixeira, J. P. A new approach to assess delamination in drilling carbon fibre-reinforced epoxy composite materials, **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, Vol. 112, pp. 3389-3398, 2021.

Makhdam, F., Phadnis, V. A., Roy, A., Silberschmidt, V. V. Effect of ultrasonically-assisted drilling on carbon-fibre-reinforced plastics, **Journal of Sound and Vibration**, Vol. 333, pp. 5939-5952, 2014.

Malacarne, D., Devitte, C., Souza, A. J. Otimização dos parâmetros de corte na furação de GFRP utilizando o projeto de experimentos Box-Behnken. **10º Congresso Brasileiro de Engenharia de Fabricação (COBEF)**, 2019.

Mallick, P. K. **Fiber-Reinforced Composites: Materials, Manufacturing, and Design**. CRC Press, 2007.

Manjunatha, N. N. **Ann Model to Predict Burr Height and Thickness**. Dissertação de Mestrado, Wichita State University, 2007.

MATWEB, L. L. C. **Material property data, Data base of materials data sheets**, 2022.

Marques, A. T., Durão, L. M., Magalhães, A. G., Silva, J. F. Tavares, J. M. R. S. Delamination analysis of carbon fibre reinforced laminates: Evaluation of a special step drill, **Composites Science and Technology**, Vol. 69, pp. 2376-2382, 2009.

Matsumura, T., Tamura, S. Cutting force model in drilling of multi-layered materials, **Procedia CIRP**, Vol. 8, pp. 182-187, 2013.

Matsuzaki, R., Shibata, M. Todoroki, A. Improving performance of GFRP/aluminum

single lap joints using bolted/co-cured hybrid method, **Composites Part A: Applied Science and Manufacturing**, Vol. 39, pp. 154-163, 2008.

Merino-Pérez, J. L., Royer, R., Merson, E., Lockwood, A., Ayvar-Soberanis, S., Marshall, M. B. Influence of workpiece constituents and cutting speed on the cutting forces developed in the conventional drilling of CFRP composites. **Composite Structures**, Vol. 140, pp. 621-629, 2016.

Meshreki, M., Damir, A., Sadek, A., Attia, M. H. Investigation of drilling of CFRP-aluminum stacks under different cooling modes. **ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition**, 2016.

Miracle, D.B.; Donaldson, S. L. **ASM Handbook, Vol 21: Composites**, ASM International, 2001.

Mishra, R., Malik, J., Singh, I. Davim, J. P. Neural network approach for estimating the residual tensile strength after drilling in uni-directional glass fiber reinforced plastic laminates., **Materials & Design**. Vol. 31, pp. 2790–2795, 2010.

Mohan, N. S., Kulkarni, S. M., Ramachandra, A. Delamination analysis in drilling process of glass fiber reinforced plastic (GFRP) composite materials, **Journal of Materials Processing Technology**, Vol. 186, pp. 265–271, 2007.

Montoya, M., Calamaz, M., Gehin, D., Girot, F. Evaluation of the performance of coated and uncoated carbide tools in drilling thick CFRP/aluminium alloy stacks, **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, Vol. 68, pp. 2111-2120, 2013.

M'Saoubi, R., Axinte, D., Soo, S. L., Nobel, C., Attia, H., Kappmeyer, G., Sim, W. M. High performance cutting of advanced aerospace alloys and composite materials, **CIRP Annals**, Vol. 64, pp. 557-580, 2015.

Murphy, C., Byrne, G., Gilchrist, M. D. The performance of coated tungsten carbide drills when machining carbon fibre-reinforced epoxy composite materials, **Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture**. Vol. 216, pp. 143-152, 2002.

Nam, J. S., Lee, P. H., Lee, S. W. Experimental characterization of micro-drilling process using nanofluid minimum quantity lubrication, **International Journal of Machine Tools and Manufacture**, Vol. 51, pp. 649-652, 2011.

NBR 6409. **Tolerâncias geométricas - Tolerâncias de forma, orientação, posição e batimento – Generalidades**, Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), 1997.

NBR ISO 4287. **Especificações geométricas do produto (GPS) – Rugosidade:**

Método do perfil - Termos, definições e parâmetros da rugosidade, Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), 2002.

NBR ISO 4288. **Especificações geométricas de produto (GPS) - Rugosidade: Método do perfil - Regras e procedimentos para avaliação de rugosidade**, Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), 2008.

Neugebauer, R., Drossel, W. G., Ihlenfeldt, S., Richter, C. Thermal interactions between the process and workpiece, **Procedia CIRP**, Vol. 4, pp. 63-66, 2012.

Ng, C. K., Melkote, S. N., Rahman, M., Senthil Kumar, A. Experimental study of micro- and nano-scale cutting of aluminum 7075-T6, **International Journal of Machine Tools and Manufacture**, Vol. 46, pp. 929-936, 2006.

Nouari, M., List, G., Girot, F., Géhin, D. Effect of machining parameters and coating on wear mechanisms in dry drilling of aluminium alloys, **International Journal of Machine Tools and Manufacture**, Vol. 45, pp. 1436-1442, 2005.

Nouari, M., List, G., Girot, F., Coupard, D. Experimental analysis and optimisation of tool wear in dry machining of aluminium alloys, **Wear**, Vol. 255, pp. 1359-1368, 2003.

Orifici, A. C., Herszberg, I., Thomson, R. S. Review of methodologies for composite material modelling incorporating failure, **Composite Structures**, Vol. 86, pp. 194-210, 2008.

Pacheco, R. E. R., Lauro, C. H., Pereira, R. B. D., Carou, D., Davim, J. P. Enhancing productivity by means of high feed rate in the drilling of Al 2011 aluminium alloy, **Arabian Journal for Science and Engineering**, Vol. 44, pp. 8035-8042, 2019.

Palanikumar, K., Rubio, J. C., Abrão A., Esteves A., Davim, J. P. Statistical analysis of delamination in drilling glass fiber-reinforced plastics (GFRP), **Journal of Reinforced Plastics and Composites**, Vol. 27, pp. 1615-1623, 2008.

Park, K. H., Beal, A., Kim, D. D. W., Kwon, P., Lantrip, J. Tool wear in drilling of composite/titanium stacks using carbide and polycrystalline diamond tools, **Wear**, Vol. 271, pp. 2826-2835, 2011.

Park, K.-H., Beal, A., Kim, D. D.-W., Kwon, P., Lantrip, J. A comparative study of carbide tools in drilling of CFRP and CFRP-Ti stacks, **Journal of Manufacturing Science and Engineering**, Vol. 136, pp. 145-152, 2014.

Peña, B., Aramendi, G., Rivero, A. De Lacalle, L. N. L. Monitoring of drilling for burr detection using spindle torque, **International Journal of Machine Tools and Manufacture**, Vol. 45, pp. 1614-1621, 2005.

Pereira, O., Martín-Alfonso, J. E., Rodríguez, A., Calleja, A., Fernández-Valdivielso,

A., De Lacalle, L. L. Sustainability analysis of lubricant oils for minimum quantity lubrication based on their tribo-rheological performance, **Journal of Cleaner Production**, Vol. 164, pp. 1419-1429, 2017.

Phadnis, V. A., Roy, A., Silberschmidt, V. V. Finite element analysis of drilling in carbon fiber reinforced polymer composites, **Journal of Physics: Conference Series**, Vol. 382, pp. XX, 2012.

Pinto, G. T. **Análise da Influência da Geometria de Brocas Especiais na Furação de Chapas Finas Aeronáuticas**, Dissertação de Mestrado, UFSC, Florianópolis, 2010.

Poutord, A., Rossi, F., Poulachon, G., M'Saoubi, R., Abrivard, G. Local approach of wear in drilling Ti6Al4V/CFRP for stack modelling, **Procedia CIRP**, Vol. 8, pp. 316-321, 2013.

Prasanna, J., Karunamoorthy, L., Venkat Raman, M., Prashanth, S., Raj Chordia, D. Optimization of process parameters of small hole dry drilling in Ti-6Al-4V using Taguchi and grey relational analysis, **Measurement**, Vol. 48, pp. 346-354, 2014.

Qi, Z., Ge, E., Yang, J., Li, F., Jin, S. Influence mechanism of multi-factor on the diameter of the stepped hole in the drilling of CFRP/Ti stacks, **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, Vol. 113, pp. 923-933, 2021.

Qin, S., Li, Z. W., Zhang, H. Z., An, Q. L., Chen, M. Experimental study on orthogonal cutting of 0° T700/LT03A CFRP uniform laminates, **Materials Science Forum**, Vol. 800, pp. 76-80, 2014.

Raj, D. S., Karunamoorthy, L. Study of the effect of tool wear on hole quality in drilling CFRP to select a suitable drill for multi-criteria hole quality, **Materials and Manufacturing Processes**, Vol. 31, pp. 587-592, 2016.

Raja, D.B.P., Retnam, B.S.J., Ramachandran, M., Sivapragash, M. Analysis of mechanical properties of glass and carbon fiber reinforced polymer material, **Journal of Applied Engineering Research**, Vol. 10, pp. 10387-10391, 2015.

Ramirez, C., Poulachon, G., Rossi, F., M'Saoubi, R. Tool wear monitoring and hole surface quality during CFRP drilling, **Procedia CIRP**, Vol. 13, pp. 163-168, 2014.

Ramulu, M., Branson, T., Kim, D. A study on the drilling of composite and titanium stacks, **Composite Structures**, Vol. 54, pp. 67-77, 2001.

Rawat, S., Attia, H. Wear mechanisms and tool life management of WC-Co drills during dry high speed drilling of woven carbon fibre composites, **Wear**, Vol. 267, pp. 1022-1030, 2009.

Rivero, A., Aramendi, G., Herranz, S., De Lacalle, L. N. L. An experimental investigation of the effect of coatings and cutting parameters on the dry drilling performance of aluminium alloys, **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, Vol. 28, pp. 1-11, 2006.

Roy, P., Sarangi, S. K., Ghosh, A., Chattopadhyay, A. K. Machinability study of pure aluminium and Al-12% Si alloys against uncoated and coated carbide inserts, **International Journal of Refractory Metals and Hard Materials**, Vol. 27, pp. 535-544, 2009.

Rubio, J. C., Silva, L. R., Abrão, A. M., Faria, P. E., Correia, A. E., Davim, J. P. C. Furação com alta velocidade de corte em compósitos poliméricos reforçados com fibra de vidro, **Ciência e Tecnologia dos Materiais**, Vol. 19, pp. 83-87, 2007.

Sala, G. Composite degradation due to fluid absorption, **Composites Part B: Engineering**, Vol. 31, pp. 357-373, 2000.

Sandvik Coromant. **Guia Técnico e Catálogos de Produtos**, São Paulo. Brasil, 2011.

Santos, M. C., Machado, A. R., Sales, W. F., Barrozo, M. A. S., Ezugwu, E. O. Machining of aluminum alloys: a review, **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, Vol. 86, pp. 3067-3080, 2016.

Sardiñas, R. Q., Reis, P., Davim, J. P. Multi-objective optimization of cutting parameters for drilling laminate composite materials by using genetic algorithms, **Composites Science and Technology**, Vol. 66, pp. 3083-3088, 2006.

SenthilKumar, M., Prabukarthi, A., Krishnaraj, V. Study on tool wear and chip formation during drilling carbon fiber reinforced polymer (CFRP)/titanium alloy (Ti6Al4V) stacks, **Procedia engineering**, Vol. 64, pp. 582–592, 2013.

Shackelford, J. F. **Introduction to Materials Science for Engineers**, 8.ed., Prentice Hall, Londres, 2015.

Sharif, S., Rahim, E. A. Performance of coated- and uncoated-carbide tools when drilling titanium alloy-Ti-6Al4V, **Journal of Materials Processing Technology**, Vol. 185, pp. 72-76, 2007.

Sharma, A. K., Tiwari, A. K., Dixit, A. R. Effects of Minimum Quantity Lubrication (MQL) in machining processes using conventional and nanofluid based cutting fluids: A comprehensive review, **Journal of Cleaner Production**, Vol. 127, pp. 1-18, 2016.

Sharman, A. R. C., Amarasinghe, A., Ridgway, K. Tool life and surface integrity aspects when drilling and hole making in Inconel 718, **Journal of Materials Processing Technology**, Vol. 200, pp. 424-432, 2008.

Shyha I, Soo SL, Aspinwall D, Bradley S. Effect of laminate configuration and feed rate on cutting performance when drilling holes in carbon fibre reinforced plastic composites, **Journal of Materials Processing Technology**, Vol. 210, pp. 1023-1034, 2010.

Shyha, I. S., Aspinwall, D. K., Soo, S. L. Bradley, S. Drill geometry and operating effects when cutting small diameter holes in CFRP, **International Journal of Machine Tools and Manufacture**, Vol. 49, pp. 1008-1014, 2009.

Shyha, I. S., Soo, S. L., Aspinwall, D. K., Bradley, S., Perry, R., Harden, P., Dawson, S. Hole quality assessment following drilling of metallic-composite stacks, **International Journal of Machine Tools and Manufacture**, Vol. 51, pp. 569-578, 2011.

Sidik, N. A. C., Samion, S., Ghaderian, J., Yazid, M. N. A. W. M. Recent progress on the application of nanofluids in minimum quantity lubrication machining: A review, **International Journal of Heat and Mass Transfer**, Vol. 108, pp. 79-89, 2017.

Silva, D., Pamies Teixeira, J., Machado, C. M. Methodology analysis for evaluation of drilling-induced damage in composites, **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, Vol. 71, pp. 1919-1928, 2014.

Silva, J. A. **Análise do Processo de Furação em Compósito com Matriz de Poliéster Reforçado com Fibras de Vidro**. Dissertação de Mestrado, UFSC, Florianópolis, 2015.

Silva, J. D., Saramago, S. F. P., Machado, A. R. Optimization of the cutting conditions (V_c , f_z e d_{oc}) for burr minimization in face milling of mould steel, **Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering**, Vol. 31, pp. 151-160, 2009.

Silva, J. M. P. **Estudo da Delaminação em Compósitos de Epóxido Reforçado com Fibra de Carbono**. Dissertação de Mestrado. Instituto Politécnico do Porto, Portugal, 2016.

Sorrentino, L., Turchetta, S., Bellini, C. A new method to reduce delaminations during drilling of FRP laminates by feed rate control, **Composite Structures**, Vol. 186, pp. 154-164, 2018.

Soutis, C. Fibre reinforced composites in aircraft construction, **Progress in Aerospace Sciences**, Vol. 41, pp. 143-151, 2005.

Srinivasan, T., Palanikumar, K., Rajagopal, K., Latha, B. Optimization of delamination factor in drilling GFR–polypropylene composites, **Materials and Manufacturing Processes**, Vol. 32, pp. 226-233, 2017.

Stemmer, C. E. **Ferramentas de Corte II: Brocas, alargadores, ferramentas de roscar, fresas, brochas, rebolos e abrasivos**, Editora da UFSC, Florianópolis, 2005.

Su, C., Cheng, X., Yan, X., Zheng, G., Li, Y., Mu, Z. Helical milling for making holes

on carbon fiber-reinforced polymer, **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, Vol. 121, pp. 5197-5205, 2022.

Sun, S., Brandt, M., Dargusch, M. S. Machining Ti-6Al-4V alloy with cryogenic compressed air cooling, **International Journal of Machine Tools and Manufacture**, Vol. 50, pp. 933-942, 2010.

Tan, C. L., Azmi, A. I., Muhammad, N. Delamination and surface roughness analyses in drilling hybrid Carbon/Glass composite, **Materials and Manufacturing Processes**, Vol. 31, pp. 1366-1376, 2016.

Tang, Z. T., Liu, Z. Q., Pan, Y. Z., Wan, Y., Ai, X. The influence of tool flank wear on residual stresses induced by milling aluminum alloy, **Journal of Materials Processing Technology**, Vol. 209, pp. 4502-4508, 2009.

Tavares, C. M. M. **Influência da Força de Aperto na Minimização do Dano em Furação a Alta Velocidade em Materiais Compósitos**, Dissertação de Mestrado, Universidade Nova de Lisboa, 2013.

Tsao, C. C., Hocheng, H. Computerized tomography and C-Scan for measuring delamination in the drilling of composite materials using various drills, **International Journal of Machine Tools and Manufacture**, V. 45, pp. 1282-1287, 2005.

Tsao, C. C., Hocheng, H. Parametric study on thrust force of core drill, **Journal of Materials Processing Technology**, Vol. 192, pp. 37-40, 2007.

Turki, W., Hang, G., Quan, W., Maoqing, W., Songpeng, Z. Influence of cutting heat on quality of drilling of carbon/epoxy composites, **Materials and Manufacturing Processes**, Vol. 27, pp. 968-972, 2012.

Turki, Y., Habak, M., Velasco, R., Aboura, Z., Khellil, K., Vantomme, P. Experimental investigation of drilling damage and stitching effects on the mechanical behavior of carbon/epoxy composites, **International Journal of Machine Tools and Manufacture**, Vol. 87, pp. 61-72, 2014.

Veiga, C., Davim, J. P., Loureiro, A. J. R. Review on machinability of titanium alloys: The process perspective, **Reviews on Advanced Materials Science**, V. 34, pp. 148-164, 2013.

Velaga, M., Cadambi, R. M. Drilling of GFRP composites for minimising delamination effect, **Materials Today: Proceedings**, Vol. 4, pp. 11229-11236, 2017.

Vieira, J. T., de Oliveira, J. A., Arruda, É. M., Ribeiro Filho, S. L. M., Brandão, L. C. Influência da afiação de brocas HSS no processo de furação da liga de alumínio 7075. **9º Congresso Brasileiro de Engenharia de Fabricação (COBEF)**, 2017.

Wang, B., Yin, W., Wang, M., Zheng, Y., Li, X., Ma, Z. Edge chipping mechanism and failure time prediction on carbide cemented tool during drilling of CFRP/Ti stack, **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, Vol. 91, pp. 3015-3024, 2017.

Wang, C. Y., Chen, Y. H., An, Q. L., Cai, X. J., Ming, W. W., Chen, M. Drilling temperature and hole quality in drilling of CFRP/aluminum stacks using diamond coated drill, **International Journal of Precision Engineering and Manufacturing**, Vol. 16, pp. 1689-1697, 2015.

Wang, C. Y., Chen, Y. H., An, Q. L., Cai, X. J., Ming, W. W., Chen, M. Drilling temperature and hole quality in drilling of CFRP/aluminum stacks using diamond coated drill, **International Journal of Precision Engineering and Manufacturing**, Vol. 16, pp. 1689-1697, 2015.

Wang, D. H., Ramulu, M., Arola, D. Orthogonal cutting mechanisms of graphite/epoxy composite. Part I: unidirectional laminate, **International Journal of Machine Tools and Manufacture**, Vol. 35, pp. 1623-1638, 1995.

Wang, F., Cheng, D., Zhang, B., Yan, J., Ma, J. Reversed-Air Cooling Technology for High-Quality Drilling of CFRP, **Applied Composite Materials**, Vol. 26, pp. 857-870, 2019.

Wang, X., Kwon, P. Y., Sturtevant, C., Kim, D. D. W., Lantrip, J. Comparative tool wear study based on drilling experiments on CFRP/Ti stack and its individual layers, **Wear**, Vol. 317, pp. 265-276, 2014.

Wang, X., Kwon, P. Y., Sturtevant, C., Lantrip, J. Tool wear of coated drills in drilling CFRP, **Journal of Manufacturing Processes**, Vol. 15, pp. 127-135, 2013.

Weinert, K., Inasaki, I., Sutherland, J. W., Wakabayashi, T. Dry machining and minimum quantity lubrication, **CIRP Annals**, Vol. 53, pp. 511-537, 2004.

Weinert, K., Kempmann, C. Cutting temperatures and their effects on the machining behaviour in drilling reinforced plastic composites, **Advanced Engineering Materials**, Vol. 6, pp. 684-689, 2004.

Wika, K. K., Sharman, A. R. C., Goulbourne, D., Ridgway, K. Impact of number of flutes and helix angle on tool performance and hole quality in drilling composite/titanium stacks. **SAE Aerospace Technology Conference and Exposition**, 2011.

Wong, F. R., Sharif, S., Kamdani, K., Rahim, E. A. The effect of drill point geometry and drilling technique on tool life when drilling titanium alloy , Ti-6Al-4V. **Proceedings of International Conference on Mechanical & Manufacturing Engineering (ICMME 2008)**,

pp. 21-23, 2008.

Wu, H., Jia, Z., Zhang, X., Liu, G. Study on simulation and experiment of drilling for titanium alloys, **Materials Science Forum**, Vol. 704, pp. 657-663, 2012.

Xu, J., El Mansori, M. Experimental study on drilling mechanisms and strategies of hybrid CFRP/Ti stacks, **Composite Structures**, Vol. 157, pp. 461-482, 2016.

Xu, J., El Mansori, M. Wear characteristics of polycrystalline diamond tools in orthogonal cutting of CFRP/Ti stacks, **Wear**, Vol. 376, pp. 91-106, 2017.

Xu, J., Mkaddem, A. El Mansori, M. Recent advances in drilling hybrid FRP/Ti composite: A state-of-the-art review, **Composite Structures**, Vol. 135, pp. 316-338, 2016.

Yang, X., Liu, C. R. Machining Titanium and its alloys, **Machining Science and Technology**, Vol. 3, pp. 37-41, 1999.

Yeganefar, A., Niknam, S. A., Songmene, V. Machinability study of aircraft series aluminium alloys 7075-T6 and 7050-T7451, **Transactions of the Canadian Society for Mechanical Engineering**, Vol. 44, pp. 427-439, 2019.

Zaghibani, I., Songmene, V. A force-temperature model including a constitutive law for Dry High Speed Milling of aluminium alloys, **Journal of Materials Processing Technology**, Vol. 209, pp. 2532-2544, 2009.

Zeilmann, R. P., Weingaertner, W. L. Desgaste em brocas de metal-duro quando na furação da liga de titânio Ti-6Al-4V. **4º Congresso Brasileiro de Engenharia de Fabricação (COBEF)**, 2007.

Zhang, L., Liu, Z., Tian, W., Liao, W. Experimental studies on the performance of different structure tools in drilling CFRP/Al alloy stacks, **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, Vol. 81, pp. 241-251, 2015.

Zhang, P. F., Churi, N. J., Pei, Z. J., Treadwell, C. Mechanical drilling processes for titanium alloys: A literature review, **Machining Science and Technology**, Vol. 12, pp. 417-444, 2008.

Zhu, Z., He, B., Chen, J. Evaluation of tool temperature distribution in MQL drilling of aluminum 2024-T351, **Journal of Manufacturing Processes**, Vol. 56, pp. 757-765, 2020.

Zhu, Z., Sui, S., Sun, J., Li, J., Li, Y. Investigation on performance characteristics in drilling of Ti6Al4V alloy, **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, Vol. 93, pp. 651-660, 2017.

Zitoune, R., Collombet, F., Lachaud, F., Piquet, R., Pasquet, P. Experiment–calculation comparison of the cutting conditions representative of the long fiber composite drilling phase,

Composites Science and Technology, Vol. 65, pp. 455-466, 2005.

Zitoune, R., Krishnaraj, V. Le Roux, S. C. F. Study of drilling of composite material and aluminium stack, **Composite Structures**, Vol. 92, pp. 1246-1255, 2010.

Zitoune, R., Krishnaraj, V., Almabouacif, B. S., Collombet, F., Sima, M., Jolin, A. Influence of machining parameters and new nano-coated tool on drilling performance of CFRP/Aluminium sandwich, **Composites Part B: Engineering**, Vol. 43, pp. 1480-1488, 2012.

Zitoune, R., Krishnaraj, V., Collombet, F., Le Roux, S. Experimental and numerical analysis on drilling of carbon fibre reinforced plastic and aluminium stacks, **Composite Structures**. Vol. 146, pp. 148-158, 2016.

Zou, C. Liu, J. An off-line programming system for flexible drilling of aircraft wing structures, **Assembly Automation**, Vol. 31, pp. 161-168, 2011.

APÊNDICES

A.1 Especificações dos Tecidos Utilizados nos Compósitos

			
Ficha Técnica de Tecido			
Artigo	CVU-210-HM-RE-01	Data da Emissão	26/06/2014
Grupo de Produto	PRFV	Data da Revisão	02/02/2016

Matérias Primas Requeridas	
Material de Urdume	Roving de Fibra de Carbono
Material de Trama	Fio Hot Melt
Acabamento do Fio	C
Código TEXIGLASS da Resina	RE-01

Informações de Tecelagem				
Tipo de Tecelagem	Tela Hot Melt			
Parâmetros	Unidade	Mínimo	Nominal	Máximo
Peso*	g/m ²	187	208	229
Número de Fios de Urdume	Fios/cm	9,5	10,0	10,5
Número de Fios de Trama	Fios/cm	0,9	1,0	1,1
Largura	cm	126	130	134
Comprimento do rolo	m	45	50	55
Tamanho total do rolo	m ²	57	65	74
Espessura*	mm	0,25	0,29	0,33
Carga de Ruptura do Urdume Teórica*	Kgf/cm	414	518	570
Carga de Ruptura da Trama Teórica*	Kgf/cm	1,9	2,4	2,6
Porcentagem de Resina em Peso				
Dados para a Cura				
Pressão Sugerida	Kgf/cm ²	1,5	2,0	N. D.
Ciclo de cura (em duas fases)	Tempo	Temperatura		
Fase 01	2 h	120°C		
Fase 02	2 h	150°C		
TG após a cura	130°C			

Informações Adicionais				
Unidirecionalidade	U × T	%	96,2	× 3,8
Composição do tecido	96% Fibra de Carbono + 4% Fibra de Vidro Hot Melt.			
Validade	60 dias desde que a temperatura inferior a 4°C.			
OBSERVAÇÕES:	(*) Dados sem resina.			

Data	02/02/2016
Nome e assinatura do revisor	Giorgio Solinas



Ficha Técnica de Tecido

Artigo	WRU-360-RT - 1,20	Data da Emissão	26-03-2007
Grupo de Produto	PRFV	Data da Revisão	26-03-2007

Matérias Primas Requeridas

Material de Urdume	Fibra de Vidro
Material de Trama	Fibra de Vidro
Acabamento do Fio	B
Código TEXIGLASS da Resina	NA

Informações de Tecelagem

Tipo de Tecelagem	Raso Turco			
Parâmetros	Unidade	Mínimo	Nominal	Máximo
Peso	g/m ²	329	366	403
Número de Fios de Urdume	Fios/cm	3,8	4,0	4,2
Número de Fios de Trama	Fios/cm	3,6	4,0	4,4
Largura	cm	116	120	124
Comprimento do rolo	m	90	100	110
Tamanho total do rolo	m ²	105	120	136
Espessura	mm	0,30	0,35	0,40
Carga de Ruptura Teórica do Urdume	Kgf/cm	130	163	179
Carga de Ruptura Teórica da Trama	Kgf/cm	16	20	22
Porcentagem de Resina em Peso	%	0	0	0

Informações Adicionais

Unidirecionalidade	U × T	%	89,1	×	10,9
Composição do tecido	100% Fibra de Vidro				
Validade	Indeterminada				
OBSERVAÇÕES:					

Data	26/03/2007
Nome e assinatura do revisor	Josué S Meninel

Texiglass Ind. e Com. Têxtil Ltda Rua Angelo Bevilacqua, 1064 - Distrito Industrial - 13.280-000 - Vinhedo SP - Brasil
 Fone: + 55.19. 3856-4278 Fax: + 55.19. 3856-4279 texiglass@texiglass.com.br www.texiglass.com.br

A.2 Certificado de Calibração da MMC usada na Medição da Circularidade dos Furos



LABORATÓRIO DE METROLOGIA

REDE BRASILEIRA DE CALIBRAÇÃO

CERTIFICADO DE CALIBRAÇÃO No. 00590/21



Cliente: MICROMAZZA INDÚSTRIA DE VÁLVULAS LTDA
Endereço: Rodovia BR 470, Km 168,1040 - Sede, Vila Flores - RS - CEP - 95334-000

Ordem de Serviço : 053.188/001

I. Objeto Calibrado :

Máquina de Medição por Coordenadas
Fabricante : Mitutoyo
MMC Modelo : CRT-PM7106
No de Série : BH000073 / Código : 196-487
Identif. do Cliente: MT-001
Faixa Nominal : 700 x 1000 x 600 mm
Contador Digital / Controlador
Modelo : UD1
No Série : 13541466
Resolução : 0,0005 mm
Cabeçote
Modelo : PH1
No Série : 0N2512
Probe
Modelo : TP20
No Série : 275F54
Rack
Modelo : -
No Série : -
Programa de Medição
Programa : GEOPAKWIN
Versão : V2.4 R14
Dongle No. : 8-5542616



II. Notas:

1. A incerteza expandida de medição relatada é declarada como a incerteza padrão da medição multiplicada pelo fator de abrangência k , o qual para uma distribuição t com V_{eff} graus de liberdade efetivos corresponde a uma probabilidade de abrangência de aproximadamente 95%.
2. A incerteza padrão da medição foi determinada de acordo com a publicação EA-4/02.
3. Erro = Diferença entre o valor medido de uma grandeza e um valor de referência.
4. Os sinais dos resultados tem o mesmo sentido das indicações positivas e negativas do sistema de coordenadas da máquina.
5. A máquina foi calibrada conforme Procedimento PML-0030 revisão 5.
6. Condição ambiental: Temperatura ambiente: $(20,4 \pm 0,5) ^\circ\text{C}$
7. Endereço e local da calibração são os mesmos.

III. Padrões utilizados :

Padrão Escalonado	Termômetro	Esfera Padrão
No Série : 13022	No Série : HKSBA015	No Série : P-348
Certificado No : 05996/20	Certificado No : T-1084/2019	Certificado No : 1629/20
Emitido em : 17/12/2020	Emitido em : 26/07/2019	Emitido em : 25/06/2020
Validade : 06/2021	Validade : 07/2021	Validade : 06/2022

Data da Calibração : 29 de janeiro de 2021
Data da Emissão : 03 de fevereiro de 2021

Pag: 1 / 4

Eduardo Ferreira Miranda
Assinatura Autorizada

Este certificado atende aos requisitos de acreditação da Cgcre que avaliou a competência do laboratório e comprovou sua rastreabilidade a padrões nacionais de medida (ou ao Sistema Internacional de Unidade - SI).
A reprodução deste certificado só poderá ser total e depende da aprovação por escrito da Mitutoyo.
Os resultados deste Certificado referem-se exclusivamente ao instrumento submetido à calibração nas condições especificadas, não sendo extensivos a quaisquer lotes.

Sede: Rod. Índio Tibiriçá, 1555 - Bairro Raífo - CEP: 08620-000 - Suzano - SP - Tel.: (11) 4746-5858 - E-mail: suzano@mitutoyo.com.br

Laboratório: Tel.: (11) 4746-5950 - E-mail: metrologia@mitutoyo.com.br

Assistência Técnica Interna: Tel.: (11) 4746-5957 - E-mail: assistec@mitutoyo.com.br

Assistência Técnica Externa: Tel.: (11) 5643-0026 - E-mail: ate@mitutoyo.com.br



CERTIFICADO DE CALIBRAÇÃO No. 00590/21

REDE BRASILEIRA DE CALIBRAÇÃO

Laboratório de Calibração Acreditado pela Cgcre de acordo com a ABNT NBR ISO/IEC 17025, sob o numero CAL 0031

IV. Resultado das Medições :

4.1. Verificações iniciais do equipamento :

- a . Movimento da Máquina : OK
- b . Condições da área de Medição : OK
- c . Avaliação do Sist. Pneumático : OK
- d . Limpeza das superfície de ref. : OK

**ANÁLISE DE RESULTADOS
CONTROLE DE CALIBRAÇÃO**

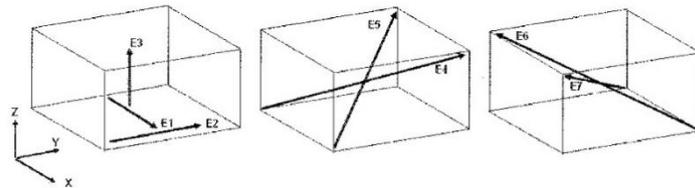
APROVADO REPROVADO

VISTO: *[Assinatura]*

DATA: 30/02/21

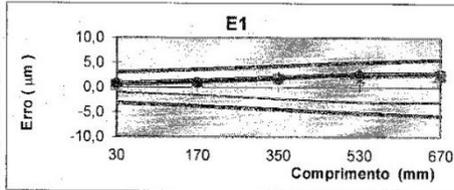
SISTEMA DE GESTÃO DA QUALIDADE
MICROMAZZA/WENMAZZA

4.2. Resultado da Medição:



4.2.1. Resultado da medição do eixo " X ", (E1)

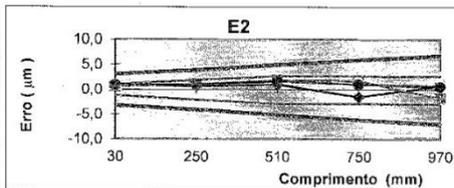
Comprimento (L) (mm)	Erro (µm)			
	1ª. Serie	2ª. Serie	3ª. Serie	Media
30	1,0	0,4	0,6	0,7
170	1,1	0,8	0,8	0,9
350	2,0	1,8	1,0	1,6
530	2,8	2,1	2,5	2,5
670	2,5	2,4	3,0	2,6



Incerteza de medição expandida (U) = (0,7 + L/500) µm , onde: L = comprimento em " mm ".
 Fator de abrangência (k) = 2,00
 Graus de liberdade (Veff) = infinito

4.2.2. Resultado da medição do eixo" Y ", (E2)

Comprimento (L) (mm)	Erro (µm)			
	1ª. Serie	2ª. Serie	3ª. Serie	Media
30	1,1	0,7	1,0	0,9
250	0,7	1,2	1,2	1,0
510	1,1	2,0	2,3	1,8
750	-1,4	1,9	2,8	1,1
970	0,8	-1,6	2,7	0,6



Incerteza de medição expandida (U) = (2,0 + L/3000) µm , onde: L = comprimento em " mm ".
 Fator de abrangência (k) = 2,07
 Graus de liberdade (Veff) = 39

[Assinatura]



Mitutoyo Sul Americana Ltda.

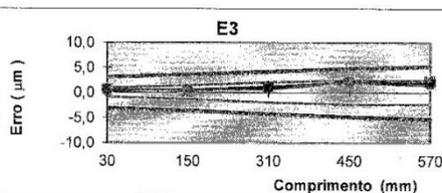
CERTIFICADO DE CALIBRAÇÃO No. 00590/21

REDE BRASILEIRA DE CALIBRAÇÃO

Laboratório de Calibração Acreditado pela Cgcre de acordo com a ABNT NBR ISO/IEC 17025, sob o número CAL 0031

4.2.3. Resultado da medição do eixo " Z ", (E3)

Comprimento (L) (mm)	Erro (μm)			
	1ª. Serie	2ª. Serie	3ª. Serie	Media
30	0,1	0,7	0,9	0,6
150	0,6	0,1	0,9	0,5
310	0,7	1,1	1,4	1,1
450	2,0	1,9	2,4	2,1
570	1,5	2,3	1,6	1,8



Incerteza de medição expandida (U) = (0,8 + L/900) μm

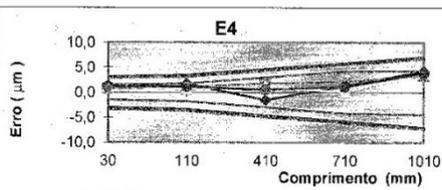
Fator de abrangência (k) = 2,01

Graus de liberdade (V_{eff}) = 442

, onde: L = comprimento em " mm ".

4.2.4. Resultado da medição do volume, (E4)

Comprimento (L) (mm)	Erro (μm)			
	1ª. Serie	2ª. Serie	3ª. Serie	Media
30	1,3	0,8	1,2	1,1
110	1,8	1,0	0,7	1,2
410	-1,5	1,8	1,3	0,5
710	1,3	2,1	0,1	1,2
1010	4,4	3,4	3,9	3,9



Incerteza expandida de medição (U) = (1,4 + L/1500) μm

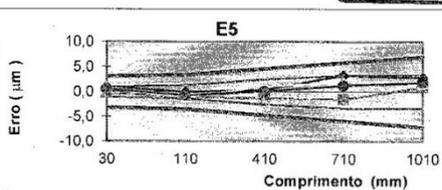
Fator de abrangência (k) = 2,03

Graus de liberdade (V_{eff}) = 78

, onde: L = comprimento em " mm ".

4.2.5. Resultado da medição do volume, (E5)

Comprimento (L) (mm)	Erro (μm)			
	1ª. Serie	2ª. Serie	3ª. Serie	Media
30	1,0	-0,2	0,9	0,6
110	0,0	-1,0	-1,2	-0,7
410	0,4	-1,3	1,2	0,1
710	3,3	-1,5	1,9	1,2
1010	2,9	1,0	1,8	1,9



Incerteza de medição expandida (U) = (2,2 + L/3000) μm

Fator de abrangência (k) = 2,13

Graus de liberdade (V_{eff}) = 20

, onde: L = comprimento em " mm ".

Pag.: 3 / 4

**ANÁLISE DE RESULTADO
CONTROLE DE CALIBRAÇÃO**

APROVADO REPROVADO

VISTO: *[Assinatura]*

DATA: 30/10/21

SISTEMA DE GESTÃO DA QUALIDADE
MICROMAZZA/WENMAZZA

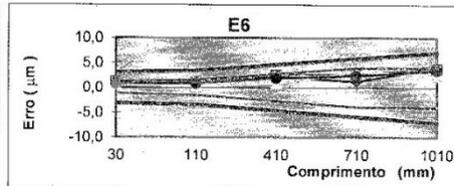
[Assinatura]


CERTIFICADO DE CALIBRAÇÃO No. 00590/21
REDE BRASILEIRA DE CALIBRAÇÃO

Laboratório de Calibração Acreditado pela Cgcre de acordo com a ABNT NBR ISO/IEC 17025, sob o numero CAL 0031

4.2.6. Resultado da medição do volume, (E6)

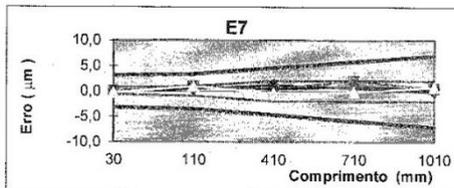
Comprimento (L) (mm)	Erro (μm)			
	1ª. Serie	2ª. Serie	3ª. Serie	Media
30	0,6	1,2	0,7	0,8
110	1,0	1,1	0,3	0,8
410	2,3	2,6	0,8	1,9
710	1,2	2,7	3,2	2,4
1010	4,0	3,8	2,4	3,4



Incerteza de medição expandida (U) = (1,2 +L/1600) μm , onde: L = comprimento em " mm ".
 Fator de abrangência (k) = 2,03
 Graus de liberdade (Veff) = 88

4.2.7. Resultado da medição do volume, (E7)

Comprimento (L) (mm)	Erro (μm)			
	1ª. Serie	2ª. Serie	3ª. Serie	Media
30	-0,1	0,0	-0,3	-0,1
110	0,4	1,0	0,9	0,8
410	1,2	0,4	-0,4	0,4
710	0,6	2,0	-0,2	0,8
1010	-0,1	0,5	0,7	0,4



Incerteza de medição expandida (U) = (1,0 +L/1200) μm , onde: L = comprimento em " mm ".
 Fator de abrangência (k) = 2,01
 Graus de liberdade (Veff) = 239

4.2.8. Erro de Apalpação (P)

Erro de Apalpação (P)	Erro (μm)			
	1ª. Serie	2ª. Serie	3ª. Serie	Media
P	3,3	2,7	3,5	3,2

Erro de apalpação = (3,2 \pm 1,2) μm
 Fator de abrangência (k) = 2,00
 Graus de liberdade (Veff) = infinito

5. Observações Gerais :

ANÁLISE DE RESULTADOS CONTROLE DE CALIBRAÇÃO	
<input checked="" type="checkbox"/> APROVADO	<input type="checkbox"/> REPROVADO
VISTO: <i>[Assinatura]</i>	
DATA: 30/02/21	
SISTEMA DE GESTÃO DA QUALIDADE MICROMAZZA/WENMAZZA	