



*UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
CAMPUS DE GUARATINGUETÁ*

SARAH DAVID MÜZEL

**INFLUÊNCIA DA ADIÇÃO DE NANOTUBOS DE CARBONO NO COMPÓSITO DE
RESINA FURFURÍLICA/FIBRA DE CARBONO NO PROCESSO DE FURAÇÃO**

Guaratinguetá, SP

2021

SARAH DAVID MÜZEL

**INFLUÊNCIA DA ADIÇÃO DE NANOTUBOS DE CARBONO NO COMPÓSITO DE
RESINA FURFURÍLICA/FIBRA DE CARBONO NO PROCESSO DE FURAÇÃO**

Tese apresentada à Faculdade de Engenharia do
Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual
Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, para a obtenção
do título de Doutora em Engenharia Mecânica na área
de Materiais

Orientador:

Prof. Dr. Manoel Cléber de Sampaio Alves

Co-orientador:

Prof. Dr. Edson Cocchieri Botelho

Guaratinguetá, SP

2021

David Müzel, Sarah
D249i Influência da adição de nanotubos de carbono no compósito de resina furfurílica / fibra de carbono no processo de furação / Sarah David Müzel – Guaratinguetá, 2021
215 f. : il.
Bibliografia: f. 159-190

Tese (doutorado) – Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, 2021.
Orientador: Prof. Dr. Manoel Cléber de Sampaio Alves
Coorientador: Prof. Dr. Edson Cocchieri Botelho

1. Compósitos poliméricos. 2. Nanotubos. 3. Materiais compostos.
I. Título

CDU 620.1(043)

Luciana Máximo

Bibliotecária-CRB-8/3595

SARAH DAVID MUZEL

ESTA TESE FOI JULGADA ADEQUADA PARA OBTENÇÃO DO TÍTULO DE
“DOUTORA EM NOME DO PROGRAMA”

PROGRAMA: ENGENHARIA MECÂNICA
ÁREA: MATERIAIS AVANÇADOS

APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO



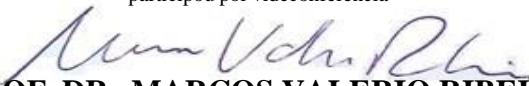
Prof. Dr. Manoel Cléber de Sampaio Alves
Coordenador

BANCA EXAMINADORA:



PROF. DR. MANOEL CLÉBER DE SAMPAIO ALVES

Orientador / UNESP/FEG
participou por videoconferência



PROF. DR. MARCOS VALERIO RIBEIRO

UNESP/FEG
participou por videoconferência



PROFa. DRa. MIRABEL CERQUEIRA REZENDE

UNIFESP
participou por videoconferência



PROF. DR. NIVALDO LEMOS COPPINI

UNICAMP
participou por videoconferência



PROF. DR. ALESSANDRO ROGER RODRIGUES

USP
participou por videoconferência

Setembro de 2021

DADOS CURRICULARES
SARAH DAVID MÜZEL

NASCIMENTO	08.09.1988 - ITAPEVA/SP
FILIAÇÃO	Jane Moura Santos Bento Luís Carlos Bento
2005/2006	Curso Técnico Informática - ETEC Centro Paula Souza” Demétrio de Azevedo Junior”
2010/2014	Curso de Graduação Engenharia Industrial Madeireira, na Faculdade de Engenharia do Campus de Itapeva da Universidade Estadual Paulista.
2015/2017	Curso de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, nível de Mestrado, na Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá da Universidade Estadual Paulista.
2017/2021	Curso de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, nível de Doutorado, na Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá da Universidade Estadual Paulista.

À Jacyra (In Memoriam) e Euclides (In Memoriam)

AGRADECIMENTOS

Agradeço à minha mãe por todo o apoio, paciência e compreensão.

Agradeço aos professores: Marcos Valério Ribeiro, Erick Siqueira Guidi, Luiz Rogério de Oliveira Hein e Michelle Leali Costa; aos técnicos José Manoel Bernardes e Domingos Hasmann Neto, sem vocês esse trabalho não sairia do papel.

Aos meus orientadores Prof. Dr. Manoel Cléber de Sampaio Alves e Prof. Dr. Edson Cocchieri Botelho pela oportunidade de realizar este trabalho.

Aos meus amigos Larissa Ribas, Mauricio Oliveira Filho, Anderson Nakazato, Maísa Milanez e Luis Felipe Marques, por me ajudarem e me apoiarem na realização deste trabalho, por dividir as aflições e as vitórias durante todo o doutorado.

À Gilson Barbosa, Juliano Soares, Silvia Oishi, Tanila Faria, Valdo Junior e Fabricio Brizon, muito obrigada por compartilharem comigo conhecimentos que foram indispensáveis para a realização deste trabalho.

À Júlia Sartori por realizar comigo a pesquisa de aprimoramento do compósito tema desse trabalho, para complementar este estudo.

Ao Eduardo Bonhin., amigo e companheiro, por me auxiliar nos ensaios, pelas longas horas de discussão e intensivas buscas bibliográficas sobre os temas abordados, pelo companheirismo e suporte para a realização desta tese.

À empresa Seco Tools Brasil e OSG pela doação das ferramentas utilizadas neste estudo.

Ao Laboratório de Estruturas Leves do IPT/São José dos Campos pela realização do ultrassom dos laminados.

À CAPES (Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior) pela concessão da bolsa de doutorado, a qual me proporcionou meios para execução deste trabalho

Agradeço a todos aqueles que direta ou indiretamente contribuíram para esta tese.

Obrigada!

FINANCIAMENTOS

O presente trabalho foi realizado com apoio da:

- Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior- Brasil (CAPES) - código de financiamento 001;
- Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP)- projeto nº 2017/16970-0;
- Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq)- projeto nº303224/2016-9.

“Aprender é a única coisa de que a mente nunca se cansa, nunca tem medo e nunca se arrepende”

Leonardo da Vinci

“São as perguntas que não sabemos responder que mais nos ensinam. Elas nos ensinam a pensar. Se você dá uma resposta a um homem, tudo o que ele ganha é um fato qualquer. Mas, se você lhe der uma pergunta, ele procurará suas próprias respostas. Assim, quando ele encontrar as respostas, elas lhe serão preciosas. Quanto mais difícil a pergunta, com mais empenho procuramos a resposta. Quanto mais a procuramos, mais aprendemos”.

Patrick Rothfuss

“A mente que se abre a uma nova ideia jamais retornará ao seu tamanho original”.

Albert Einstein

RESUMO

Os compósitos poliméricos multifuncionais nanoestruturados têm sido assunto de grande interesse da indústria aeroespacial nos últimos anos, pois com esses materiais é possível a redução significativa do peso estrutural, além de elevar a resistência e a rigidez de um componente aeroembarcado, promovendo ainda ganhos nos comportamentos térmico e elétrico. Aliado a isso, há a busca por bioresinas, as quais são provenientes de fontes renováveis. Nesse quesito, uma alternativa para a resina fenólica, a qual é oriunda do petróleo, é a resina furfurílica, derivada de resíduos agrícolas. Porém, o setor aeroespacial possui grandes desafios tecnológicos, devido às suas especificidades. Com isso, há a necessidade de realizar não somente um levantamento sistemático das propriedades desses novos materiais, mas também é necessário entender como se comportam quando submetidos aos mais diversos tipos de processos de manufatura. O objetivo deste trabalho é estudar a ação da usinagem em compósitos produzidos com resina furfurílica, sem e com a adição de nanotubos de carbono, por meio do processo de furação. Para isso, foram utilizados compósitos produzidos com resina furfurílica reforçados com fibra de carbono, sendo que no caso dos laminados nanoestruturados foi utilizado 0,5% de nanotubo de carbono, em relação a massa da matriz. As variáveis de entrada estudadas foram a rotação do fuso (4000, 6000 e 8000 rpm), avanço (0,0125; 0,025; 0,05; 0,1 e 0,2 mm/rot), tipo de broca (TiAlN e diamantada) e o tipo de suporte utilizado (1 e 2). As variáveis de saída analisadas foram o consumo de potência, a vibração do sistema, a emissão sonora, força de avanço, torque, pressão específica de corte, erro de dimensão, circularidade, fator delaminação e desgaste das ferramentas. De forma geral, constatou-se que a adição de CNT influenciou significativamente em algumas das variáveis resposta, sendo elas o consumo de potência, pressão específica de corte, fator delaminação e nos erros geométricos (dimensão e circularidade). Onde os resultados obtidos para esse laminado foram menores, em comparação com o laminado sem CNT. Analisando os parâmetros de usinagem utilizados, verificou-se que o mais influente foi o avanço, sendo que menores avanço propiciaram uma melhor qualidade dos furos.

PALAVRAS-CHAVE: Compósitos multifuncionais. Nanotubos de Carbono. Bioresina. Delaminação. Qualidade do furo. Usinagem.

ABSTRACT

Nanostructured multifunctional polymer composites have been a subject of great interest to the aerospace industry because with its use it is possible to significantly reduce the structural weight, as well as high strength and rigidity and better thermal and electrical behaviour. Allied to this, there has been a search for bioresines, which come from renewable sources. In this regard, an alternative to phenolic resin, is furfuryl resin which comes from agricultural residues. However, the aerospace sector has great technological challenges due to their specificities. So, there is necessary not only to understand the properties of these new materials but also to know how it behave when submitted to various types of manufacturing processes. The objective of this work is to study the action of machining in composites produced with furfuryl resin, without and with the addition of carbon nanotubes, through the drilling process. For this, it was used composites produced with furfuryl resin and carbon fiber reinforcement. In the case of nanostructured laminates, 0.5% of carbon nanotube was used, base in matrix weight. The input variables studied were spindle speed (4000, 6000 and 8000 rpm), feed (0.0125, 0.025, 0.05, 0.1, and 0.2 mm/rev), drill type (TiAlN and diamond) and the type of support used (1 and 2). The output variables analyzed were power consumption, system vibration, sound emission, thrust force, torque, specific cutting pressure, dimension error, circularity, delamination factor, and tool wear. In general, it was found that the addition of CNT significantly influenced some of the response variables, being power consumption, specific cutting pressure, delamination factor, and geometric errors (dimension and circularity). Where the results obtained for this laminate were lower, compared to the laminate without CNT. Analyzing the machining parameters used, it was found that the most influential was the feed, with lower feed providing a better quality of holes.

KEYWORDS: *Multifunctional composites. Carbon nanotubes. Bioresines. Delamination. Hole quality. Machining.*

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	13
2	OBJETIVOS	16
2.1	GERAL.....	16
2.2	ESPECÍFICOS.....	16
3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	17
3.1	COMPÓSITOS.....	17
3.2	RESINA TERMORRÍGIDA.....	22
3.2.1	Resina Fenólica	22
3.2.1.1	Resina Furfurílica.....	23
3.3	COMPÓSITOS NANOESTRUTURADOS MULTIFUNCIONAIS.....	24
3.3.1	Nanotubos de carbono	25
3.4	FURAÇÃO DE COMPÓSITOS.....	29
3.5	DELAMINAÇÃO.....	32
3.5.1	Cálculo da delaminação	33
3.5.2	Mecanismos de delaminação induzidos pela furação	35
3.5.2.1	Geometria e material da ferramenta de corte.....	38
3.5.2.2	Desgaste da ferramenta de corte.....	42
3.5.2.3	Força de avanço.....	47
3.5.2.4	Uso de suporte.....	54
3.5.3	Danos internos	56
3.6	ERROS GEOMÉTRICOS.....	58
3.6.1	Erro de dimensão	60
3.6.2	Erro de Circularidade	62
3.7	MONITORAMENTO DO PROCESSO DE USINAGEM.....	63
4	MATERIAL E MÉTODOS	65
4.1	PRODUÇÃO DOS COMPÓSITOS.....	65
4.1.1	Síntese da resina furfurílica	65
4.1.2	Caracterização da resina furfurílica	67
4.1.2.1	Viscosidade.....	67
4.1.2.2	pH.....	68
4.1.2.3	Teor de Umidade.....	68
4.1.2.4	Espectroscopia no Infravermelho com Transformada de Fourier.....	68
4.1.2.5	Análise Termogravimétrica.....	68

4.1.2.6	Análise por Calorimetria Exploratória Diferencial.....	69
4.1.2.7	Análise dinâmico-mecânica.....	69
4.1.3	Processamento dos compósitos.....	70
4.1.3.1	Primeira Etapa.....	72
4.1.3.2	Segunda Etapa.....	73
4.1.4	Caracterização dos compósitos produzidos.....	74
4.1.4.1	Ultrassom.....	74
4.1.4.2	Porosidade.....	75
4.1.4.3	Resistência ao cisalhamento interlaminar.....	75
4.2	ESTUDO DA FURAÇÃO.....	76
4.2.1	Processo de furação.....	76
4.2.2	Sistema de aquisição de dados.....	78
4.2.2.1	Potência consumida.....	79
4.2.2.2	Força de avanço.....	80
4.2.2.3	Vibração.....	80
4.2.2.4	Emissão sonora.....	81
4.2.3	Torque.....	81
4.2.4	Pressão específica de corte.....	81
4.2.5	Força de corte.....	81
4.2.6	Desgaste e avaria das ferramentas de corte.....	82
4.2.7	Qualidade dos furos.....	82
4.2.8	Análise estatística.....	83
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	84
5.1	PROPRIEDADES DA RESINA.....	84
5.1.1	Teor de umidade, Viscosidade e pH.....	84
5.1.2	Espectroscopia no Infravermelho com Transformada de Fourier.....	85
5.1.3	Análise Termogravimétrica.....	87
5.1.4	Análise por Calorimetria Exploratória Diferencial.....	89
5.1.5	Análise dinâmico-mecânica.....	90
5.2	CARACTERIZAÇÃO DOS COMPÓSITOS.....	91
5.2.1	Ultrassom.....	91
5.2.2	Porosidade.....	93
5.2.3	Resistência ao cisalhamento interlaminar.....	94
5.2.4	Considerações Gerais Referentes ao Processamento dos Compósitos.....	96

5.3	ESTUDO DA FURAÇÃO.....	98
5.3.1	Potência consumida.....	99
5.3.2	Torque.....	106
5.3.3	Pressão específica de corte.....	108
5.3.4	Força de corte.....	112
5.3.5	Força de avanço.....	115
5.3.6	Vibração.....	119
5.3.7	Emissão sonora.....	123
5.3.8	Desgaste e avaria das ferramentas de corte.....	127
5.3.9	Aspecto dos furos.....	129
5.3.10	Fator delaminação.....	141
5.3.11	Erro de dimensão.....	144
5.3.12	Erro de Circularidade.....	149
5.3.13	Considerações gerais referentes ao estudo da furação.....	152
6	CONCLUSÃO.....	157
7	TRABALHOS FUTUROS.....	158
	REFERÊNCIAS.....	159
	APÊNDICE A- Análise Estatística para o processo de furação.....	191
	CONSUMO DE POTÊNCIA.....	191
	TORQUE.....	193
	PRESSÃO ESPECÍFICA DE CORTE.....	195
	FORÇA DE CORTE.....	197
	FORÇA DE AVANÇO.....	199
	VIBRAÇÃO DO SISTEMA.....	201
	EMIÇÃO SONORA.....	203
	FATOR DELAMINAÇÃO.....	205
	ERRO DE DIMENSÃO.....	209
	CIRCULARIDADE.....	213

1 INTRODUÇÃO

O crescimento populacional, a diversificação do consumo de bens e serviços e a intensa industrialização, devido às novas tecnologias, vêm acarretando em uma busca incessante por materiais que possuam propriedades excepcionais, tais como melhor equilíbrio entre a rigidez, a resistência mecânica e a resistência ao impacto; menor consumo de energia; maior resistência à corrosão em meios agressivos; boas condutividades térmica e elétrica e propriedades magnéticas e ópticas, ou seja, não só funções de suporte mecânico, mas também funções integradas (BOTELHO, 2011; CARBALLEIRA, 2010; HORNYAK et al., 2009).

Essa busca culminou nos compósitos nanoestruturados multifuncionais, os quais têm sido tema de diversas pesquisas na última década, visto que esses materiais apresentam melhorias significativas nas propriedades mecânicas, químicas, elétricas e térmicas. São inúmeros os materiais obtidos nessa área e suas aplicações abrangem diferentes setores da indústria (DÍEZ-PASCUAL et al., 2012; MONIRUZZAMAN; WINEY, 2006; RAHMAN et al., 2011; SAHOO et al., 2010).

Dentre as nanopartículas existentes, os nanotubos de carbono se destacam, em função das suas excelentes propriedades mecânicas, elétricas e térmicas. Esses podem ser utilizados em diversas áreas como energia, militar, óptica, têxtil, biomédica, entre outras (DÍEZ-PASCUAL et al., 2012; MONIRUZZAMAN; WINEY, 2006; RAHMAN et al., 2011; SAHOO et al., 2010)(BOTELHO, 2011; KUMAR; ALEXIS, 2018; RAPHEY et al., 2019).

Na categoria dos compósitos nanoestruturados multifuncionais, se destacam os produzidos com matriz polimérica (termoplástica ou termorrígida) e reforço de fibras contínuas (carbono, vidro ou aramida). Na indústria aeroespacial, a maioria das aplicações de compósitos poliméricos tem sido baseada em resinas termorrígidas, sendo na maioria dos casos oriundas do petróleo, com isso, há muitas pesquisas sendo realizadas visando a obtenção de resinas provenientes de fontes renováveis e que apresentem a mesma eficiência e eficácia (DEKA; MISRA; MOHANTY, 2013; GANDINI; BELGACEM, 1997; LAGEL et al., 2016; RAY, 2017; ÜNVER; ÖKTEM, 2013).

Dentro dessa busca, tem-se a resina furfurílica, que provém do furfural obtido partir de biomassa rica em pentosana, como o bagaço de cana-de-açúcar, palha de arroz, sabugo de milho, entre outros. A resina furfurílica é uma alternativa ecologicamente correta à resina fenólica (COMPOSITE EVOLUTION, 2019; DEKA; MOHANTY; MISRA, 2014;

DOMÍNGUEZ; GRIVEL; MADSEN, 2012; DOMÍNGUEZ; MADSEN, 2014; ÜNVER; ÖKTEM, 2013).

Comparada com a resina fenólica, a resina furfurílica possui dureza superior, bons valores de resistências mecânica e química e temperatura de cura mais baixa. Além de possuir excelente resistência a chamas, alta temperatura de distorção de calor e baixa emissão de fumaça (DEKA; MOHANTY; MISRA, 2014; MA et al., 1995; REZENDE; COSTA; BOTELHO, 2011).

A resina furfurílica pode ser usada para diversas aplicações, como precursora polimérica para a obtenção de carbono vítreo, de nanocompósitos e de carbono nanoporoso; adesivos para madeira e matriz polimérica para materiais compósitos (DOMÍNGUEZ; MADSEN, 2014; TRANSFURANS CHEMICALS BVBA, 2018a; WU et al., 2016).

No âmbito acadêmico, existem algumas pesquisas sobre o uso da resina furfurílica na produção de compósitos poliméricos nanoestruturados, visando aplicação no setor aeroespacial (CONEJO, 2019; MEN et al., 2008). Porém, esse setor possui grandes desafios tecnológicos, devido as suas especificidades, com isso há a necessidade de realizar não somente um levantamento das propriedades desses novos materiais, mas também é necessário entender como se comportam quando submetidos aos mais diversos tipos de processos de manufatura (MOURA; MORAIS; MAGALHÃES, 2005).

Uma das etapas de elaboração de um produto é a união de seus componentes, no caso dos compósitos os principais tipos de juntas são as adesivas e as mecânicas (aparafusadas ou rebitadas), contudo as juntas mecânicas são as mais utilizadas, pois elas propiciam uniões fortes para suportar as cargas estáticas e dinâmica das estruturas. Tanto uma boa transferência de carga nas juntas, quanto a sua vida útil, irão depender da qualidade e precisão dos furos realizados (DAVID MÜZEL et al., 2020; LI et al., 2017; MOURA; MORAIS; MAGALHÃES, 2005).

Nos compósitos, os furos são realizados após o processo de produção dos laminados. Atualmente, existem basicamente dois processos que podem ser utilizados na obtenção dos furos, sendo a usinagem convencional e o jato água, entretanto a usinagem convencional é o processo mais utilizado.

As propriedades da matriz e do reforço, bem como suas frações volumétricas influenciam na qualidade final do processo de furação convencional, uma vez que, a ferramenta de corte irá encontrar alternadamente a matriz e o reforço durante o processo de usinagem, cuja a resposta pode ser totalmente diferente entre eles (TETI, 2002). Assim, a usinagem de materiais compósitos impõe exigências especiais sobre diversos parâmetros de usinagem.

A furação em compósitos pode causar diversos defeitos nas peças, deslocamento fibra/matriz e danos de origem térmica e principalmente a delaminação. Esses defeitos reduzem significativamente o desempenho do material, bem como propiciam a propagação das trincas, quando o componente é submetido a ação de cargas, e com isso, levar o componente a falha (ABRATE; WALTON, 1992; RAJ; KARUNAMOORTHY, 2016; TETI, 2002; TSAO, 2012).

A delaminação não é tolerada em componentes que são classificados como estruturais primários, enquanto que nos componentes secundários, ou seja, os que podem sofrer algum reparo, uma pequena delaminação pode ser tolerada (SHEIKH-AHMAD, 2009). Por isso é tão importante controlar a qualidade dos furos.

A qualidade do furo usinado é o fator decisivo na avaliação da usinabilidade dos compósitos. O termo “qualidade” refere-se tanto às características geométricas dos furos, quanto à extensão do dano causado pelo processo de usinagem. Entretanto, a medição de ambos não é fácil.

A delaminação é causada pela baixa resistência interlaminar do laminado e altas forças axiais resultantes do corte. Isso pode ser remediado utilizando geometrias adequadas, bem como velocidades de corte e de avanço corretos. Além disso, deve-se escolher as ferramentas produzidas com materiais resistentes a abrasão. As ferramentas para usinagem de compósitos devem ser capazes de suportar abrasividade de fibras e dos cavacos e serem capazes de cortar todas as fibras sem gerar grandes delaminações.

Devido a todos esses fatores, torna-se muito importante o estudo do processo de furação nos novos compósitos que estão sendo desenvolvidos.

2 OBJETIVOS

2.1 GERAL

Em função da constante atualização tecnológica exigida no setor aeroespacial e a grande dificuldade de usinagem dos compósitos, o presente trabalho tem por objetivo estudar a usinagem dos compósitos estruturais produzidos com resina furfurílica reforçados com fibras de carbono, sem e com a adição de nanotubos de carbono, por meio do processo de furação, visando a melhoria do processo, bem como determinar a influência da adição dos nanotubos no processo de furação e na qualidade dos furos usinados.

2.2 ESPECÍFICOS

- Conhecer o comportamento da potência de corte, vibração do sistema, força de avanço, torque, pressão específica de corte e emissão sonora durante do processo de usinagem, buscando relacionar as variáveis de entrada e de saída com o desgaste da ferramenta e qualidade do furo;
- Conhecer os principais desgastes e avarias que ocorrem nas ferramentas durante a usinagem dos compósitos produzidos com resina furfurílica e fibra de carbono, contendo ou não nanotubos de carbono, juntamente com seus mecanismos de formação;
- Determinar como a qualidade do furo é influenciada pelas variáveis de entrada e de saída estudadas, bem como verificar a influência da adição de nanotubos nos laminados.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 COMPÓSITOS

O avanço da tecnologia têm levado à crescente demanda por materiais com propriedades incomuns, as quais não podem ser atendidas pelos materiais convencionais como as ligas metálicas, cerâmicas e blendas poliméricas (CALLISTER JUNIOR; RETHWISCH, 2013; REZENDE; COSTA; BOTELHO, 2011).

Como forma de suprir essa necessidade surgiram os compósitos, os quais são constituídos pela combinação de dois ou mais materiais distintos e imiscíveis, que possuem propriedades mecânicas complementares e propriedades físicas e/ou químicas distintas (CHUNG, 2010; DURAND, 2008; KAW, 2006).

Os compósitos são considerados como materiais de engenharia heterogêneos e multifásicos, nos quais a fase que confere estrutura ao material, e é responsável pela transferência dos esforços, é denominada de matriz e a fase responsável pela resistência ao esforço é denominada de reforço (BERTHELOT, 1999; GAY, 2014; LEVY NETO; PARDINI, 2016; REZENDE; COSTA; BOTELHO, 2011).

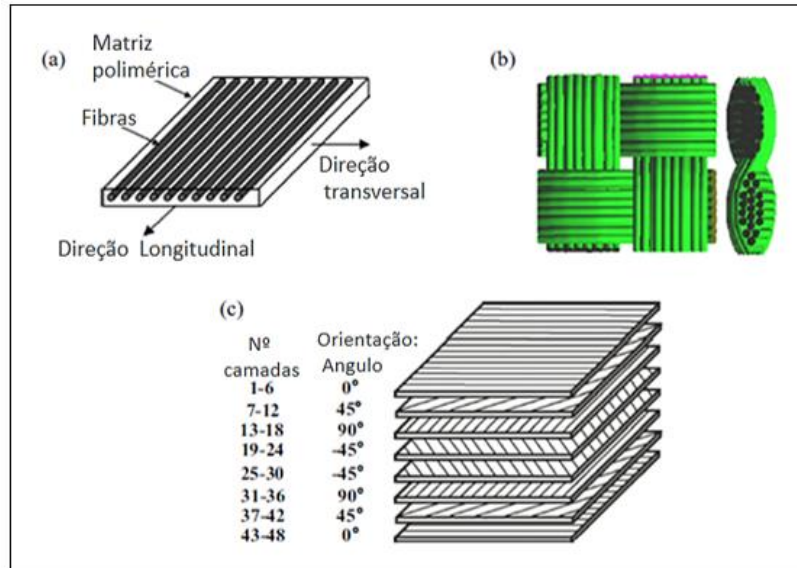
Os compósitos podem ser divididos de acordo com a matriz utilizada (metálica, polimérica e cerâmica) ou de acordo com o tipo de reforço empregado (fibras ou partículas) (BERTHELOT, 1999; GAY, 2014; GAY; HOA; TSAI, 2003; REZENDE; COSTA; BOTELHO, 2011). Os compósitos produzidos com matriz polimérica e reforçados com fibras contínuas têm grande destaque, devido às suas excelentes propriedades mecânicas, boa estabilidade térmica e baixo peso (LI et al., 2019b).

O reforço de fibras pode ser unidirecional (Figura 1a) ou bidirecional (Figura 1b). As fibras unidirecionais têm rigidez e força máxima ao longo da direção da fibra e propriedades mínimas na direção perpendicular às fibras, denominada material anisotrópico. Já as bidirecionais possuem rigidez e força máximas nas direções da fibra (LIU; TANG; CONG, 2012).

As fibras unidirecionais podem ser alinhadas em uma fina placa, sendo pré-impregnada com resina e utilizada para a construção de laminados utilizando a direção de fibras desejada (Figura 1c). Já as bidirecionais são tecidos tramados, sendo que há diversos tipos de tramagem disponíveis (LIU; TANG; CONG, 2012; XU; MKADDEM; EL MANSORI, 2016). Dentre os tecidos bidirecionais o mais comum é o *plain-weave* (Figura 1b), o qual possui uma tramagem

de mechas de fibras mais simples, sendo uma acima e outra abaixo (LEVY NETO; PARDINI, 2016; PARDINI, 2000).

Figura 1- Esquema das estruturas dos compósitos reforçados com fibras: (a) laminado de camada unidirecional, (b) laminado de camadas trançadas tipo *plain weave* e (c) laminado de múltiplas orientações, sequência quase isotrópica $[0^\circ/45^\circ/90^\circ/-45^\circ]_{6s}$



Fonte: Adaptado de Xu, Mkaddem e El Mansori (2016)

Os compósitos estruturais possuem um conjunto de características de desempenho que seus constituintes individualmente, por si só, não podem alcançar (BERTHELOT, 1999; CHUNG, 2010). Como exemplo Li, Mai e Ye (2000) citam a combinação de polímero e vidro, onde pode-se combinar a facilidade de conformação de um polímero com a dureza e resistência do vidro, no formato de fibra, obtendo-se assim um material mais resistente do que o plástico e menos frágil do que o vidro, podendo esse ser aplicado onde isoladamente nenhum dos dois seria adequado.

Devido à essas combinações é possível obter peças leves com elevada resistência e rigidez. Outras propriedades obtidas com os compósitos são: resistência a altas temperaturas, a corrosão e ao impacto, fato que torna muitas vezes mais interessante o uso dos compósitos ao invés de um único material (KATSOULIS et al., 2012; MATADI BOUMBIMBA et al., 2014).

Em virtude dessas características os compósitos são amplamente utilizados nas indústrias automobilística, aeroespacial, petroquímica, naval, eletroeletrônica, construção civil, energética, biomédica, esportiva, entre outras (CHUNG, 2010; DAVID MÜZEL et al., 2020; KATSOULIS et al., 2012; MATADI BOUMBIMBA et al., 2014; WANG; MELLY, 2018).

A indústria aeroespacial tem sido uma grande impulsionadora do desenvolvimento dos compósitos estruturais, pois segundo Moura, Morais e Magalhães (2005) o setor possui grandes desafios tecnológicos devido às suas especificidades. Os autores citam que a produção de peças desse setor é em pequena escala e com elevados custos de fabricação, os quais podem ser compensados com menores custos operacionais. Portanto, a indústria aeroespacial busca a redução do peso estrutural, aliado ao elevado desempenho mecânico dos veículos aeroespaciais, podendo trazer como benefício o aumento da carga transportada e menor consumo de combustível (BAKER; DUTTON; KELLY, 2004; REZENDE, 2007; SANTIAGO, 2014).

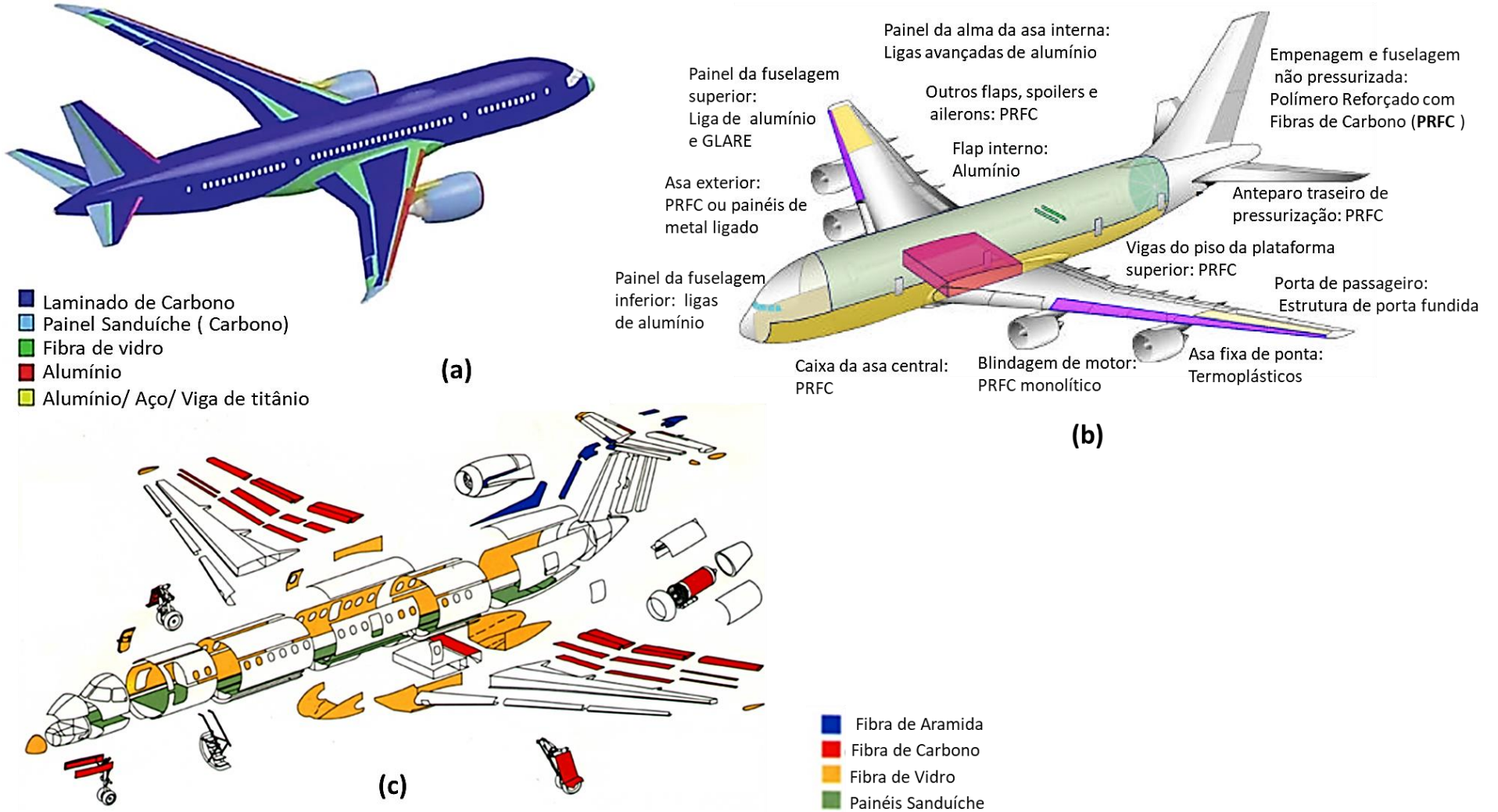
De acordo com Quinlan (2011) os compósitos estruturais surgiram após a 2ª Guerra Mundial, entretanto só foram considerados como alternativa viável nos anos 60, quando passaram a ser utilizados em aeronaves militares, como o Boeing B52. Atualmente, há empresas que têm como meta atingirem 50% do peso estrutural das aeronaves com materiais compósitos.

No setor aeronáutico tem-se como exemplo as empresas Boeing, Airbus e Embraer, sendo a Boeing criadora do B787 Dreamliner (Figura 2a), que possui 50% do peso estrutural em materiais compósitos. A Airbus que tem em sua lista dois grandes destaques, o A380 (Figura 2b) e o A350 XWB, com 25% e 53% de seu peso estrutural sendo constituído de materiais compósitos, respectivamente (AIRBUS, 2017; BOEING, 2018; MCCONNELL, 2011; RANA; FANGUEIRO, 2016). Já a EMBRAER, que utiliza compósito no interior das aeronaves, nas asas e nos trens de pouso (Figura 2c) (REZENDE; COSTA; BOTELHO, 2011; REZENDE, 2007).

No setor espacial há diversos exemplos do uso de materiais compósitos como as portas de carga principais, braço do sistema de manipulação remota, partes do nariz, asa e tubeira, do ônibus espacial Norte Americano (Figuras 3a, b); antenas, refletores parabólicos e elementos de treliça, do telescópio espacial Hubble (Figura 3c); escudo da Cápsula Orion (Figura 3d); e partes da tubeira, calhas, saia traseira de 1º estágio, coifa e motor de 4º estágio do Veículo Lançador de Satélites - VLS (Figura 3e) (ÉPOCA NEGÓCIOS, 2015; MOURITZ, 2012; NATIONAL AERONAUTICS AND SPACE ADMINISTRATION, 2010; PESCI, 2017; REZENDE; BOTELHO, 2000; SILVA, 2015b).

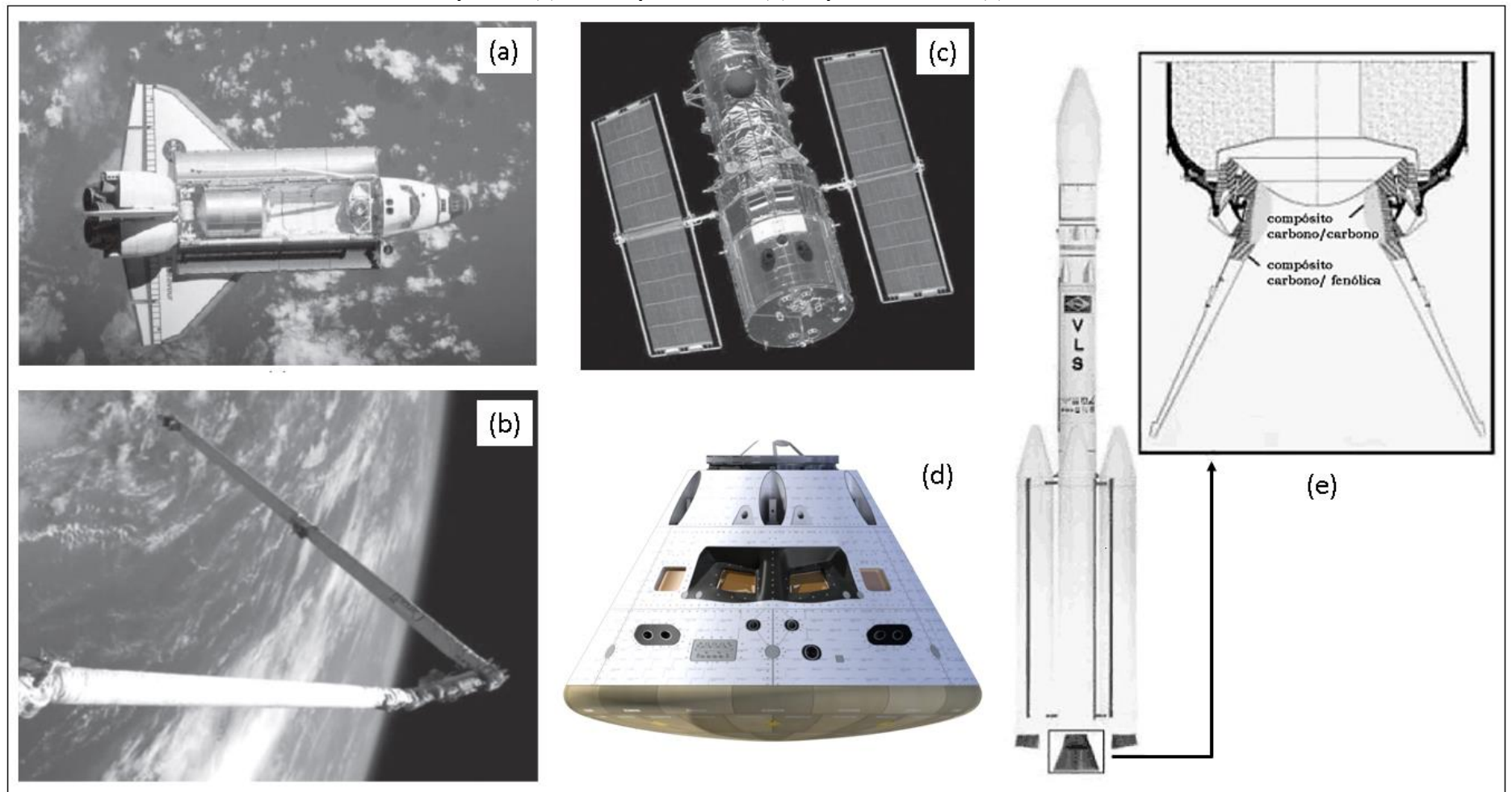
De forma geral, observa-se que a indústria aeroespacial utiliza diversos tipos de compósitos em um mesmo veículo, sendo que os mais utilizados são os compósitos carbono/carbono e os compósitos poliméricos reforçados com fibras contínuas (Figura 2 e 3).

Figura 2- Ilustração do uso de materiais compósitos em aeronaves (a) Boeing 787, (b) Airbus A380 e (c) Embraer EMB-145



Fonte: Adaptado de (a) Rana e Fanguero (2016), (b) Pora (2001) e (c) Rezende, Costa e Botelho (2011)

Figura 3- Veículos espaciais que contêm partes produzidas com materiais compósitos ablativos (a) Onibus espacial Columbia, (b) Braço remoto de onibus espacial, (c) telescópio Hubble, (d) Cápsula Orion e (e) VLS



Fonte: Adaptado de (a)-(c) Mouritz (2012), (d) National Aeronautics and Space Administration (2010, 2018) e (e) Rezende e Botelho (2000)

3.2 RESINA TERMORRÍGIDA

Na indústria aeroespacial, a maioria das aplicações de compósitos poliméricos reforçados com fibras contínuas tem sido baseada em resinas termorrígidas, nas quais as moléculas formam estruturas tridimensionais bem rígidas e que não podem ser reprocessadas (MOURA; MORAIS; MAGALHÃES, 2005; REZENDE; COSTA; BOTELHO, 2011).

A resina termorrígida apresenta boas propriedades mecânicas, resistência química, baixa absorção de umidade e baixa porcentagem de contração (REZENDE; COSTA; BOTELHO, 2011). Dentre os diversos tipos de resinas termorrígidas, as mais utilizadas para a produção de compósitos são as resinas epóxis, bismaleimidas, poliimidas, poliéster e fenólicas (PETERS, 1998; REZENDE; COSTA; BOTELHO, 2011).

3.2.1 Resina Fenólica

As resinas fenólicas são utilizadas devido ao seu baixo custo, comparado a outras resinas, facilidade de processamento, excelente molhabilidade nos reforços, bem como devido às suas boas propriedades como elevada resistência mecânica e a altas temperatura; estabilidades dimensional, térmica e química; boa resistência a vários solventes, ácidos e água; e excelentes propriedades dielétricas (SILVA, 2015a; SILVA; PARDINI; BITTENCOURT, 2016; TITA; PAIVA; FROLLINI, 2005; WANG; ZHENG; ZHENG, 2011; ZHANG et al., 2019).

De acordo com Pontarolli (2006), Almeida (2007), Pesci (2017) e Zhang et al. (2019), a resina fenólica é empregada em componentes de veículos espaciais, devido às suas propriedades ablativas (um material que resiste a altas temperaturas), por possuir baixa condutividade térmica, elevado calor específico e ser resistente à erosão, ao choque térmico e ao impacto.

Borges (2004), Silva (2015a), Silva (2015b), Fink (2013), Zhang et al. (2019) citam que a resistência a chamas (material não sofre ignição espontânea, não propaga chamas) e os baixos índices de emissão de fumaça e de outros gases tóxicos, são os pontos-chave para aplicação desta resina no setor aeroespacial.

Entretanto, a resina fenólica apresenta algumas desvantagens, como a obtenção de um material curado com elevada porosidade e valores de tensão e compressão moderados (REGHUNADHAN NAIR, 2004). Além disso, provem de um material derivado do petróleo, ou seja, uma matéria-prima não renovável (FINK, 2013; PAIVA; FROLLINI, 2010).

As principais resinas empregadas hoje, nos mais diversos setores da indústria, são provenientes do petróleo, por isso há muitas pesquisas sendo realizadas, visando a obtenção de resinas de fontes renováveis e que apresentem a mesma eficácia e que sejam ecologicamente

corretas. Como alternativa para a resina fenólica tem-se a resina furfurílica (DEKA; MISRA; MOHANTY, 2013; GANDINI; BELGACEM, 1997; LAGEL et al., 2016; RAY, 2017; ÜNVER; ÖKTEM, 2013).

3.2.1.1 Resina Furfurílica

A resina furfurílica tem sido valorizada por ser considerada uma bioresina, pertencente à classe dos furanos, os quais podem ser obtidas a partir de fontes renováveis de origem agrícola (DEKA; MOHANTY; MISRA, 2014; DOMÍNGUEZ; GRIVEL; MADSEN, 2012; DOMÍNGUEZ; MADSEN, 2014; SAMARŽIJA-JOVANOVIĆ et al., 2019; ÜNVER; ÖKTEM, 2013).

Win (2005), Gandini (2010), Danon, Marcotullio e De Jong (2014) e Dong et al. (2015) citam que o álcool furfurílico, reduzido do furfural, pode ser obtido das pentoses de sabugo de milho, farelo de café torrado, bagaço de cana, palha de trigo, palha de arroz, casca de aveia, etc. De acordo com Grosse et al. (2017) e Okaru (2019) o álcool furfurílico é um líquido incolor ligeiramente amarelado e com forte odor.

O álcool furfurílico pode ser utilizado em diversas aplicações como na produção de fibras sintéticas, borrachas, resinas, pigmentos, combustível de foguete, aditivo alimentar, agente aromatizante, ingrediente de produtos farmacêuticos, fungicida, inseticida, lubrificantes, entre outras aplicações (CUI et al., 2016; FULAJTÁROVA et al., 2015; GANDINI, 2010; HUANG et al., 2007; LAGEL et al., 2016; VILLAVERDE; GARETTO; MARCHI, 2015). De acordo com Okaru (2019) o regulamento da União Europeia (CE) n.º 872/2012 define o álcool furfurílico como substância aromatizante, sem limites ou restrições à sua utilização.

Diante desses fatos o álcool furfurílico é tido como um produto com elevado potencial de produzir produtos químicos de alto valor a partir de compostos naturais. Nesse âmbito, tem-se a produção de resina furfurílica, a partir da síntese do álcool furfurílico. (CHEN et al., 2018; DEKA; MOHANTY; MISRA, 2014; DOMÍNGUEZ; MADSEN, 2014; DONG et al., 2015).

De acordo com Gandini e Belgacem (1997), Ray (2017) e Composite Evolution (2019) a resina furfurílica é uma alternativa ecologicamente correta à resina fenólica. Comparada com a resina fenólica, a furfurílica possui características similares, porém com dureza superior e temperaturas de cura mais baixas (LEBACH, 1949).

Ma et al. (1995) e Deka, Mohanty e Misra (2014) citam que a resina furfurílica possui propriedades atraentes, como excelente resistência química e a chamas, baixa emissão de fumaça e alta temperatura de distorção ao calor ou temperatura de deflexão térmica (HDT)¹.

A resina furfurílica pode ser empregada em diversas aplicações como precursora polimérica para a obtenção de carbono vítreo, pois essa resina possui aproximadamente 50% de carbono residual e elevados graus de ligações cruzadas (DAMIÃO et al., 2011; DEKA; MOHANTY; MISRA, 2014; FERRARI; REZENDE, 1998); adesivos para madeira, matriz para nanocompósito (usados como absorventes e membranas de separação) e como matriz para os compósitos reforçados com fibras (COMPOSITE EVOLUTION, 2019; DEKA; MOHANTY; MISRA, 2014; DOMÍNGUEZ; MADSEN, 2014; EDWARDS; OISHI; BOTELHO, 2018; HE et al., 2011; RAY, 2017; TRANSFURANS CHEMICALS BVBA, 2018a; WANG; YAO, 2006).

A empresa Belga TransFurans Chemicals Bvba (2018a) produz resina furfurílica a partir do furfural obtido da cana de açúcar. A empresa possui dois tipos de resina furfurílica a Furolite[®] e a BioRez[®], as quais são resinas termorrígidas, provenientes da síntese do álcool furfurílico, livres de compostos orgânicos voláteis (COV).

A cura dessa classe de resina ocorre mediante a adição de um catalisador ácido, gerando assim, uma estrutura macromolecular reticulada rígida com elevada afinidade com fibras minerais ou naturais. Tanto a Furolite[®] quanto a BioRez[®] podem ser aplicadas na produção de compósitos para a construção civil, automotivo, ferroviário, aeroespacial, material resistente ao fogo, entre outros.

No âmbito acadêmico, existem pesquisas sobre o uso da resina furfurílica na produção de compósitos poliméricos reforçados com fibras, mais especificamente, na produção de compósitos poliméricos nanoestruturados (COMPOSITE EVOLUTION, 2019; CONEJO, 2019; MEN et al., 2008; VARGAS; SCHEUBNER; GUTHAUSEN, 2018).

3.3 COMPÓSITOS NANOESTRUTURADOS MULTIFUNCIONAIS

O crescimento populacional, a diversificação do consumo de bens e serviços e a intensa industrialização, devido às novas tecnologias, acarretou na busca incessante por materiais que possuíssem propriedades excepcionais, tais como melhor equilíbrio entre a rigidez, a resistência mecânica e a resistência ao impacto; menor consumo de energia; maior resistência à corrosão em meios agressivos; boas condutividades térmica e elétrica e propriedades magnéticas e ópticas, ou

¹ Temperatura de Deflexão Térmica: limite superior de operação para produtos poliméricos. O ensaio ocorre sobre uma tensão de flexão constante é imposta ao material com o aumento linear da temperatura e permite a definição da temperatura máxima na qual um material pode ser utilizado quando tensionado em flexão.

seja, não só funções de suporte mecânico, mas também funções integradas, as quais não são tão usuais (BOTELHO, 2011; CARBALLEIRA, 2010; HORNYAK et al., 2009).

Essa busca culminou nos compósitos nanoestruturados multifuncionais, os quais têm sido tema de diversas pesquisas na última década, visto que esse material apresenta melhorias significativas nas propriedades mecânicas, e principalmente, químicas, elétricas e térmicas, as quais são difíceis de se obter utilizando somente reforços tradicionais como as fibras de carbono, vidro e aramida (DÍEZ-PASCUAL et al., 2012; MONIRUZZAMAN; WINEY, 2006; RAHMAN et al., 2011; SAHOO et al., 2010).

A adição de nanopartículas aos materiais compósitos pode melhorar diversas propriedades como resistência a propagação de chama; melhorar os comportamentos mecânico, elétrico e térmico; além de reduzir a quantidade de reforço e conseqüentemente, reduzir o peso das peças produzidas (ASHRAFI et al., 2011; AYATOLLAHI et al., 2011; BAL, 2010; GUADAGNO et al., 2011; HORNYAK et al., 2009; LEE et al., 2010; SHOKRIEH et al., 2013; WU et al., 2010).

De forma geral, a nanotecnologia é, sem dúvida, uma das áreas de grande interesse científico, devido à baixa massa específica associada com os excelentes valores de condutividades elétrica e térmica, biocompatibilidade, entre outras. São inúmeros os materiais obtidos nessa área e suas aplicações abrangem diferentes setores como as indústrias médica, farmacêutica, embalagem, agrícola, espacial, aeronáutica, nuclear, automobilística, esportiva, eletrônica, química e siderúrgica. Dentre as nanopartículas existentes, a mais usual para a produção de compósitos poliméricos nanoestruturados são os nanotubos de carbono (BEZERRA et al., 2015; GUTIÉRREZ et al., 2014; KNOP; PILATO, 1985; YARAGALLA et al., 2019).

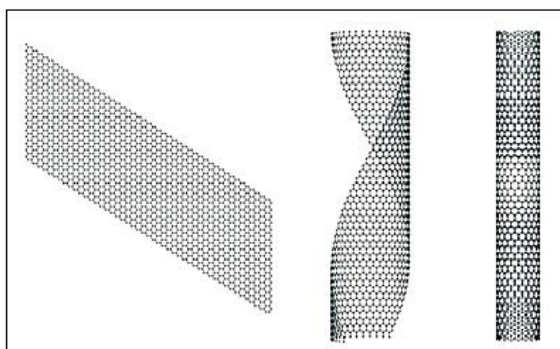
Os nanotubos de carbono são utilizados em diversas áreas como energia, militar, óptica, nanodispositivos, células combustíveis, sistemas condutores de energia, roupas inteligentes, biomédica, entre outros (BOTELHO, 2011; KUMAR; ALEXIS, 2018; RAPHEY et al., 2019). Segundo De Volder (2013) e Starost et al. (2017), devido à essa ampla utilização, a produção mundial de nanotubos de carbono cresceu 10 vezes entre 2006 e 2013.

3.3.1 Nanotubos de carbono

Em 1991 no Japão, Sumio Iijima sintetizou nanotubos de carbono pela primeira vez durante um estudo sobre a superfície dos eletrodos de grafite, utilizados em um equipamento de descarga elétrica para a síntese de fulerenos (BOTELHO, 2011; HARRIS, 2009; JORIO; DRESSELHAUS; DRESSELHAUS, 2008; KOO, 2006; RAFIQUE et al., 2016).

Os nanotubos de carbono (*Carbon Nanotubes-CNTs*), podem ser definidos como folha de grafeno enrolada, formando um cilindro (Figura 4), isto é, uma rede de átomos de carbonos sp^2 na forma hexagonal, tendo comprimento na ordem de micrometros e diâmetro na ordem de nanometros (AQEL et al., 2012; BOTELHO, 2011; DE VOLDER et al., 2013; HARRIS, 2009; HORNYAK et al., 2008).

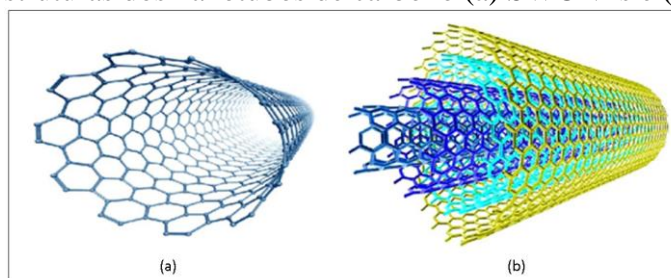
Figura 4- Enrolamento da folha de grafeno



Fonte: Adaptado de Aqel (2012)

Os CNTs podem ser classificados segundo a sua estrutura, sendo eles os nanotubos de paredes simples (SWCNTs – *Single Walled Carbon Nanotubes*), paredes múltiplas (MWCNTs – *Multi Walled Carbon Nanotubes*), parede dupla (DWCNTs -*Double Walled Carbon Nanotubes*) e de pequeno diâmetro (SDCNTs- *Samall-Diameter Carbon Nanotubes*) (AQEL et al., 2012; HARRIS, 2009; JORIO; DRESSELHAUS; DRESSELHAUS, 2008; KOO, 2006; RAFIQUE et al., 2016). Dentre ele, os mais utilizados são os SWCNTs e MWCNTs (Figura 5).

Figura 5- Estruturas dos nanotubos de carbono (a) SWCNTs e (b) MWCNTs

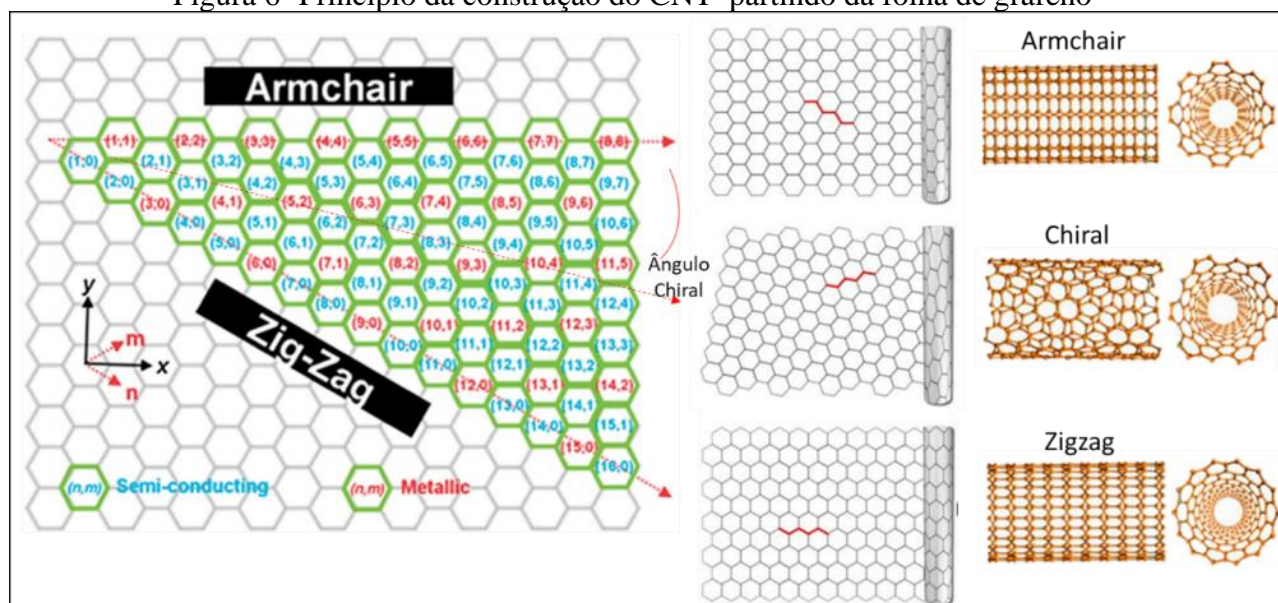


Fonte: Adaptado de Rafique et al. (2016)

Apesar dos nanotubos de carbono serem puramente constituídos de átomos de carbono, eles possuem diferentes propriedades físicas, dependendo da estrutura morfológica, sendo assim, podem apresentar comportamento variando entre metal e semicondutor, dependendo do seu diâmetro e helicidade (GUADAGNO et al., 2011; KOO, 2006; RIBEIRO, 2011).

Essas propriedades estão relacionadas com o processo de dobra da folha de grafeno, o qual pode ser realizado ao longo de diversas direções, podendo originar estruturas com diferentes diâmetros e simetrias (Figura 6). Tais nanoestruturas são definidas por um vetor e ângulo *chiral* (ANNU et al., 2017; AQEL et al., 2012; BOTELHO, 2011; GUADAGNO et al., 2011; HORNYAK et al., 2008; RAFIQUE et al., 2016).

Figura 6- Princípio da construção do CNT partindo da folha de grafeno



Fonte: Adaptado de Hornyak et al. (2008), Hodge et al. (2012) e Annu et al. (2017)

Em virtude de todas essas peculiaridades, os nanotubos de carbono, tanto o MWCNT como o SWCNT, possuem propriedades superiores às de materiais convencionais como o aço, mas com 1/6 de seu peso (BOTELHO, 2011; HORNYAK et al., 2009). A massa específica dos CNTs depende de sua configuração, sendo de aproximadamente 1,33 g/cm³ e 2,6 g/cm³ para SWCNTs e MWCNTs, respectivamente (ANNU et al., 2017; HORNYAK et al., 2008).

Os CNTs apresentam módulo de elasticidade entre 270 GPa a 3,6 TPa e uma resistência a tração entre 10 GPa a 150 GPa, ambas as propriedades dependem da estrutura e metodologia de ensaio (ANNU et al., 2017; DE VOLDER et al., 2013; HARRIS, 2009; HORNYAK et al., 2009; JORIO; DRESSELHAUS; DRESSELHAUS, 2008). Com relação à resistência a tração, Hornyak et al. (2008), De Volder (2013) e Annu et al. (2017) citam que os valores são superiores a de outros materiais, como o aço ou mesmo de uma fibra comercial.

Além das elevadas propriedades mecânicas, os CNTs também são considerados como materiais que possuem ótimas propriedades térmicas e elétricas. Segundo Hornyak et al. (2008, 2009) a condutividade térmica dos CNTs varia entre 1800x10³ e 6000x10³ W/mK. Se comparar esses valores com o de outros materiais como aço (54 W/mK), polipropileno (0,1-0,22 W/mK) e

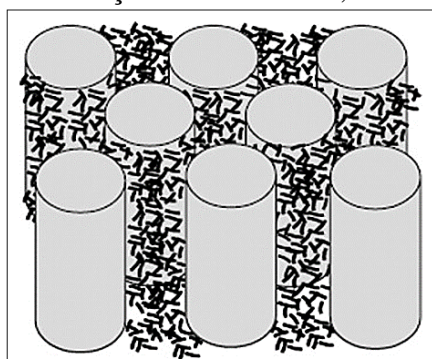
diamante (900-2320 W/mK) observa-se que os CNTs são excelentes condutores térmicos (HORNYAK et al., 2009).

Com relação às propriedades elétricas dos CNTs, Volder (2013) afirma que os MWNTs são tipicamente condutores e podem suportar correntes de até 10^9 A/cm². Annu et al. (2017) citam que os CNTs possuem uma condutividade elétrica entre 10^6 e 10^7 S/cm. Se comparar esses valores com o de outros materiais como o aço ($5,7-9,4 \times 10^6$ S/cm), grafite ($1,28 \times 10^5$ S/cm) e nylon 66 (10^{-12} a 10^{-13} S/cm) observa-se que os CNTs são excelentes condutores elétricos (HORNYAK et al., 2009).

Esses valores explicam o motivo dos CNTs serem tão atrativos para a produção de compósitos poliméricos multifuncionais, pois com a adição de pequenas quantidades desse nanomaterial pode-se prover o aprimoramento das propriedades mecânicas, elétricas e térmicas do compósito (AQEL et al., 2012; DE VOLDER et al., 2013; GUADAGNO et al., 2011; HORNYAK et al., 2008; RAFIQUE et al., 2016).

Entretanto, Vlasveld, Bersee e Picken (2005) comentam que a configuração do compósito nanoestruturado é considerada trifásica (Figura 7), sendo o reforço envolvido pela matriz polimérica, na qual as nanopartículas estão dispersas. Então Hornuak et al. (2009) ressaltam que a interfase/interface desempenha um papel crítico no desempenho da propriedade mecânica do compósito nanoestruturado, por isso, é importante que a ligação entre a matriz polimérica e o nanomaterial seja forte.

Figura 7- Esquema da interação entre a matriz, as nanopartícula e as fibras



Fonte: Vlasveld, Bersee e Picken (2005)

Muitos estudos têm sido realizados para desenvolver compósitos poliméricos com CNTs, entretanto, para Ribeiro (2015) o grande desafio no desenvolvimento de compósitos poliméricos nanoestruturados é atingir uma dispersão satisfatória do reforço na matriz, pois uma má dispersão pode acarretar em um compósito não homogêneo, conseqüentemente, prejudicando as

propriedades finais do material (EDWARDS; OISHI; BOTELHO, 2018; MEN et al., 2008; VOROBELI et al., 2016).

Segundo Yang et al. (2009) e Krause et al. (2010) a aglomeração ocorre, pois os CNTs apresentam-se de forma aglomerada, devido às interações de van der Waals, as quais dificultam sua dispersão na matriz polimérica. Uma das formas encontradas para prevenir essa aglomeração e fortalecer a adesão interfacial entre polímero e reforço é a funcionalização dos CNTs (ABDALLA et al., 2008; GUADAGNO et al., 2011; MA et al., 2010; SAHOO et al., 2010).

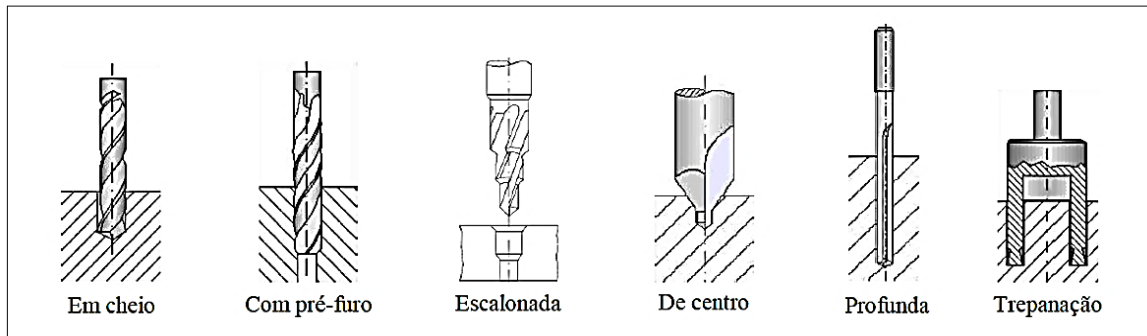
3.4 FURAÇÃO DE COMPÓSITOS

Para a fabricação de qualquer tipo de objeto, independente do material, é necessário dar forma e dimensão. Muitas empresas ao redor do mundo realizam esse tipo de serviço, podendo ser efetuado de diversas formas como fundição, forjamento, extrusão, conformação mecânica e usinagem. Dentre todos os processos de fabricação, a usinagem é o mais flexível em termos de formatos e dimensões, e é o que garante maior precisão das dimensões das peças e melhor acabamento (DINIZ; MARCONDE; COPPINI, 2013; MACHADO et al., 2009). Mesmo após o forjamento ou fundição de uma peça, muitas vezes é necessário melhorar suas características, e nesse caso, é realizada uma operação de usinagem, justamente para garantir os parâmetros dimensionais e melhorar o seu acabamento.

Existem vários processos de usinagem que podem ser empregados aos mais diversos tipos de materiais, tais como torneamento, fresamento, furação, etc. Dentre esses, o processo de furação é o mais utilizado em materiais compósitos, principalmente nos compósitos poliméricos reforçados com fibras, como forma de junção mecânica de duas ou mais peças (GUTIÉRREZ et al., 2014; MAZUMDAR, 2002; SHEIKH-AHMAD, 2009; TSAO, 2012; TSAO; HOCHENG, 2005a).

Segundo Shaw (2005) e Stephenson e Agapiou (2006) a furação é um processo mecânico de usinagem destinado à obtenção de um furo, geralmente cilíndrico, com o auxílio de uma ferramenta cortante. De acordo com Klocke (2011) e Tsao (2012), na furação o movimento de corte é circular e o movimento de avanço é linear na direção do eixo de rotação da ferramenta de corte, a qual em geral é uma broca. O processo de furação pode ser classificado de acordo com as características requeridas (Figura 8).

Figura 8- Alguns processos de de furação

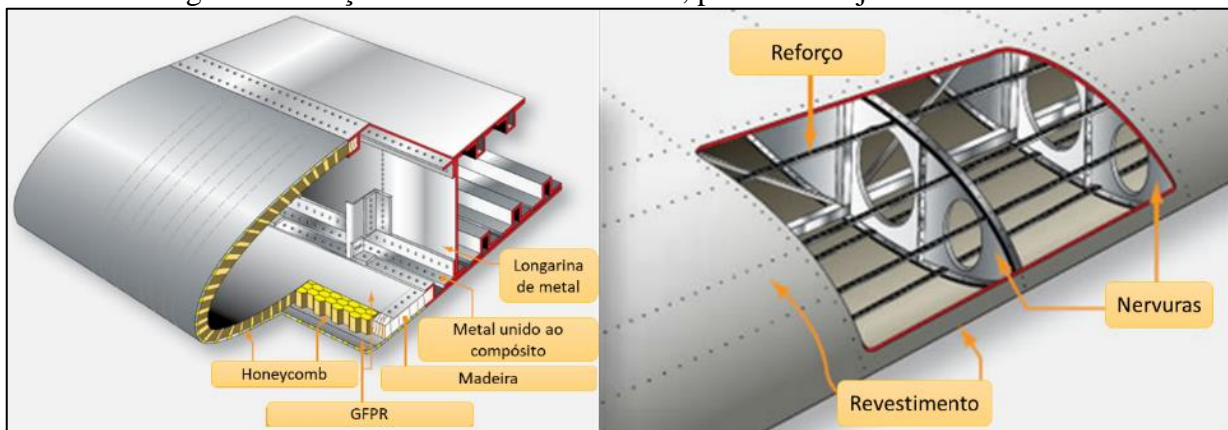


Fonte: Adaptado de Souza (2011)

De acordo com Stemmer (1995), Eberhardt (2009) e Diniz, Marcondes e Coppini (2013) a furação é um processo muito utilizado na indústria manufatureira, visto que a maioria das peças, tem ao menos um furo e somente uma pequena parcela já vem com o furo pronto do processo de obtenção da peça bruta (fundição, forjamento, etc).

Segundo Gutiérrez et al. (2014), o processo de furação para os compósitos é muito importante pois, em geral, as peças apresentam formato de placas, fabricadas por moldagem, conformação ou laminadas, sendo assim, é necessário a furação das placas para uma posterior montagem (Figura 9). Por isso qualquer defeito resultante do processo pode implicar na rejeição da peça, tendo grande impacto no custo de produção (ABRATE; WALTON, 1992; KALPAKJIAN; SCHMID, 2009; KLOCKE, 2011).

Figura 9-Esboço da união dos laminados, por meio de juntas mecânicas



Fonte: Adaptado de Federal Aviation Administration (2012)

Na última década foram realizados estudos abordando o número de furos que uma aeronave pode conter e chegou-se à conclusão, que um caça militar possui em média 300 mil furos, já uma aeronave comercial pode ter entre 1,5 e 3 milhões de furos, sendo que no caso de um A380 um

único módulo da asa (*wing box*) tem em média 180 mil furos e a asa no todo aproximadamente 750 mil furos (GIASIN; AYVAR-SOBERANIS, 2017; GIASIN; AYVAR-SOBERANIS; HODZIC, 2015)

Fernández-Pérez et al. (2017) citam que devido ao grande número de furos necessários para a montagem de componentes aeronáuticos, as operações de usinagem devem ser projetadas garantindo níveis competitivos de produtividade e custo por operação, sempre mantendo a qualidade exigida na superfície usinada.

Nos materiais compósitos o processo de furação é complexo, devido à heterogeneidade do material, anisotropia, sensibilidade térmica e pela abrasividade dos reforços, causando assim algumas complicações, com impacto direto na qualidade dos furos (ABRATE; WALTON, 1992; RAJ; KARUNAMOORTHY, 2016; TETI, 2002; TSAO, 2012).

Moura, Morais e Magalhães (2005) e Li et al. (2017) citam que o desempenho das juntas aparafusadas e rebitadas depende da qualidade dos furos usinados, por isso é tão importante se empregar os melhores parâmetros de corte para cada compósito/ferramenta, e que para isso deve-se conhecer os mecanismo de usinagem, visando melhorá-los. De acordo com Calzada et al. (2012), a qualidade final do processo de usinagem em compósitos irá depender de diversos fatores, como geometria da ferramenta, ângulo das fibras, parâmetros de usinagem empregados, dentre outros.

Segundo Chita (2012), Tsao (2012) e Chen et al. (2013), a furação em compósitos pode causar diversos defeitos nas peças, como a delaminação, deslocamento fibra/matriz e danos de origem térmica. Esses defeitos reduzem significativamente o desempenho do material, bem como propiciam a propagação das trincas, quando o componente é submetido à ação de cargas, e com isso, podem levar o componente à falha/fratura (RAJ; KARUNAMOORTHY, 2016; SANTIUSTE; BARBERO; MIGUÉLEZ, 2011).

Por isso, Guillaumat e Hamdoun (2006) afirmam que para se ter uma previsão confiável de estruturas em compósitos, dedicadas ao serviço de longo prazo, é necessário conhecer todos os fatores envolvidos, dentre eles o processo de usinagem de cada componente.

Para a indústria aeronáutica, dentre todos os defeitos causados pela furação, a delaminação é o fator mais crítico, pois é responsável pela rejeição de aproximadamente 60% dos componentes produzidos para o setor (KRISHNARAJ et al., 2012). Segundo Hocheng (2012), essa rejeição está relacionada com a má qualidade do furo.

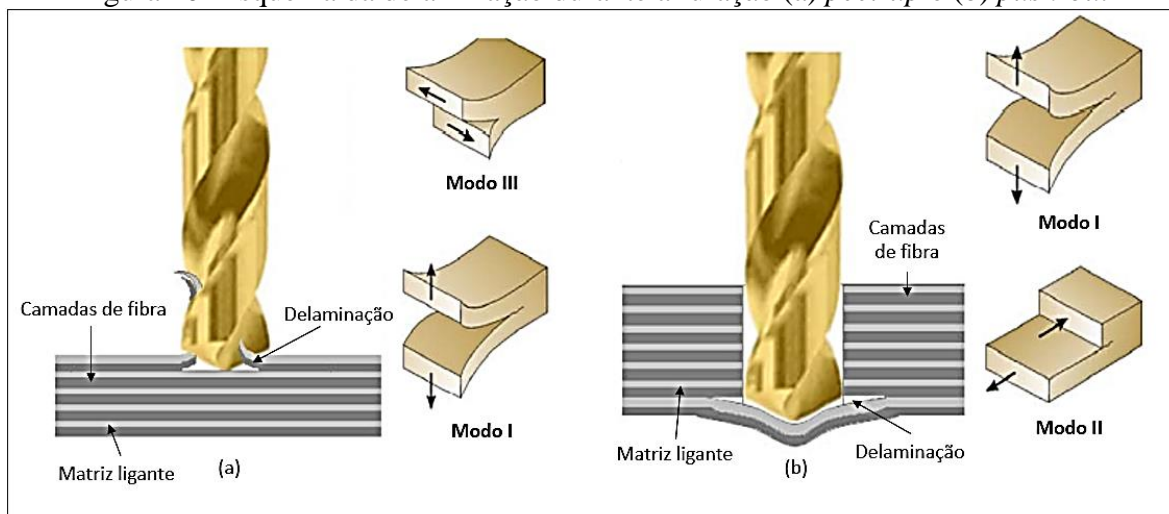
3.5 DELAMINAÇÃO

A delaminação pode ser definida como uma falha interlaminar, caracterizada pela separação de duas lâminas adjacentes. O evento ocorre repentinamente, quando a tensão atuante entre as lâminas supera a resistência interlaminar, causando assim uma fissura (GAUGEL et al., 2016; HAEGER et al., 2016; TITA, 2003; ZARIF KARIMI et al., 2017; ZHANG et al., 2020).

A delaminação reduz a integridade estrutural do compósito, bem como acarreta uma pobre tolerância de montagem (HRECHUK; BUSHLYA; STÅHL, 2018; KRISHNARAJ et al., 2012; LISSEK; TEGAS; KAUFELD, 2016). A delaminação é considerada como um fator limitante para tolerâncias de usinagem e confiabilidade de peças de compósitos poliméricos reforçados com fibras (GAUGEL et al., 2016; OJO et al., 2017), pois a zona delaminada pode provocar uma diminuição das propriedades mecânicas dos componentes de uma estrutura, o que pode levar à falha de toda a estrutura (CHITA, 2012; OJO et al., 2017; PHAPALE; AHIRE; SINGH, 2018).

A delaminação pode ocorrer tanto na entrada da broca, denominada de *peel-up*, como na saída da broca, denominada de *push-out* (Figura 10) (CHITA, 2012; GAUGEL et al., 2016; ZARIF KARIMI et al., 2017).

Figura 10- Esquema da delaminação durante a furação (a) *peel-up* e (b) *push-out*



Fonte: Adaptado de Girot, Dau e Gutiérrez-Orrantia (2017)

O mecanismo de delaminação por *peel-up* é causado pelo arrancamento das fibras das camadas superiores, no momento em que a extremidade da broca toca a primeira camada, forçando assim, a ruptura de ligações entre as camadas (MOURA; MORAIS; MAGALHÃES, 2005; TAVARES, 2013; ZARIF KARIMI et al., 2017). Nesse mecanismo, a delaminação pode ocorrer devido aos Modos I e III de falhas (Figura 10a), sendo que o Modo I seria devido à força axial

causando pela broca e o Modo III devido ao cisalhamento rotativo de fibras não cortadas que estão sendo enroladas na broca (GIROT, DAU, GUTIÉRREZ-ORRANTIA, 2017).

Já o mecanismo de *push-out* é resultado da força de compressão axial que a broca exerce sobre as camadas não cortadas do laminado e quando a carga excede a resistência da ligação interlaminar do material, a delaminação ocorre (CHITA, 2012). Segundo Moura, Morais e Magalhães (2005) e Tavares (2013) a saída da broca atua como um punção² e a força de avanço promove a delaminação entre as camadas inferiores. De acordo com Tsao, Hocheng e Chen (2012) e Girot, Dau e Gutiérrez-Orrantia (2017) esse mecanismo pode ocorrer devido aos Modos I e II de falha (Figura 10b). Muitos autores consideram a delaminação *push-out* mais severa que a delaminação *peel-up* (FANG et al., 2012; KHASHABA et al., 2010a, 2010b; SHYHA et al., 2010).

3.5.1 Cálculo da delaminação

Nos últimos anos, foram desenvolvidas formas de quantificar a delaminação causada pela furação. Em geral, eles são baseados na relação entre as áreas delaminada, máxima e nominal (*Adel*, *Amax* e *Anom*) e os diâmetros dos furos (*Dmax* e *Dnom*). Entre as metodologias citadas na literatura, as mais utilizadas são a unidimensional (convencional), bidimensional e a tridimensional (combinação de fatores ou ajuste dos fatores de delaminação) (Quadro 1).

² Punção: bastão de metal com uma ponta cônica

Quadro 1- Fórmulas para determinação do fator delaminação


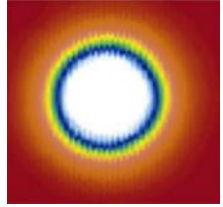
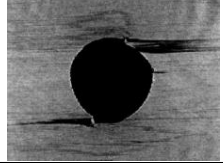


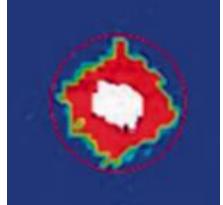
Fator delaminação	Fórmula	Desvantagens	Ref.
Unidimensional	$Fd = \frac{Dmax}{Dnom}$	A contribuição da área danificada é ignorada	(BATISTA et al., 2017; CHEN, 1997; FARAZ; BIERMANN; WEINERT, 2009; GAUGEL et al., 2016; KHASHABA, 2004; RAWAT; ATTIA, 2009a; ZARIF KARIMI et al., 2017).
Bidimensional	$Fd = \frac{Adel}{Anom}$	A contribuição do comprimento máximo da trinca é ignorada	(FARAZ; BIERMANN; WEINERT, 2009; GAUGEL et al., 2016; MOHAN; KULKARNI; RAMACHANDRA, 2007; TSAO; KUO; HSU, 2012).
Tridimensional	$Fda = Fd * \frac{Adel}{(Amax - Anom)} * (Fd^2 - Fd)$	A contribuição das finas trincas é ignorada	(BATISTA et al., 2017; DAVIM; REIS, 2003a; DAVIM; REIS; ANTÔNIO, 2004; DAVIM; RUBIO; ABRÃO, 2007; FARAZ; BIERMANN; WEINERT, 2009; NAGARAJAN; SELWIN RAJADURAI; ANNIL KUMAR, 2012).

O diagrama ilustra a delaminação em dois tipos de furos. À esquerda, um furo com diâmetro nominal D_{nom} e diâmetro máximo da delaminação D_{max} . A área danificada é A_{del} e o comprimento máximo da trinca é A_{max} . À direita, um furo com fibras não cortadas, resultando em delaminação devido a essas fibras. As finas trincas são indicadas no diagrama à esquerda.

Existem algumas técnicas não destrutivas (Quadro 2) que podem ser usadas para definir a área delaminada e a dimensão e formato dos furos. As tecnologias de medição mais utilizadas, segundo a literatura, são a microscopia óptica, ultrassom C-scan, raio-X, tomografia e imagem digital (CAGGIANO; NELE, 2018; GENG et al., 2019; HOCHENG; TSAO, 2006; LISSEK; TEGAS; KAUFELD, 2016; LIU; TANG; CONG, 2012). As tecnologias de medição são geralmente compostas de aquisição e processamento de imagens.

Além da análise não destrutiva, métodos de elementos finitos têm sido usados nas últimas décadas para estudar a usinagem de materiais compósitos, incluindo a determinação da delaminação causada pelo processo de furação (DAVIM, 2015; ISBILIR; GHASSEMIEH, 2014; PHADNIS et al., 2013; WANG; KIRWA, 2018).

Quadro 2- Técnicas utilizadas para a determinação da delaminação

Técnicas de mensuração		Ref.
Microscopia		(CAMPOS-RUBIO et al., 2008; DAVID-MÜZEL et al., 2020; DAVIM; REIS, 2003b; GAUGEL et al., 2016; GENG et al., 2019; HAEGER et al., 2016; KHASHABA, 2013; LIU; TANG; CONG, 2012; XU; MKADDEM; EL MANSORI, 2016)
Ultrassom C-scan		(ABISH et al., 2018; BAYRAKTAR; TURGUT, 2016; CHEN et al., 2015; DU et al., 2016; GENG et al., 2019; HAEGER et al., 2016; HALLETT et al., 2009; HOCHENG; TSAO, 2006; KHASHABA, 2013; LIU; TANG; CONG, 2012; MOURITZ, 2012; PARK et al., 2018; PAWAR et al., 2015; SHETTY et al., 2017; TSAO; HOCHENG, 2005b; XU; MKADDEM; EL MANSORI, 2016)
Raio-X		(GENG et al., 2019; HALLETT et al., 2009; LISSEK; TEGAS; KAUFELD, 2016; LIU; TANG; CONG, 2012; PHADNIS et al., 2013; SAOUDI et al., 2016; XU; MKADDEM; EL MANSORI, 2016)
Tomografia		(GENG et al., 2019; HAEGER et al., 2016; HOCHENG; TSAO, 2007, 2006; LI et al., 2015; LIU; TANG; CONG, 2012; MCCOMBE; HALLETT, 2012; SCHULZE et al., 2011; SILVA; PAMIES TEIXEIRA; MACHADO, 2014; TSAO; HOCHENG, 2005b; XU; MKADDEM; EL MANSORI, 2016)
Imagem Digital		(ABRÃO et al., 2007; DAVIM; RUBIO; ABRÃO, 2007; ISBILIR; GHASSEMIEH, 2013; KHASHABA, 2004, 2013; KHASHABA et al., 2010b; KRISHNARAJ; ZITOUNE; DAVIM, 2013; SILVA; PAMIES TEIXEIRA; MACHADO, 2014; SORRENTINO; TURCHETTA; BELLINI, 2018)
Simulação		(FEITO et al., 2014b; ISBILIR; GHASSEMIEH, 2014; PHADNIS et al., 2013; PHAPALE; AHIRE; SINGH, 2018; SINGH; BHATNAGAR, 2006; SINGH; BHATNAGAR; VISWANATH, 2008; WANG; KIRWA, 2018; WANG; MELLY, 2018; WEI et al., 2014)

3.5.2 Mecanismos de delaminação induzidos pela furação

De acordo com a literatura, os parâmetros de corte utilizados, como velocidade de corte e avanço, podem aumentar ou diminuir a delaminação (BONNET et al., 2015; GARA; M'HAMED; TSOUMAREV, 2018; ISBILIR; GHASSEMIEH, 2013; ISMAIL et al., 2016; LATHA; SENTHILKUMAR; PALANIKUMAR, 2011; PHAPALE; AHIRE; SINGH, 2018; QIU et al., 2018a; XU et al., 2019a; ZHENG; DONG; LIAO, 2019).

Analisando os resultados obtidos por diversos autores (Figura 11), verificou-se que quase todos os pesquisadores citaram que a delaminação aumenta com o aumento do avanço, para diferentes velocidades de corte ou geometria das brocas utilizadas (ABRÃO et al., 2008; DAVIM;

REIS, 2003b; DAVIM; REIS; ANTÓNIO, 2004; GAITONDE et al., 2008; KHASHABA et al., 2010a; KILICKAP, 2010; KRISHNAMOORTHY et al., 2015; PALANIKUMAR, 2011).

Entretanto Geier e Szalay (2017) alertam que as camadas do laminado se separam mais facilmente quando a matriz perde sua estabilidade devido às altas temperaturas gerada durante a furação. Isso ocorre porque na furação convencional as arestas de corte cortam continuamente o material, gerando atrito. Portanto, se o avanço for muito baixo, a broca permanece em contato com o material por mais tempo, acarretando em altas temperaturas devido ao atrito (o coeficiente de condutividade térmica dos polímeros é menor do que o dos metais), conseqüentemente, pode gerar maior delaminações.

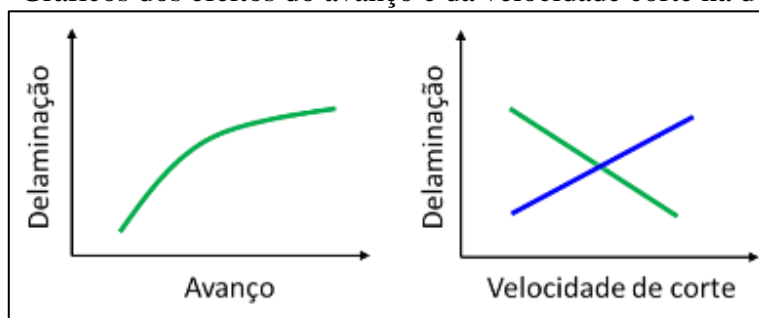
Com relação à velocidade de corte, os autores obtiveram resultados contraditórios. Para Davim e Reis (2003a), Davim, Reis e António (2004), Kilickap (2010) e Sorrentino, Turchetta e Bellini (2018) a delaminação aumentou com o aumento da velocidade de corte. Já para Gaitonde et al. (2008), Tsao (2008a), Khashaba et al. (2010a), Palanikumar (2011), Tsao, Kuo e Hsu (TSAO; KUO; HSU, 2012) e Ismail et al. (2016) a delaminação diminuiu como aumento da velocidade de corte. Essa diferença está ligada, principalmente, ao tipo de ferramenta de corte e ao laminado que cada autor utilizou em seus estudos. Porém, todos os autores constataram que o efeito do avanço é maior que o efeito da velocidade de corte.

Também há estudos tratando individualmente as delaminação *peel-up* e *push-out*, sendo relatado que a delaminação *peel-up* não é influenciada pela velocidade do fuso ou pelo avanço. Já no caso da delaminação *push-out*, tanto a rotação como o avanço são significantes, sendo o avanço o fator mais significativo (KRISHNARAJ et al., 2012; RAMESH; PALANIKUMAR; REDDY, 2014; VELAYUDHAM; KRISHNAMURTHY, 2007).

De acordo com Ponnuvel e Moorthy (2013, 2014), Li et al. (2015) e Aveen et al. (2021) uma forma de se minimizar a delaminação, tanto na entrada quanto na saída do furo, é com a adição de nanotubos de carbono à matriz polimérica. Segundo Panchagnula and Kuppan (2019) pequenas quantidades de nanotubos de carbono ajudam a melhorar a interação entre a matriz e a fibra, o que resulta na melhora da transferência de carga, bem como, modifica a falha na interface fibra/matriz.

Na Figura 11 são apresentados gráficos construídos com base nos dados da literatura supracitada. Esse mesmo procedimento foi utilizado ao longo da revisão bibliográfica, visando uma melhor comparação entre os resultados obtidos por diversos estudos.

Figura 11- Gráficos dos efeitos do avanço e da velocidade corte na delaminação



Fonte: Autoria própria

Além desses, vários outros fatores podem influenciar na delaminação dos compósitos, sendo que os principais fatores são a geometria, o material e o desgaste da ferramenta de corte, a força de avanço e o uso de placas de suporte. Portanto, diversos estudos estão tentando correlacionar os parâmetros de corte com os demais fatores que podem influenciar a delaminação, visando minimizar esse defeito (Quadro 3).

Quadro 3- Fatores que influenciam na delaminação dos compósitos

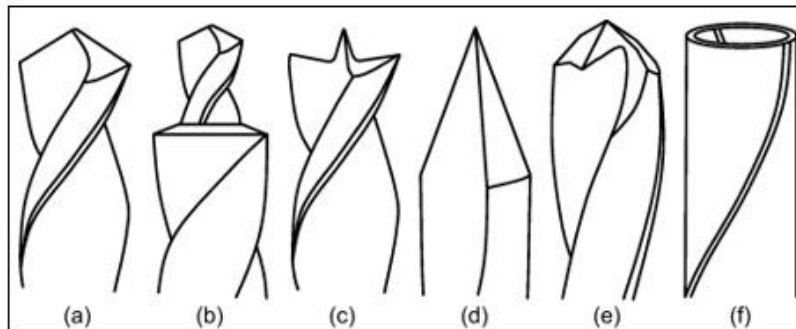
Fatores	Ref.
Geometria e material das ferramentas de corte	(BONNET et al., 2015; DAVIM; REIS, 2003b; GARA; M'HAMED; TSOUMAREV, 2018; GIASIN et al., 2019; GRILO et al., 2013; HEISEL; PFEIFROTH, 2012; HOCHENG; TSAO, 2005; KARNIK et al., 2008; KRISHNAMOORTHY et al., 2015; LATHA; SENTHILKUMAR; PALANIKUMAR, 2011; LAZAR; XIROUCHAKIS, 2011; NAYAK; BHATNAGAR; MAHAJAN, 2005a; OJO et al., 2017; PRAMANIK; LITTLEFAIR, 2014; QIU et al., 2018b; QUAN; ZHONG, 2009; SCHULZE et al., 2011; SHOKRIEH, 2014; SHUAIB; AL-SULAIMAN; HAMID, 2004; TSAO, 2008a; VELAYUDHAM; KRISHNAMURTHY, 2007; WEI et al., 2014; XU; AN; CHEN, 2014; XU et al., 2019c; XU; ZHANG; WU, 2016; YEAGER; NAZARI; AROLA, 2008; YEN et al., 2004; ZHENG; DONG; LIAO, 2019)
Desgaste da ferramenta de corte	(AMEUR et al., 2017; CHE et al., 2014; GIASIN et al., 2019; KUMAR; MALHOTRA; KRISHNAMURTHY, 2005; PATRA; PAL; BHATTACHARYYA, 2007; RAMIREZ et al., 2014; SAKUMA et al., 1985; SHUNMUGESH; KAVAN, 2017; SHYHA et al., 2011; WANG et al., 2014b, 2013; XU et al., 2019a, 2019b).
Força de avanço	(ABHISHEK; DATTA; MAHAPATRA, 2014; DAVIM; REIS; ANTÓNIO, 2004; ENEYEW; RAMULU, 2014; GIASIN et al., 2017; HOCHENG; TSAO, 2005, 2006; JUNG; KIM; LEE, 2005; KHASHABA et al., 2010a; KUMAR; SING, 2017; LIU; TANG; CONG, 2012; LIU et al., 2018; OJO et al., 2017; PERVAIZ et al., 2020; PHAPALE; AHIRE; SINGH, 2018; PIQUET et al., 2000; SAOUDI et al., 2016; VELAYUDHAM; KRISHNAMURTHY, 2007; WANG et al., 2014a; XU et al., 2019b; ZENIA et al., 2015; ZHANG; ZHANG; WANG, 2001; ZHENG; DONG; LIAO, 2019).
Uso de suporte	(CAPELLO, 2004; DOGRUSADIK; KENTLI, 2017; FEITO et al., 2018; GENG et al., 2019; HEIDARY; MEHRPOUYA, 2019; HOCHENG et al., 2014; HOCHENG; TSAO; CHEN, 2016; LI et al., 2019a; LIU et al., 2017; RAHME et al., 2017; TSAO; HOCHENG, 2016; TSAO; HOCHENG; CHEN, 2012; TSAO; HOCHENG, 2005c)

3.5.2.1 Geometria e material da ferramenta de corte

Segundo Schulze et al. (2011) podem ser empregadas no processo de furação diversos perfis geométricos de brocas, sendo as principais a helicoidal, escalonada, em W, espada, multifacetada e *core drill* (Figura 12).

Figura 12- Perfil geométrico de ferramentas utilizadas na furação de materiais compósitos:

(a) Helicoidal; (b) Escalonada; (c) *Candlestick*; (d) Espada; (e) Multifacetada; (f) *Core*

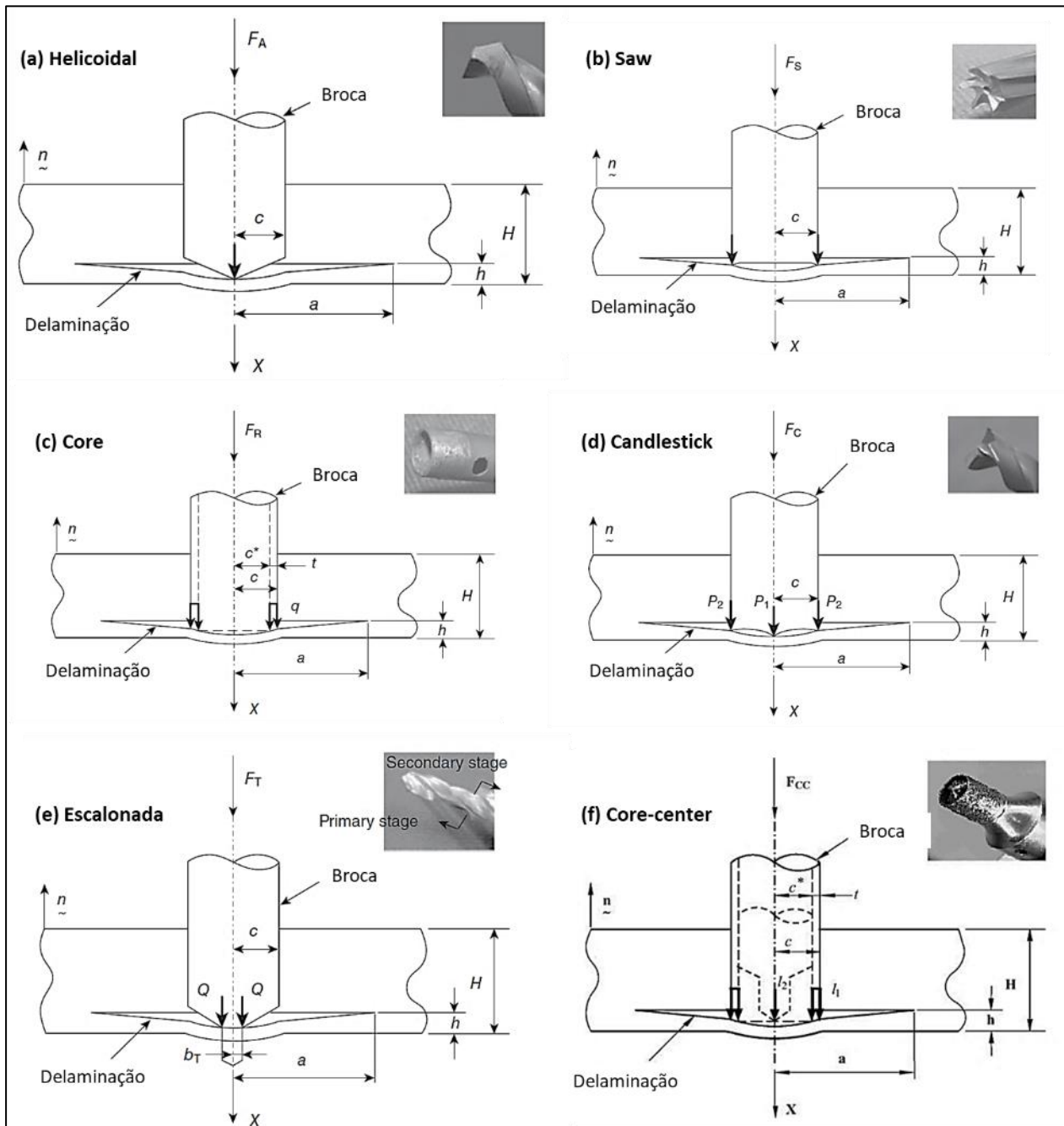


Fonte: Adaptado de Schulze et al. (2011)

De acordo com Davim e Reis (2003b), Durão et al. (2010), Liu et al., (2012) e Ojo et al. (2017) cada um desses perfis gera uma delaminação diferente, devido ao perfil de corte característico que cada ferramenta possui (Figura 13). Por isso, deve-se considerar o material que será usinado na hora de selecionar a ferramenta de corte que melhor se encaixa no projeto, pois para Piquet (2000) e Feito (2014a), cada perfil é adequado para um tipo de material diferente.

Segundo Davim e Reis (2003a) Abrão et al. (2008) uma seleção inadequada pode resultar no aumento da temperatura, devido ao atrito entre as faces de folga principal e secundária e a peça usinada, além de aumentar o desgaste, força de avanço e torque, que conseqüentemente, acarretam em uma má qualidade do furo e danos à superfície.

Figura 13- Esquema de análise de delaminação para várias brocas



Fonte: Adaptado de Hocheng e Tsao (2005, 2006)

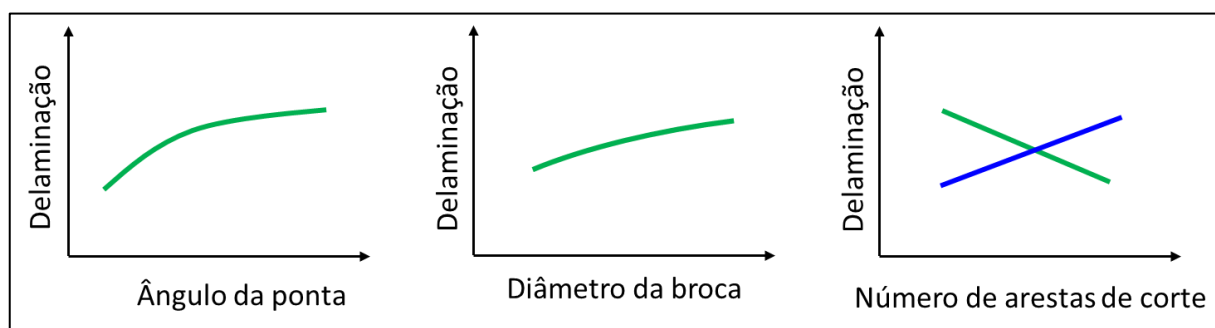
Estudos mostram que a geometria da ferramenta tem grande influência na delaminação dos furos, cujo principal fator é o ângulo da ponta da broca (Figura 14), sendo que com maiores ângulos há maiores delaminações (ABRÃO et al., 2008; BONNET et al., 2015; CAMPOS-RUBIO et al., 2008; GAITONDE et al., 2008; HEISEL; PFEIFROTH, 2012; KILICKAP, 2010; KRISHNAMOORTHY et al., 2015). Segundo Bonnet et al. (2015) e Krishnamoorthy et al. (2015)

há uma ligação entre o ângulo da ponta e o avanço, sendo que a utilização de ângulos maiores que 110° acarreta em uma maior delaminação à medida que se aumenta o avanço.

De acordo com Abrão et al. (2008), Basmaci et al. (2017) e Venkatesh e Sikarwar (2018) o diâmetro da broca utilizada também irá influenciar na delaminação, sendo que maiores diâmetros causam maiores delaminações (Figura 14). Para Mohan, Ramachandra e Kulkarni (2005) e El-Sonbaty, Khashaba e Machaly (2004) isso é devido ao aumento na área de cisalhamento.

Outro fator que pode influenciar é o número de arestas de corte da ferramenta (Figura 14). Esse é um fator pouco estudado, mas segundo Piquet et al. (2000) um número maior de arestas de corte aumenta o comprimento do contato da ferramenta/peça, o que facilita a remoção do calor, e consequentemente, melhora a rigidez e diminui o desgaste da ferramenta, o que gera uma menor delaminação. Já para Davim e Reis (2003a) um menor número de arestas de corte resulta em uma menor delaminação. Esses resultados divergentes são devido à ferramenta de corte (geometria e material) e ao material de estudo escolhido, fato este que corrobora com a ideia de que para cada projeto há uma ferramenta adequada.

Figura 14 - Efeitos do ângulo da ponta, diâmetro da broca e número de arestas de corte na delaminação



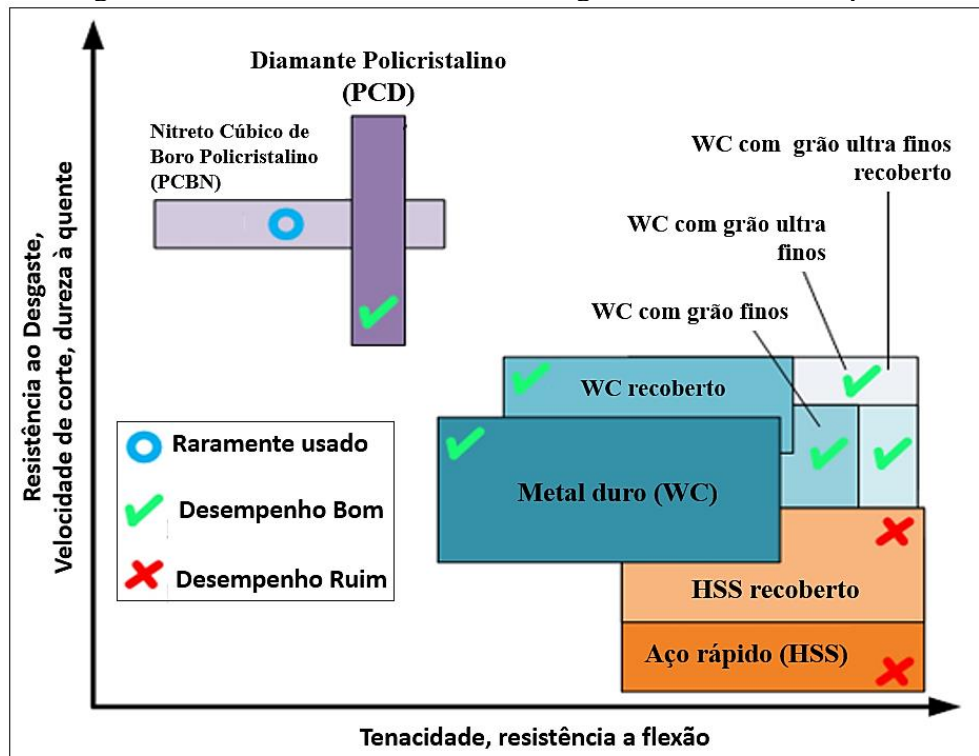
Fonte: Autoria própria

Segundo Valente (2012) as ferramentas utilizadas na usinagem de metais são as mesmas empregadas na furação dos materiais compósitos, porém Che et al. (2014) alertam que as características dos materiais compósitos fazem com que o comportamento e desempenho dessas ferramentas sejam muito diferentes. Muitas pesquisas foram realizadas tentando compreender essa diferença e quais seriam os melhores materiais para serem empregados na furação dos compósitos (Figura 15).

De acordo com Che et al. (2014), essas pesquisas revelaram que as ferramentas de aço rápido não são indicadas, devido à alta taxa de desgaste que sofrem, bem como pelo pobre acabamento superficial. Já as ferramentas de metal duro e diamante tiveram bom desempenho na usinagem dos

laminados. As ferramentas de metal duro oferecem a flexibilidade de geometria e as de diamante oferecem alta dureza e resistência ao desgaste, porém são bem mais caras que as de metal duro. Com isso, o recomendado é que se empregue as ferramentas de metal duro na usinagem de desbaste e as diamantadas no acabamento. Apesar de existirem ferramentas de PCBN projetadas para a usinagem de compósitos elas raramente são encontradas na literatura.

Figura 15- Materiais utilizados na usinagem de materias compósitos



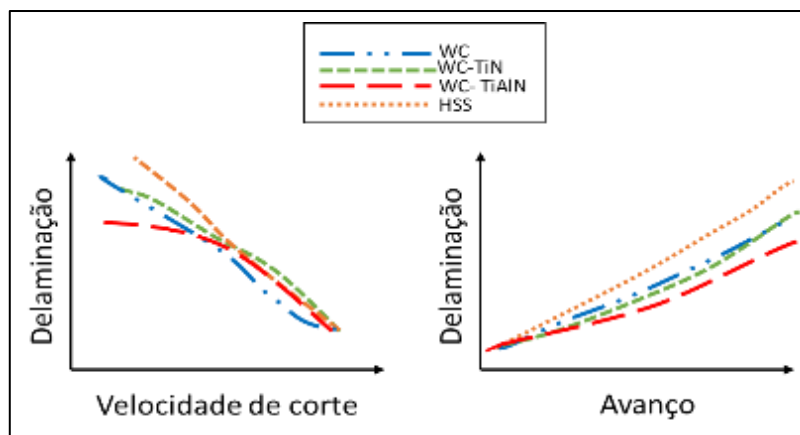
Fonte: Che et al. (2014)

Che et al. (2014) constataram também que 48% das pesquisas analisadas empregaram ferramentas de aço rápido, 49% ferramentas de metal duro e 3% ferramentas diamantadas. Em muitos casos foram utilizadas ferramentas revestidas, visando uma melhoria no desempenho, como na resistência à abrasão.

Existem diversos tipos de revestimentos para as ferramentas de corte, como nitreto de titânio (TiN), nitreto de titânio e carbono (TiCN), nitreto de titânio e alumínio (TiAlN) e diamante (DLC - diamond-like-carbon) (HOCHENG, 2012). Comparando as ferramentas de HSS com as WC (Figura 16), constata-se que as melhores brocas são as de metal duro revestidas, sendo o recobrimento mais indicado para a usinagem de compósitos reforçados com fibras o TiAlN (AMEUR et al., 2017; RAMESH; PALANIKUMAR; REDDY, 2014; SHUNMUGESH; KAVAN, 2017). Estudos mostram que a utilização de recobrimentos ajuda a prolongar a vida da

ferramenta de corte, conseqüentemente, diminui o fator delaminação. Porém para que isso ocorra é necessário a correta seleção do recobrimento.

Figura 16- Influência do material da ferramenta na delaminação



Fonte: Autoria própria

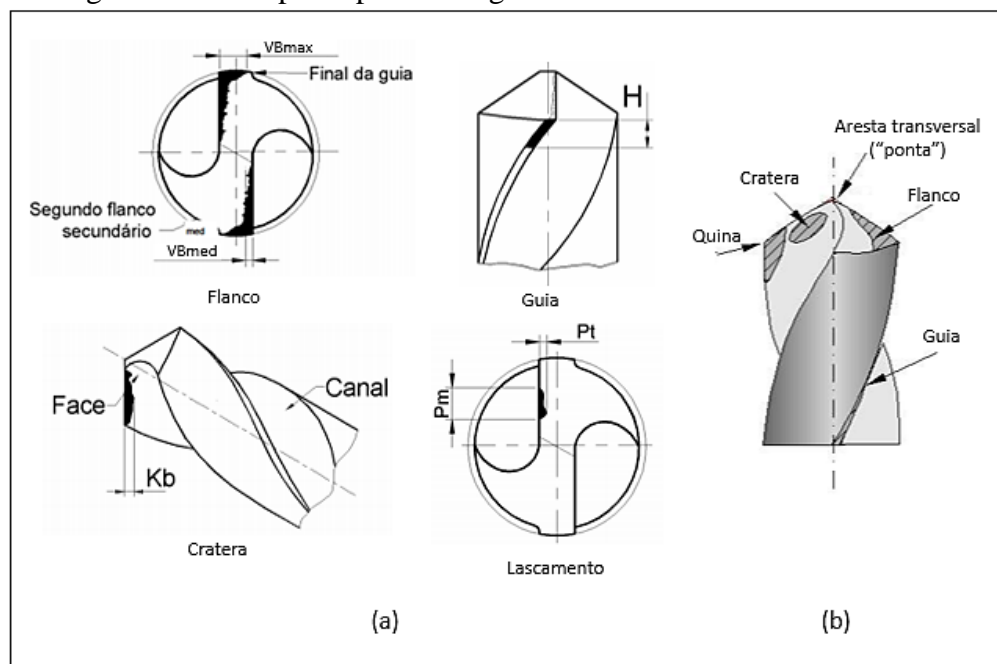
3.5.2.2 Desgaste da ferramenta de corte

O desgaste da ferramenta de corte é um processo gradual, que depende de diversos fatores como dos materiais da ferramenta e da peça, geometria da ferramenta, parâmetros de usinagem, fluidos de corte, das características da máquina-ferramenta, dentre outros (DAVIM, 2012; DE VOS; STÅHL, 2014; KALPAKJIAN; SCHMID, 2009). O desgaste da ferramenta afeta negativamente a qualidade superficial da peça, bem como os parâmetros dimensionais e, conseqüentemente, os custos operacionais (FENNELL et al., 1996; KALPAKJIAN, 2007; KALPAKJIAN; SCHMID, 2009; MACHADO et al., 2009).

Em função das condições de corte, a ferramenta fica sujeita a uma combinação de vários fatores de origem térmica, mecânica, química e abrasiva (elevada pressão de contato entre peça/ferramenta/cavaco). Devido ao fato de tanto o material da peça quanto o da ferramenta não serem homogêneos, desgastes e avarias de naturezas distintas podem ser observados na ferramenta durante o seu uso. Em decorrência de tais solicitações, a deterioração da mesma torna-se relativamente rápida (DE VOS; STÅHL, 2014; KALPAKJIAN; SCHMID, 2009).

De acordo com Bork (1995) e Stephenson e Agapiou (2006), os desgastes e avarias que ocorrem nas brocas podem ser os mesmos ocorridos em fresas ou pastilhas, como o desgaste de cratera, de flanco, entalhe, quebra e lascamento além dos característicos das brocas como desgaste da aresta transversal, de quina e de guia (Figura 17).

Figura 17- Principais tipos de desgaste e avarias em brocas helicoidais



Fonte: Adaptado de (a) Bork (1995) e (b) Stoeterau e Weingaertner (2004)

Existem diversas formas de identificar o "fim-de-vida" de uma ferramenta, entre elas a qualidade superficial da peça usinada; do aumento da força de corte, da potência consumida, do torque, da força de avanço, dos ruídos considerados anormais, das vibrações excessivas, do superaquecimento da aresta corte, dentre outros (MOCELLIN, 2002). No caso dos laminados, uma das formas de detectar o desgaste das ferramentas de corte é a delaminação gerada pelo processo.

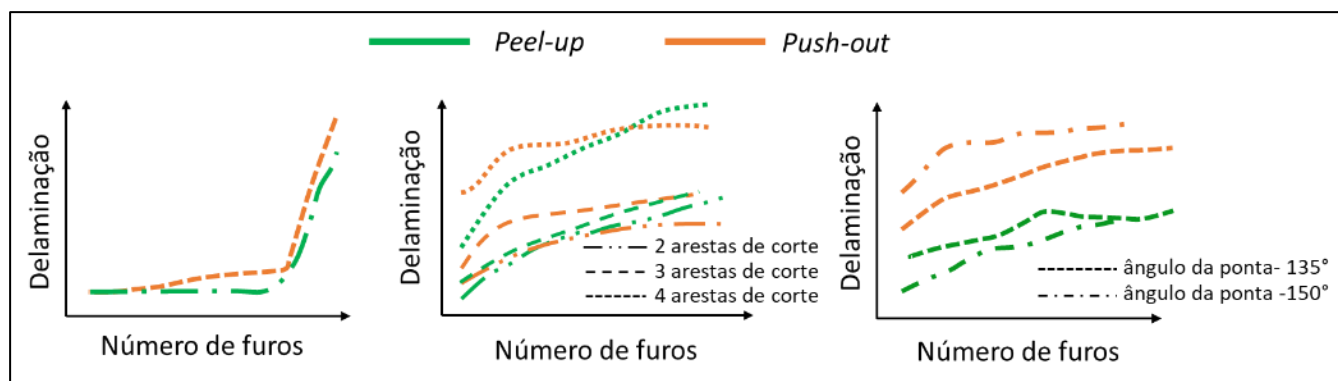
Estudos mostram que com o aumento do desgaste há o aumento da delaminação (Figura 18), sendo que em geral, o aumento da delaminação começa a ocorrer a partir do 30° furo (FARAZ; BIERMANN; WEINERT, 2009; KRISHNARAJ et al., 2012; LIU; TANG; CONG, 2012).

Segundo Faraz, Biermann e Weinert (2009) é possível analisar essa delaminação em função do número de arestas e ângulo da ponta, e assim, minimizar a delaminação, tanto para a entrada como para a saída da broca. De forma geral, o desgaste da broca afeta mais a delaminação *push-out* (KRISHNARAJ et al., 2012).

Ao analisar a delaminação em função do número de aresta de corte, observa-se que a *peel-up* inicialmente apresenta menor delaminação que a *push-out*, mas à medida que o número de furos aumenta, a *push-out* passa a ter menor delaminação. Além disso, nota-se que as brocas com duas e com três arestas de corte possuem resultados semelhantes na *peel-up*. Observou-se que, a broca com quatro aresta foi a que apresentou maior delaminação e a com duas arestas menor

delaminação. Já para os diferentes ângulos da ponta a *push-out*, apresenta maior delaminação, sendo que para a entrada o melhor é ângulo da ponta maior e para a saída ângulo da ponta menor.

Figura 18- Delaminação em função do número de furos



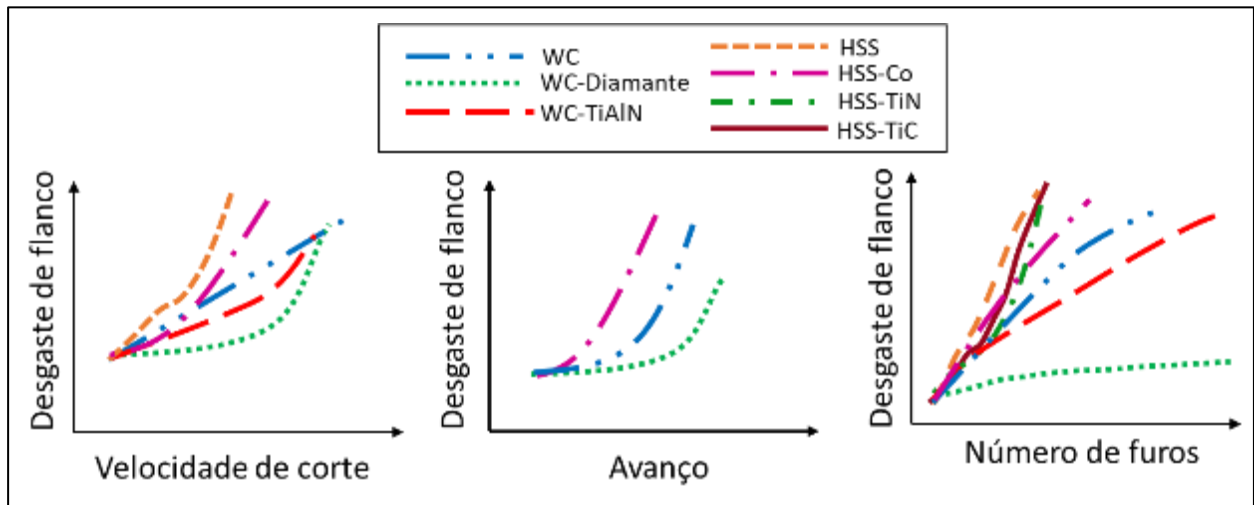
Fonte: Autoria própria

Existem diversos tipos de desgaste, mas para a usinagem de compósitos o principal é o desgaste de flanco, o qual é influenciado principalmente pelo avanço, rotação, tipo de recobrimento e geometria da broca (ARUL; VIJAYARAGHAVAN; MALHOTRA, 2007; KUO; WANG; KO, 2018; LEI et al., 2013; RAMIREZ et al., 2014; WANG et al., 2013).

Estudos mostram que com o aumento da velocidade de corte, há um aumento do desgaste de flanco (Figura 19), sendo que as brocas de HSS desgastam mais rápido que as de WC (HOCHENG, 2012; KUO; WANG; KO, 2018; LIU; TANG; CONG, 2012; RAWAT; ATTIA, 2009b; VELAYUDHAM; KRISHNAMURTHY; SOUNDARAPANDIAN, 2005). Assim como na rotação, com o aumento do avanço o desgaste também aumenta, independentemente do tipo do material da ferramenta utilizada (KIM; RAMULU, 2004; SHYHA et al., 2010; VELAYUDHAM; KRISHNAMURTHY; SOUNDARAPANDIAN, 2005).

Quando analisado o desgaste de flanco em função do número de furos usinados (Figura 19), constata-se que as brocas diamantadas são que menos desgastam. Já quando analisadas as brocas de metal duro e de HSS, sem e com recobrimento, observa-se que nos primeiros furos não há uma grande diferença entre elas, mas à medida que o número de furos aumenta as de HSS tendem a sofrer um desgaste prematuro (ARUL et al., 2006a; KIM; RAMULU, 2004; LEI et al., 2013; MURPHY; BYRNE; GILCHRIST, 2002; PARK et al., 2011; RAMKUMAR; MALHOTRA; KRISHNAMURTHY, 2002; TETI, 2002; WANG et al., 2013).

Figura 19- Desgaste de flanco em função da velocidade de corte, avanço e número de furos

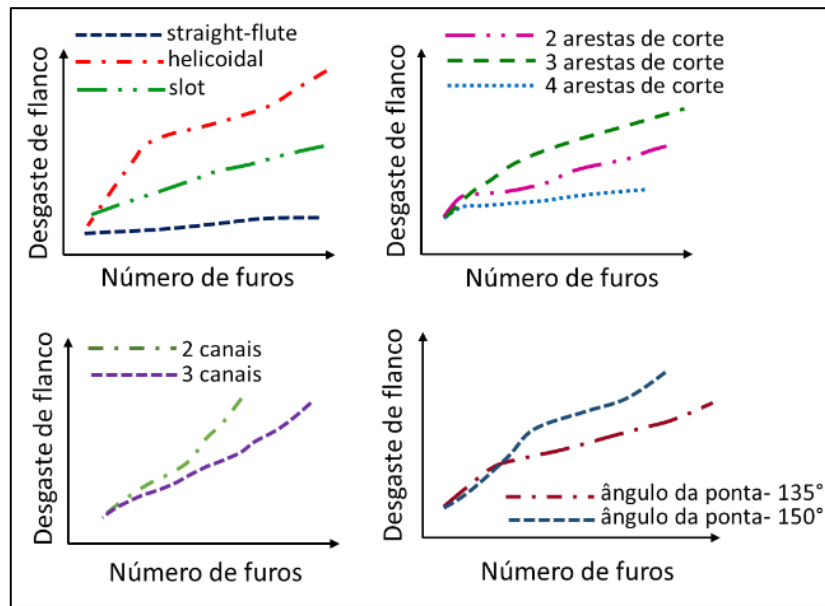


Fonte: Autoria própria

Outros fatores que influenciam no desgaste de flanco são o perfil geométrico da broca, o número de arestas e o ângulo da ponta (Figura 20). De acordo com Liu, Tang e Cong (2012) e Raj e Karunamoorthy (RAJ; KARUNAMOORTHY, 2016) a combinação do perfil geométrico com o material do revestimento broca determinará a taxa de desgaste, pois dependendo do perfil a broca não é capaz de suportar a força de impacto ao atingir a peça de trabalho, a força de avanço e de corte pode ser excessivas, e o material do revestimento pode não ser resistente a abrasão.

Ramkumar, Malhotra e Krishnamurthy (2004) e Faraz, Biermann e Weinert (2009) citam que além do perfil geométrico deve ser considerado a quantidade de arestas de corte e canais, bem como o ângulo da ponta da ferramenta. Quando considerado esses fatores, observa-se que o aumento do número de arestas de corte e de canais diminui o desgaste. Com relação ao ângulo da ponta, nota-se que menores ângulos resultam em menor desgaste.

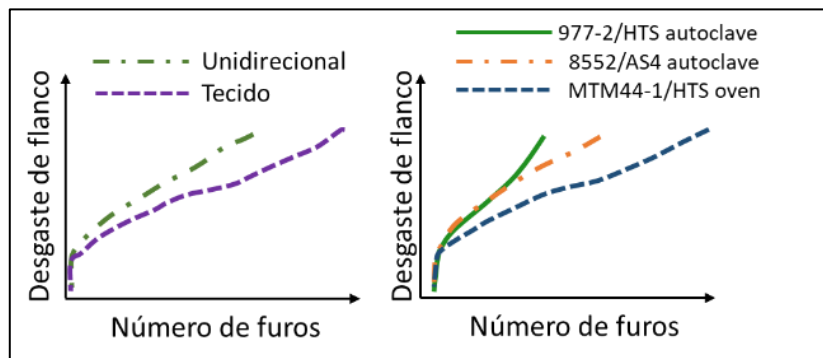
Figura 20- Influencia do número de furos no desgaste de flanco, considerando características da brocas



Fonte: Autoria própria

De forma geral, constata-se que o desgaste de flanco depende de várias características da ferramenta de corte utilizada e dos parâmetros de corte empregados. Entretanto, segundo Shyha et al. (2010), apesar de não ser muito estudado o material que será usinado também influenciará no desgaste da ferramenta (Figura 21). Para os autores a forma como o material é produzido e a tramação do reforço utilizado podem acarretar em mais ou menos desgaste de flanco. Os autores citam que a utilização de fibras unidirecionais causa mais dano à broca, assim como os laminados produzidos em autoclave.

Figura 21- Influencia do número de furos no desgaste de flanco, considerando características dos compósitos



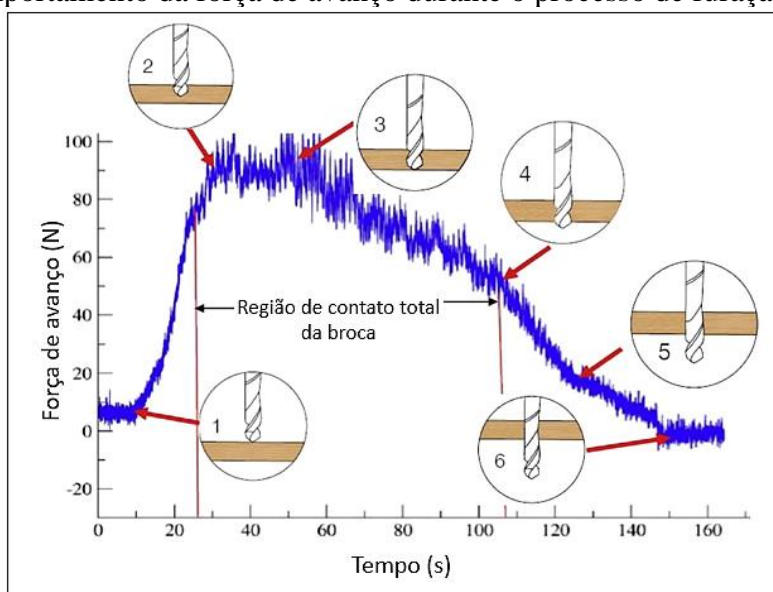
Fonte: Autoria própria

3.5.2.3 Força de avanço

A força de avanço, também chamada de força axial na furação, é um dos principais índices para descrever a usinabilidade dos laminados, pois afeta diretamente a qualidade dos furos, especialmente a delaminação do material (KHASHABA et al., 2010a; LIU; TANG; CONG, 2012; OJO et al., 2017; SAOUDI et al., 2016). Qiu et al. (2018a) define a força de avanço como uma combinação de forças, sendo que para uma broca helicoidal, a força da ponta da broca comprime o material compósito e a força da aresta de corte principal corta o material compósito.

Segundo Teti (2002), Khashaba (2013) e Ismail et al. (2016), o comportamento da força de avanço durante o processo de furação convencional de materiais compósitos é dividido em seis estágios distintos (Figura 22).

Figura 22- Comportamento da força de avanço durante o processo de furação em compósitos



Fonte: Adaptado de Ismail et al. (2016)

O primeiro estágio é identificado com aumento acentuado da força de avanço devido à penetração inicial da ponta de corte da broca, seguido de um leve aumento da força, o qual é resultante do contato da segunda aresta de corte no material. Nesse estágio ocorre a delaminação do tipo *peel-up*, devido ao aumento rápido da força e da temperatura na interface compósito/ferramenta (ISMAIL et al., 2016; KHASHABA, 2013; TETI, 2002).

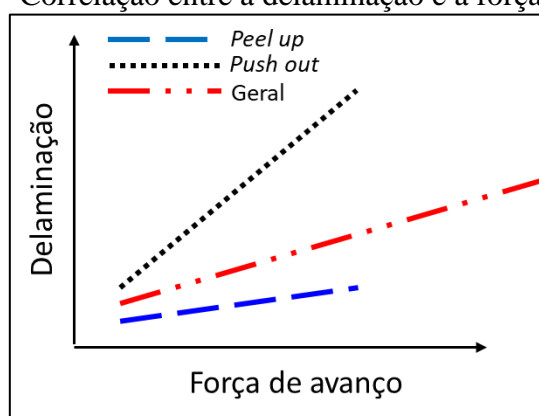
O segundo estágio ocorre durante o processo de corte, a partir do momento que a segunda aresta de corte penetra totalmente no material, resultando em um leve aumento da força de avanço. É nesse estágio que se inicia-se o processo de furação em cheio, concomitantemente com um aumento da taxa de remoção de material na forma de cavaco (ISMAIL et al., 2016).

O terceiro estágio é crucial durante a operação de usinagem, pois determinará a qualidade dos furos, visto que é nele que ocorre a força máxima na ponta da broca. Essa força ocorre quando a ponta da broca inicia o corte da última camada do laminado forçando a camada para baixo, o que pode acarretar na delaminação *push-out* (ISMAIL et al., 2016; KHASHABA, 2013; TETI, 2002).

Imediatamente após o terceiro estágio, a força de avanço decresce de maneira acentuada, caracterizando o quarto estágio, no qual a ponta da broca já penetrou totalmente a última camada e realiza o corte do material. Já o quinto estágio inicia quando as arestas de corte já atravessaram totalmente o material, conseqüentemente, há a redução gradual da força de avanço. E o sexto e último estágio, é onde não ocorre mais corte efetivo de material, reduzindo a força de avanço a zero (ISMAIL et al., 2016; KHASHABA, 2013; TETI, 2002).

Devido à grande influência da força de avanço sobre a delaminação, várias pesquisas foram desenvolvidas para compreender essa complexa relação entre a força axial e a delaminação (Figura 23), e conseqüentemente, encontrar o valor onde a força crítica ocorre, bem como determinar um valor no qual a delaminação decorrente do processo de furação seria minimizada ou até mesmo anulada (ABHISHEK; DATTA; MAHAPATRA, 2014; BONNET et al., 2015; DAVIM; REIS; ANTÓNIO, 2004; FARAZ; BIERMANN; WEINERT, 2009; HOCHENG; TSAO, 2005; KHASHABA et al., 2010a; KRISHNARAJ et al., 2012; LEE; GE; SONG, 2021; OJO et al., 2017; PIQUET et al., 2000; SAOUDI et al., 2016; XU et al., 2019c; ZENIA et al., 2015).

Figura 23- Correlação entre a delaminação e a força de avanço



Fonte: Autoria própria

O fator que mais influência na força de avanço é o avanço, sendo que a medida que se aumenta o avanço há o aumento da força de avanço (Figura 24) (ABDUL NASIR et al., 2018; ABISH et al., 2018; ABRÃO et al., 2008; ANAND et al., 2018; EL-SONBATY; KHASHABA; MACHALY, 2004; KHASHABA, 2004; KHASHABA et al., 2010a; QIU et al., 2018a; SINGH; BHATNAGAR; VISWANATH, 2008; SORRENTINO; TURCHETTA; BELLINI, 2018; XU et

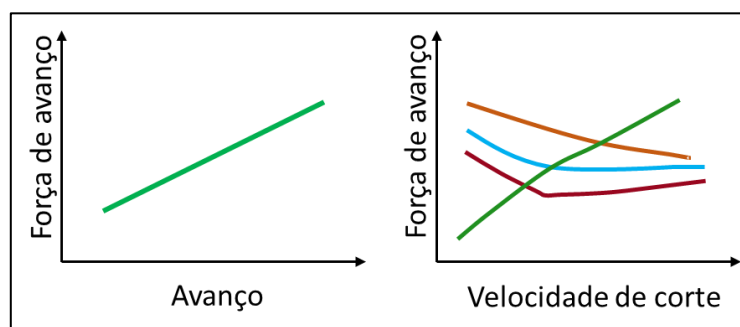
al., 2019c). De acordo com Geier e Szalay (2017) isso ocorre porque o aumento do avanço causa um aumento na seção transversal de corte, e portanto, a força axial também aumenta.

A velocidade de corte é outro parâmetro de usinagem que pode influenciar na força de avanço, entretanto, estudos mostram uma variedade de resultados (Figura 24). Em geral, o aumento da rotação resulta no aumento da força de avanço (ABRÃO et al., 2008; BONNET et al., 2015; HEISEL; PFEIFROTH, 2012; KHASHABA, 2004; QIU et al., 2018a; SORRENTINO; TURCHETTA; BELLINI, 2018; TSAO, 2008b; ZITOUNE; COLLOMBET, 2007). Porém para El-Sonbaty, Khashaba e Machaly (2004), Velayudham, Krishnamurthy e Soundarapandian (2005), Tsao (2008c) Liu et al. (2010), Geier e Szalay (2017), Kumar e Sing (2017) e Raja e Jannet (2017) o aumento da rotação resulta na diminuição da força de avanço.

El-Sonbaty, Khashaba e Machaly (2004) citam que essa queda muitas vezes pode ser pequena, e que são recorrentes para baixos avanços. À medida que se aumenta o avanço a rotação passa a não ter influência no comportamento da força de avanço, e o perfil fica quase que linear. Abish et al. (2018) relatam que nas condições que estudaram, a rotação não apresentou influencia na força de avanço. Essas diferenças podem estar relacionadas com o avanço que cada pesquisador utilizou, pois segundo Khashaba (2010a, 2010b), dependendo do avanço empregado o comportamento da rotação irá ser diferente.

Arul et al. (2006a, 2006b), observaram uma combinação de resultados, sendo que em rotações mais baixas houve uma queda da força de avanço, mas à medida que a rotação foi aumentando a força de avanço teve uma leve elevação ou permaneceu quase linear, dependendo do avanço empregado. Sardiñas, Reis e Davim (2006), Singh, Bhatnagar e Viswanath (2008), Hocheng (2012) e Anand et al. (2018) também constataram uma variação dos resultados para a velocidade de corte em função do avanço utilizado, corroborando com a avaliação de que a rotação será influenciada pelo avanço utilizado.

Figura 24- Efeitos da velocidade de corte e do avanço na força de avanço

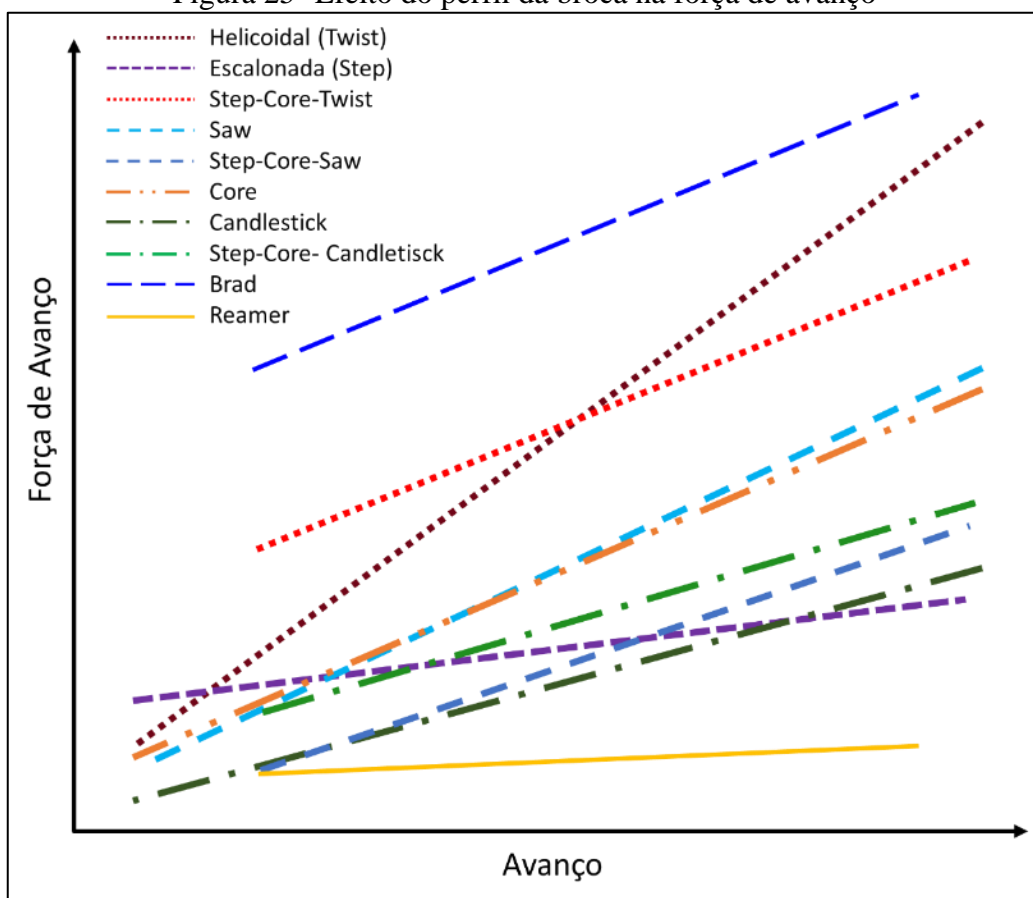


Fonte: Autoria própria

De acordo com Tsao (2008a) e Liu et al. (2012), para minimizar a força de avanço, vários estudos envolvendo o perfil geométrico da ferramenta de corte vem sendo desenvolvidos, visando a obtenção da broca ideal para a furação dos materiais compósitos (Figura 25) (DURÃO et al., 2010; FARAZ; BIERMANN; WEINERT, 2009; FEITO et al., 2015, 2016; KUMAR; SING, 2017; TSAO, 2007, 2008b, 2008a, 2008d; TSAO et al., 2010; TSAO; HOCHENG, 2003, 2004, 2007, 2016).

Hocheng e Tsao (2006), Tsao (2008d), Feito et al. (2015), Feito et al. (2016) e Gemi et al. (2019) verificaram a influência do perfil da broca na força de avanço. Os autores constataram que independente do perfil utilizado o aumento do avanço faz com que a força de avanço aumente. Segundo Aamir et al. (2019) apesar de haverem estudo com diversos perfis, vários trabalhos recomendam o uso da broca helicoidal, pois segundo o autor, representam um padrão industrial e fornecem menor força de empuxo com melhor qualidade de furo. Isso pode ser devido ao fato quem em baixos avanços (0.03 - 0.05mm/ver) a força de avanço da maior parte dos perfis estudados é próxima de 20N.

Figura 25- Efeito do perfil da broca na força de avanço

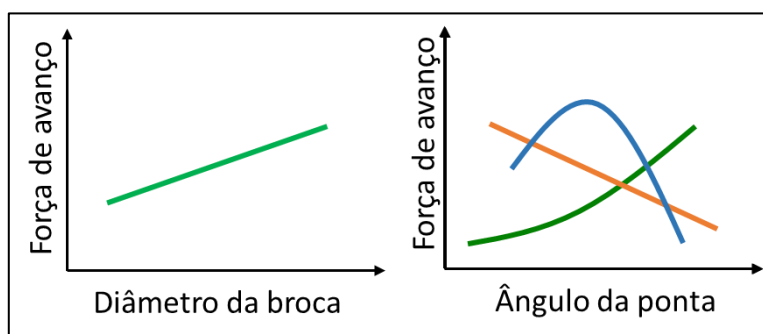


Fonte: Autoria própria

Com relação a geometria da broca, outro fator que influencia na força de avanço é o diâmetro da broca (Figura 26). Estudos mostram que quanto maior o diâmetro maior será a força de avanço (BASMACHI et al., 2017; KHASHABA et al., 2010a; MOHAN; RAMACHANDRA; KULKARNI, 2005; TSAO, 2008c; TSAO et al., 2010). Segundo Tsao (2008d), isso se aplica independente da geometria utilizada.

Além do diâmetro, outro fator que se destaca é o ângulo da ponta (Figura 26). Singh, Bhatnagar e Viswanath (2008), Heisel e Pfeifroth (2012), Bonnet et al. (2015) e Feito et al. (2016) citam que a medida que se aumenta o ângulo da ponta há um aumento da força de avanço. Bonnet et al. (2015) complementam que ao aumentar o ângulo da ponta de 90° para 140° , a força de avanço linear aumenta em 75%. Já para Durão et al. (2010) o aumento do ângulo da ponta proporciona uma diminuição da força de avanço. Campos Rubio et al. (2013) constataram uma combinação desses resultados. Essa diferença entre os resultados pode estar relacionada com o avanço e rotação utilizados, bem como, com o diâmetro das brocas empregadas.

Figura 26- Efeito do diâmetro e do ângulo da ponta na força de avanço



Fonte: Autoria própria

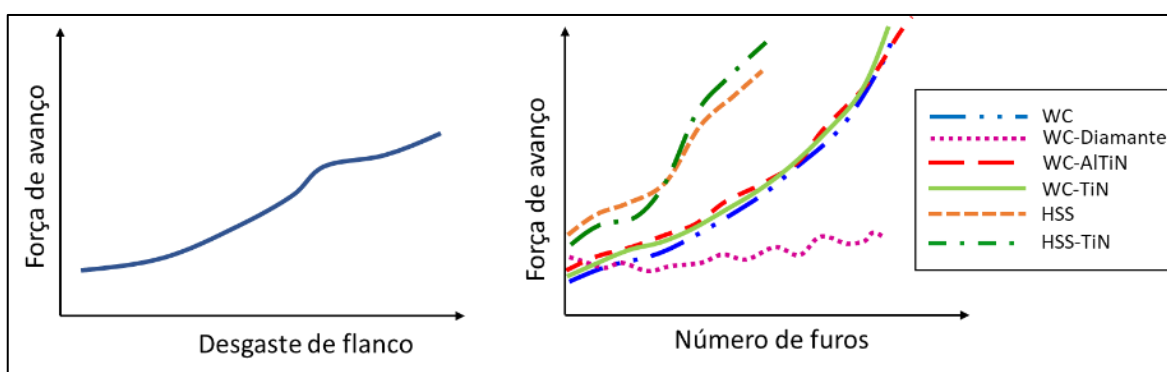
As diferenças encontradas nos estudos abordando rotação e ângulo da ponta podem estar relacionadas como o material da ferramenta, bem como, com o desgaste que as mesmas sofreram durante o processo de furação (Figura 27) (AMEUR et al., 2017; ARUL; VIJAYARAGHAVAN; MALHOTRA, 2007; FERNÁNDEZ-PÉREZ et al., 2021; HOCHENG, 2012).

Fernández-Pérez et al. (2021) citam que para uma ferramenta nova a influência dos parâmetros de corte é reduzida, em comparação com ferramentas já desgastadas. Além disso, as variações da força de avanço no início da vida da ferramenta são menores que 5%, em relação ao incremento produzido pelo desgaste da ferramenta. Os autores complementam que para as ferramentas novas a força de avanço permanece estacionária por um tempo e assim que o desgaste

começa a força de avanço aumenta, visto que o desgaste gera uma modificação da geometria de corte.

Com relação ao material da ferramenta de corte (Figura 27), estudos mostram que as brocas de aço rápido geram maiores forças de avanço que as de WC. Já as ferramentas de metal duro sem e com recobrimento apresentam comportamento semelhante entre si, com exceção das recobertas com diamante, as quais apesar de gerarem uma força de avanço inicial maior, possuem um padrão mais constante em função do número de furos (ARUL et al., 2006a; FARAZ; BIERMANN; WEINERT, 2009; FARIA et al., 2008; FERNÁNDEZ-PÉREZ et al., 2021; MURPHY; BYRNE; GILCHRIST, 2002; WANG et al., 2013). De forma geral, as ferramentas de metal duro propiciam a realização de mais furos do que as de HSS, antes da força de avanço aumentar, e além disso, não há muita diferença entre os recobrimentos, com exceção do diamante.

Figura 27- Efeito do desgaste na força de avanço



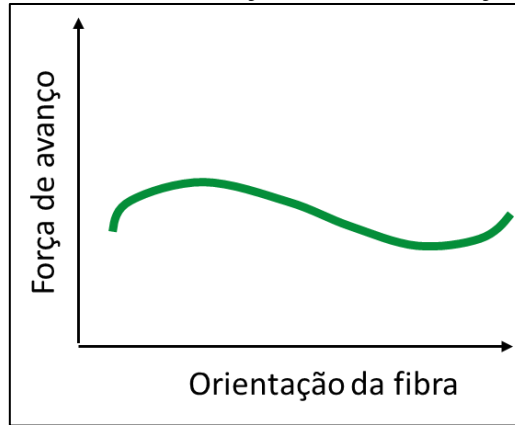
Fonte: Autoria própria

Teti (2002) e Lee, Ge e Song (2021) citam que o desgaste da ferramenta, e conseqüentemente a força de avanço, estão atrelados o tipo de reforço utilizado na fabricação do laminado. Para os compósitos poliméricos reforçados com fibras de carbono e vidro, onde as fibras possuem dureza e a abrasividade que resulta em maior desgaste da ferramenta, na hora de selecionar a ferramenta de corte o fator principal para a escolha deverá ser o material da ferramenta. Já no caso dos compósitos reforçados com fibras de aramida a geometria é o mais importante (TETI, 2002).

Além do tipo de reforço, outro fator relacionado com o compósito que afeta a força de avanço é a orientação das fibras. Estudos mostraram que dependendo da orientação das fibras a força de avanço pode aumentar ou diminuir (Figura 28), sendo possível observar um perfil oscilatório, sendo que próximo a 50° a força eleva-se e próximo a 100° a força diminui (HOCHENG, 2012;

MKADDEM; DEMIRCI; MANSORI, 2008; NAYAK; BHATNAGAR; MAHAJAN, 2005b, 2005a; SHYHA et al., 2010).

Figura 28- Efeito da orientação da fibra na força de avanço



Fonte: Autoria própria

Diversos autores propuseram fórmulas matemáticas para o cálculo da força de avanço (Quadro 4). Entretanto, todas necessitam de um coeficiente relacionado ao material de trabalho, o qual em geral, foi determinado somente para alguns materiais metálicos.

Quadro 4 - Fórmulas matemáticas para o cálculo da força de avanço

Fórmula	Considerações	Ref.
$F_f \cong 0,63 * \frac{D}{2} * f * k_c * \sin k_r$	k_c = pressão específica	(SECO TOOLS, 2018a)
$F_f \cong 0,5 * k_c * \frac{D_c}{2} * f_n * \sin k_r$	k_r = ângulo de posição	(SANDVIK COROMANT, 2017)
$F_a = z * \frac{D}{2} * k_{f1.1} * \frac{f^{(1-mf)}}{z}$	z = nº de aresta de corte $k_{f1.1}$ = força específica de avanço $1 - mf$ = constante do material	(JASINEVICIUS, 2019; KENNAMETAL, 2020)
$F_f = C_2 * D^{x2} * f^{y2}$	$C_2, x2$ e $y2$ são coeficientes relacionadas ao material de trabalho	(DINIZ; MARCONDE; COPPINI, 2013; JASINEVICIUS, 2019)

Além das formulas gerais para a determinação da força de avanço, trabalhos abordando a furação de compósitos desenvolveram propostas de como realizar os cálculos da força crítica, em função de vários perfis geométricos. Entretanto não são todos os perfis que possuem fórmulas para o cálculo analítico.

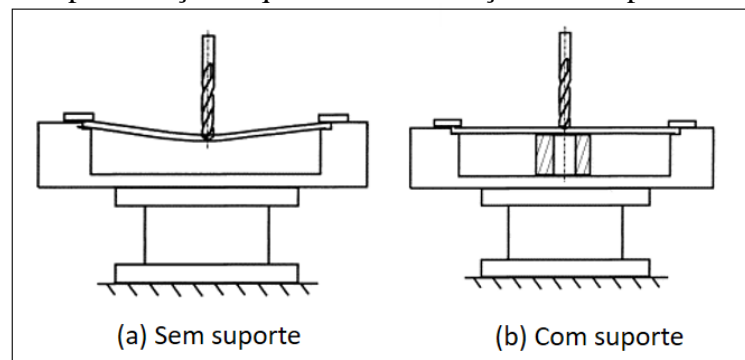
3.5.2.4 Uso de suporte

De acordo com Capello (2004) e Liu et al. (2012) outro fator que influencia na delaminação dos compósitos durante o processo de furação é a utilização, ou não, de suportes (Figura 29).

Tsao e Hocheng (2005) citam que o suporte (*backup plate supports*) apoia as últimas lâminas e evita que as deformações gerem delaminações *pull-out*. Dessa maneira tanto o valor da força de avanço crítica como o do avanço podem ser maiores e ainda há a segurança de um processo de furação quase sem delaminações.

Na furação sem suporte, o mecanismo de delaminação é mais complexo, com a presença de um pico na força de avanço e a sobrecarga na parte periférica da aresta de corte (CAPELLO, 2004; DAVIM; RUBIO; ABRÃO, 2007). Segundo Capello (2004) isso ocorre porque na furação sem apoio há uma variação da velocidade de avanço, pois como a peça está livre para fletir há a variação da velocidade de avanço, sendo que no início os valores são muito baixos e no final muito altos.

Figura 29- Representação esquemática da furação com suporte e sem suporte

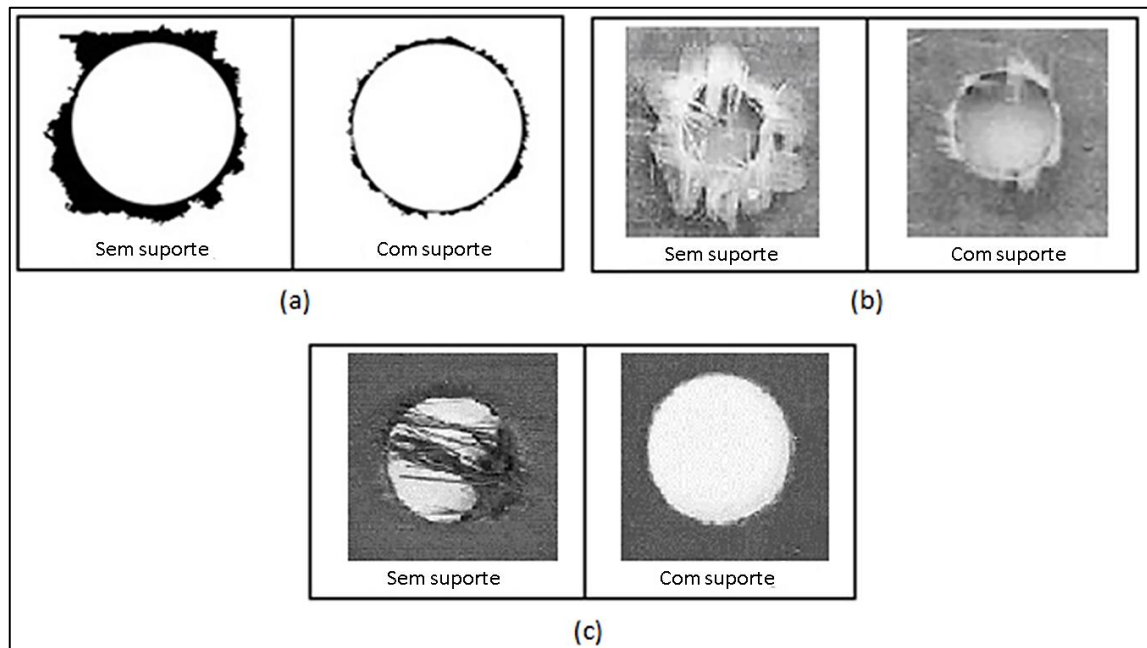


Fonte: Adaptado de Capello (2004)

Estudo realizados para verificar a diferença da furação sem e com suporte (Figura 30) constataram que a furação sem suporte gerou uma grande quantidade de fibras não cortadas e grande regiões delaminadas. Já nos processos executados com o auxílio do suporte os danos ocorridos foram menores (TSAO; HOCHENG; CHEN, 2012; TSAO; HOCHENG, 2005c). Tsao and Hocheng (2005) citam que devido a essa diferença na qualidade dos furos o uso de suporte já é uma prática comumente seguida na indústria. Porém alguns estudos tentam aprimorar esse uso.

Em geral, Tsao e Hocheng (2005c), citam que a delaminação pode ser efetivamente reduzida ou eliminada pela desaceleração da velocidade de avanço conforme ela se aproxima da saída e pelo uso de suportes, visando recuar e contrabalançar a deflexão do laminado. Porém, destaca-se que não se sabe exatamente como funciona esse mecanismo.

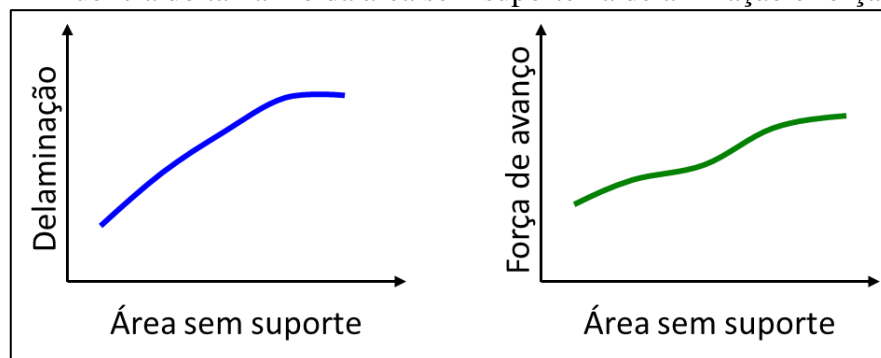
Figura 30- Delaminação dos furos com e sem a utilização do suporte



Fonte: Adaptado de (a) Tsao; Hocheng e Chen (2012), (b) Capello (2004) e (c) Tsao; Hocheng (2005c)

Capello (2004) e Tsao, Hocheng e Chen (2012) citam que para baixos avanços a distância entre os suportes não influencia tanto quanto para altos avanços. Feito et al. (2018) complementam que a utilização de menores distâncias entre os apoios do suporte auxilia na redução da força de avanço, pois segundo os seus estudos o incremento da área não apoiada resulta no incremento da força de avanço durante a furação (Figura 31).

Figura 31- Influência do tamanho da área sem suporte na delaminação e força de avanço

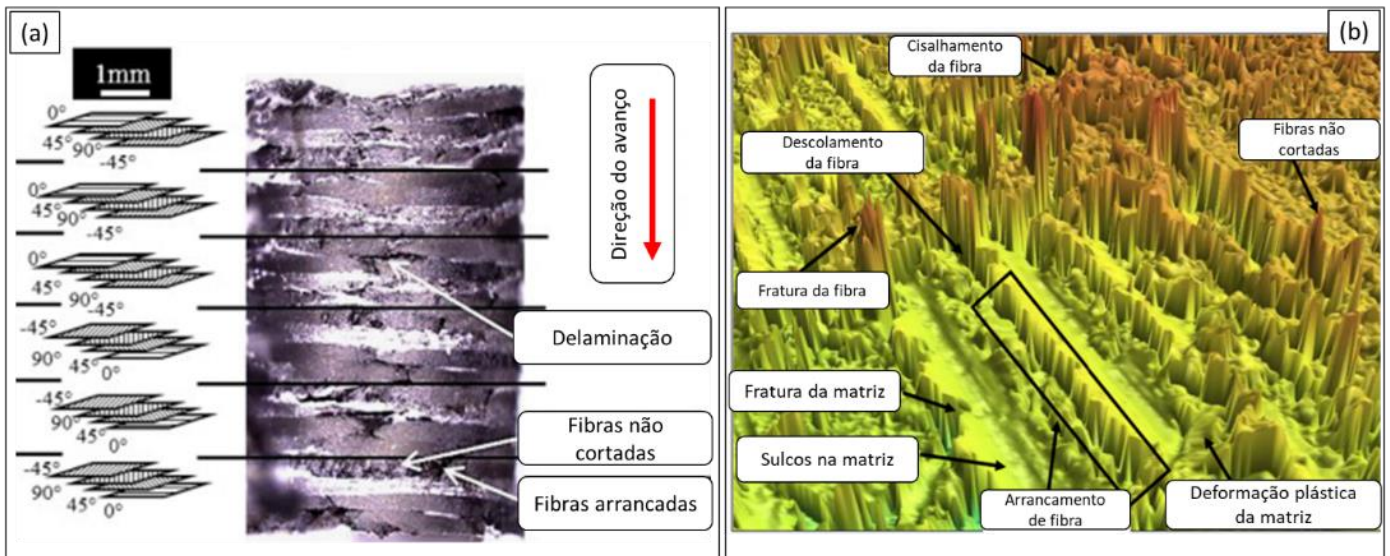


Fonte: Autoria própria

3.5.3 Danos internos

De forma geral, o maior número de pesquisa sobre a delaminação dos furos se concentra na entrada e saída da broca, entretanto no “corpo do furo” também há danos e delaminação decorrente do processo de furação (Figura 32)

Figura 32- Danos internos dos furos



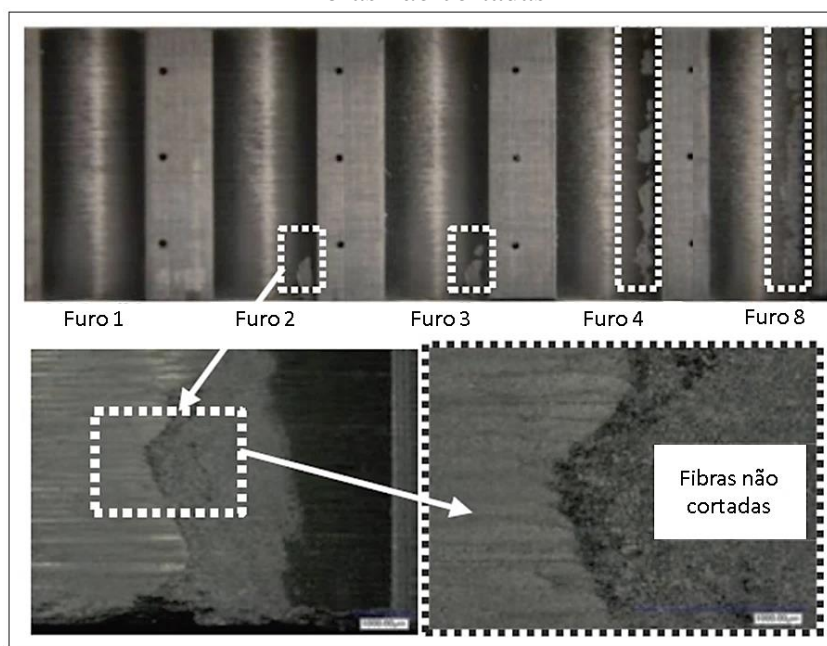
Fonte: Adaptado de (a) Turki et al. (TURKI et al., 2014) e (b) Pervaiz et al. (2020)

Ramirez et al. (2014) e Poulachon et al. (2016) estudaram o perfil de danos causados no interior do furos, à medida que o desgaste da ferramenta de corte aumenta. De forma geral, constataram que à medida que se realizam os furos há um aumento da quantidade de fibras não cortadas, devido ao aumento do desgaste da ferramenta (Figura 33).

Segundo Poulachon et al. (2016) até o terceiro furo a quantidade de fibras não cortadas é insignificante e então aumenta até 20% da superfície total do furo. Os autores citam que no início a um padrão regular das fibras não cortadas, e depois o corte das fibras é irregular. Isso ocorre devido às modificações na geometria da broca, decorrentes do desgaste da ferramenta.

Os autores ainda complementam que para baixos desgastes o que influencia na distribuição das fibras não cortadas é a orientação das fibras. E quando o desgaste da ferramenta se torna significativo, a distribuição das fibras não cortadas é menos dependente da orientação da fibra, e portanto, obtêm-se uma distribuição aleatória das fibra não cortada.

Figura 33- Dano no interior dos furos ao longo da direção axial, sendo a zona tracejada a de fibras não cortadas



Fonte: Adaptado de Poulachon et al. (2016)

Qiu et al. (2018b) analisaram como a orientação das fibras influencia na qualidade da superfície usinada, sendo que o ângulo de corte da fibra (θ) é definido como o ângulo entre a orientação da fibra e a direção da velocidade de corte.

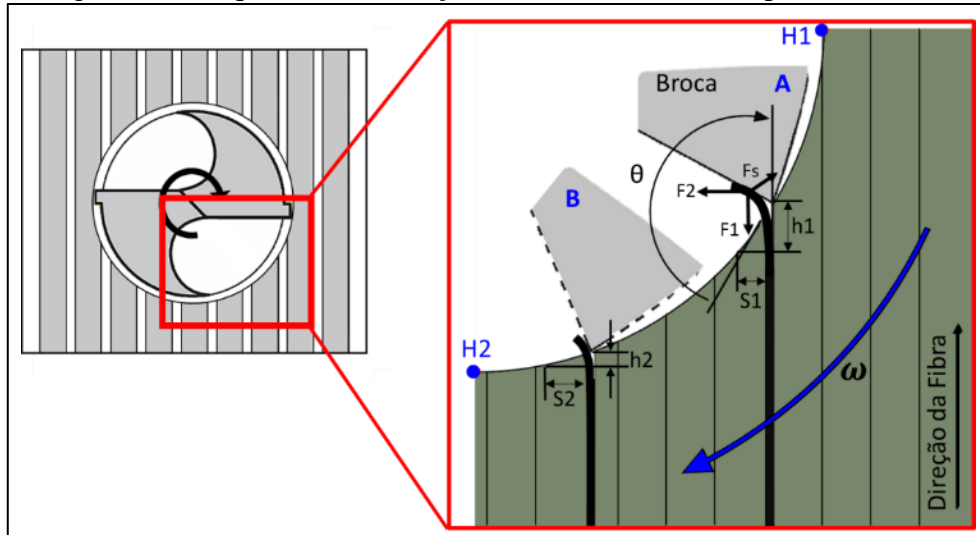
Os autores constataram que $\theta = 0^\circ - 90^\circ$ a superfície usinada apresenta uma qualidade melhor do que $\theta = 90^\circ - 180^\circ$. Além disso, observaram que a área de dano se distribui na parede do furo quando $\theta = 120^\circ - 150^\circ$, sendo que o grau de dano enfraquece ao longo da direção de rotação da ferramenta. Os autores explicam que o dano mais severo ocorre em $\theta = 150^\circ$ e então o dano vai diminuindo quando $\theta = 135^\circ$ e finalmente desaparece em $\theta = 120^\circ$.

Qiu et al. (2018b) também estudaram como θ influencia no corte das fibras. Para eles quando $\theta = 0^\circ - 90^\circ$ a fibra se rompe pela ação de cisalhamento, resultando numa superfície de alta qualidade. Já quando θ está na faixa de $90^\circ - 180^\circ$ as fibras se rompem devido a tensão máxima de flexão. Portanto, o ponto de ruptura não está na aresta de corte da broca, mas sim na parte inferior da aresta de corte, o que significa que nem todos os feixes de fibras serão cortados, gerando assim uma superfície áspera.

Na Figura 34 é apresentado um esquema dos danos ocorrido na parede do furo, em função da usinagem das fibras para um $\theta = 90^\circ - 180^\circ$. Quando a ferramenta gira de H1 para H2, θ muda de 180° para 90° , levando a um aumento em F2. Quando F2 atinge um determinado valor, as fibras se rompem e ocorre o dano na parede do furo. Considerando que a quantidade de fibras cortadas nas

posições A e B são as mesmas temos que $S1 = S2$, portanto, $h1$ é maior que $h2$, levando a um fenômeno de fraqueza do grau de dano ao longo da direção de rotação (QIU et al., 2018b).

Figura 34 - Esquema da formação de danos da broca de parede do furo



Fonte: Autoria própria

Além dos danos relacionados as fibras, há os danos relacionados a matriz polimérica que são causados pelo amolecimento do polímero. Esse amolecimento ocorre devido à baixa condutividade térmica dos polímeros e as altas temperaturas geradas durante o processo de usinagem (DÍAZ-ÁLVAREZ et al., 2014; DURÃO et al., 2007; XU et al., 2019c).

Xu et al. (XU et al., 2019c) citam que devido ao amolecimento da matriz, há uma adesão de resíduos do processo na superfície da parede do furo, como detritos de fibras e resina residual. Além disso, a superfície na região da matriz pode se tornar mais rugosa.

O termo “amolecimento da matriz polimérica” é muito utilizado na área mecânica, mais especificamente na usinagem de compósitos. Porém, para os polímeros termorrígidos não ocorre um amolecimento da matriz polimérica e sim uma maior flexibilização das ligações cruzadas, visto que o aumento da temperatura faz com que o polímero fique próximo da região de transição vítrea (T_g). O que gera essa ideia de que o polímero amoleceu, fazendo com que esse termo seja o mais empregado na literatura mundial. Portanto, sempre que for citado nesse trabalho amolecimento do polímero, entende-se que o material está menos rígido por estar próximo da T_g .

3.6 ERROS GEOMÉTRICOS

Cada tipo de material apresenta dificuldades inerentes às suas características, entretanto algumas dificuldades estão relacionadas com os processos que esses materiais são submetidos. No

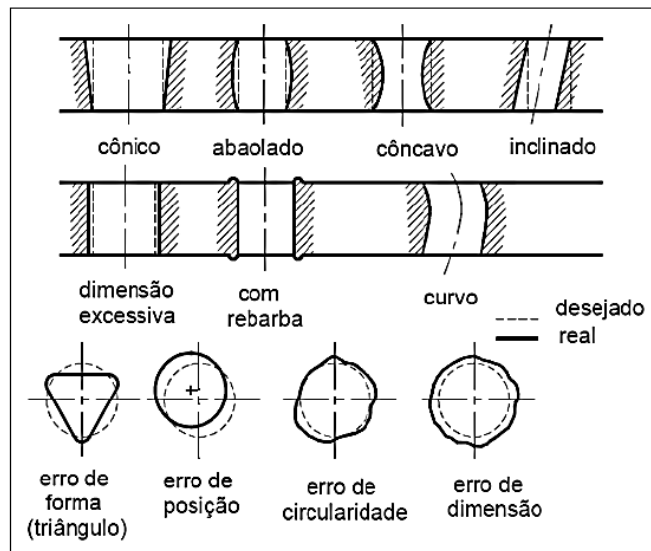
caso da furação Trent e Wright (2000) e Diniz, Marcondes e Coppini (2013) citam que um dos problemas é a saída dos cavacos de dentro do furo, pois se os cavacos não forem formados de maneira que propicie uma fácil retirada, podem provocar o entupimento do furo, aumento do torque (momento de torção) necessário e, conseqüentemente, a quebra da broca.

De acordo com Diniz, Marcondes e Coppini (2013) a quebra de uma broca dentro de um furo é um problema grave, pois além da perda da ferramenta, a sua retirada do interior do furo é uma tarefa cara e demorada que, muitas vezes, ocasiona na rejeição da peça e, considerando que um furo é normalmente um pequeno detalhe de uma peça bem maior, tal rejeição pode representar uma perda substancial.

Segundo Dallas (1976), Krishnaraj, Zitoune e Davim (2013) e Khashaba (2013), além dos danos que o processo de furação acarreta ao material em si, há outro problema que interfere na qualidade das peças furadas, que é o erro da geometria desejada.

Na Figura 35 são apresentados os principais erros de geometria, tem-se: o erro de forma (diâmetro não uniforme), de posição (deslocamento do centro do furo), de circularidade (seção circular distorcida), dimensional (diâmetro resultante diferente da broca) e de rebarbação (rebarbas na entrada ou saída do furo), ente outros. Dentre os erros geométricos apresentados, para os compósitos, os principais são os erros de dimensão e circularidade.

Figura 35- Erros comuns na geometria do furo



Fonte: Stoeterau e Weingaertner (2004)

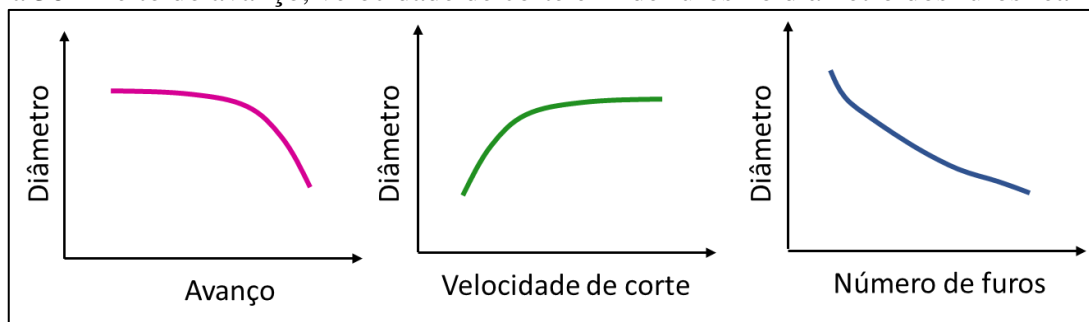
3.6.1 Erro de dimensão

Na furação de compósitos um dos maiores problemas é o erro de dimensão, pois segundo Brinksmeier e Janssen (2002) as tolerâncias dimensionais são fatores vitais de estruturas, principalmente no setor aeronáutico, que possui tolerâncias em torno de 30 μm ou valores inferiores para juntas mecânicas. Sendo assim, a variação do diâmetro do furo dificulta ou impossibilita a utilização do componente na estrutura (BONHIN et al., 2021).

Nos compósitos poliméricos, esse problema ocorre devido à expansão térmica linear dos materiais, principalmente da matriz polimérica, a dimensão final dos furos executados pode ser maior ou menor do que o esperado (DAVID-MÜZEL et al., 2020; DAVID MÜZEL; MOLINA; ALVES, 2018). Em geral, o processo de furação em compósitos poliméricos reforçados com fibras gera furos menores que o esperado. Shyha et al. (2009) relatam que os furos realizados em seus estudos possuíam um diâmetro 2,7% menor que o diâmetro da broca utilizada. Isso ocorre devido ao aumento da temperatura na área usinada.

Diversos trabalhos foram realizados utilizando diferentes materiais e brocas, para tentar compreender quais fatores afetam o erro de dimensão (Figura 36). Os estudos mostraram que quando se aumenta o avanço a tendência é diminuir o diâmetro do furo, assim como, quando há um decréscimo na velocidade de corte (KRISHNARAJ et al., 2012; SHYHA et al., 2010, 2011; XU et al., 2019c). Além disso, segundo Velayudham et al. (2005), Shyha et al. (2010) e Poulachon et al. (2016) o desgaste da broca também influencia no diâmetro do furo, sendo que quanto maior o desgaste menor é diâmetro.

Figura 36- Efeito do avanço, velocidade de corte e nº de furos no diâmetro dos furos realizados

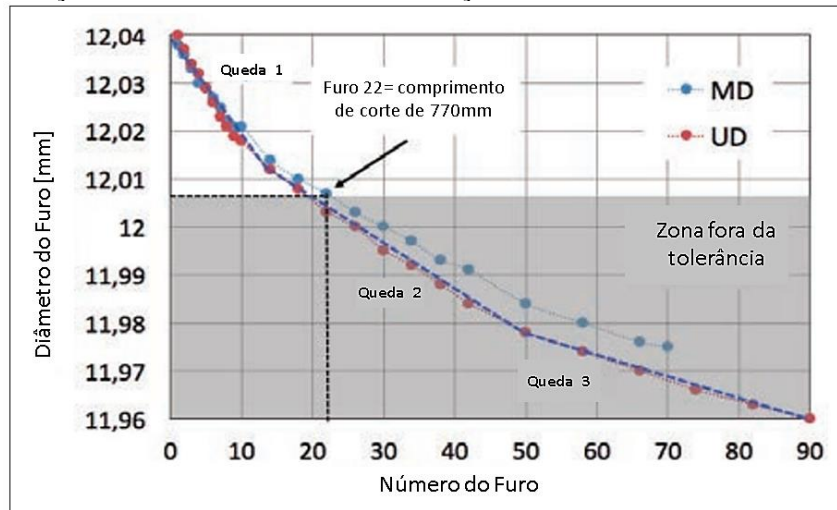


Fonte: Autoria própria

Poulachon et al. (2016) estudaram a influência da direção das fibras no diâmetro do furo. Os autores utilizaram compósitos de epóxi/fibra de carbono unidirecional (UD) e multidirecional (MD), com brocas de metal duro sem revestimento com 12 mm de diâmetro.

Os autores constataram que os primeiros 21 furos os diâmetros obtidos eram acima do nominal e acima da zona de tolerância estipulada (inferior a 12,006 mm). Já a após o 22º furo fica abaixo da zona de tolerância. Os autores atribuem essa variação do diâmetro do furo ao desgaste abrasivo da ferramenta de corte (Figura 37).

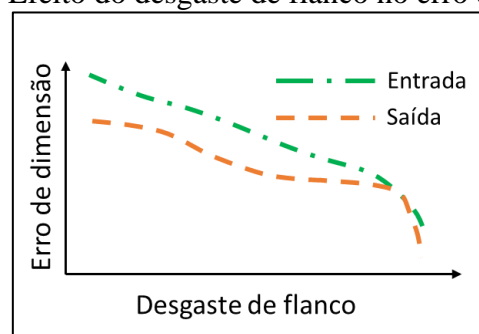
Figura 37- Diminuição do diâmetro do furo em função do número de furos realizados



Fonte: Adaptado de Poulachon et al. (2016)

Assim como os demais, Rawat e Attia (2009a) observaram em seu estudo a grande influência do desgaste da ferramenta no diâmetro final dos furos. Além disso, os autores constataram que o erro é maior na entrada da broca que na saída da broca (Figura 38).

Figura 38- Efeito do desgaste de flanco no erro de dimensão



Fonte: Autoria própria

Xu et al. (XU et al., 2019c) estudaram como a geometria da broca interfere no erro de dimensão. Os autores constataram que a *brad spur* foi a que gerou melhores resultados, enquanto que as brocas helicoidal e espada geraram furos subdimensionados e com elevado erro de dimensão. Sendo que, em geral, os parâmetros de corte só influenciaram no erro dimensional dos furos produzidos pelas brocas helicoidal e espada. Além disso, os autores observaram que houve

uma maior variação do diâmetro na saída do furo do que na entrada, devido aos graves defeitos induzidos pela furação, sendo o principal as fibras não cortadas.

David Müzel et al. (2020), buscaram alternativas para a redução do erro de dimensão, e observaram que a adição de nanotubos de carbono ao laminado pode ajudar a reduzir o erro dimensional, ou seja, a dilatação e a contração da resina aquecida durante o processo de usinagem são menores quando há a adição de CNT na matriz polimérica.

3.6.2 Erro de Circularidade

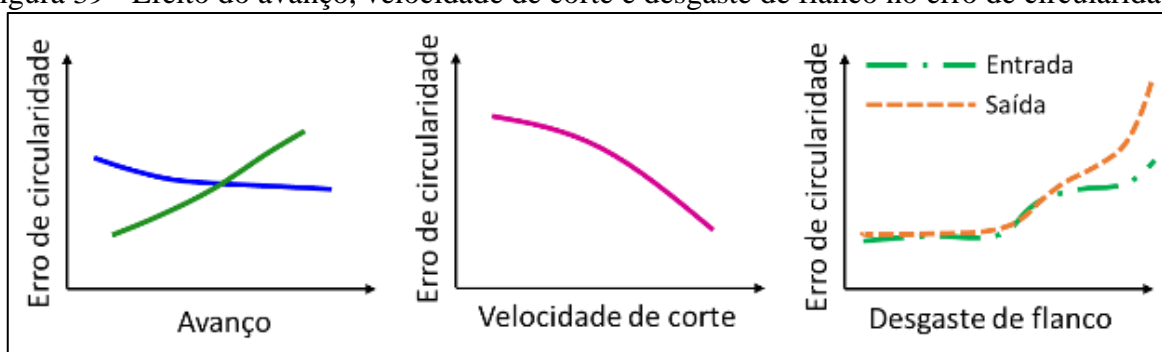
O erro de circularidade é outro erro geométrico muito recorrente nos furos realizados nos materiais compósitos, sendo que os parâmetros de corte, desgaste e material da ferramenta são os fatores que mais influenciam na circularidade (Figura 39 e 40).

Ao analisar o avanço, observa-se que esse parâmetro de corte irá depender de outros fatores, como geometria e material das ferramentas e do compósito que está sendo usinado (CAMPOS RUBIO et al., 2013; GOWDA et al., 2015; KRISHNARAJ et al., 2012; SHUNMUGESH; KAVAN, 2017; ZITOUNE; KRISHNARAJ; COLLOMBET, 2010).

Já com relação a velocidade de corte notou-se um padrão de diminuição do erro de circularidade a medida que se aumenta a rotação (CAMPOS RUBIO et al., 2013; GOWDA et al., 2015; KRISHNARAJ et al., 2012; ZITOUNE; KRISHNARAJ; COLLOMBET, 2010). Segundo Krishnaraj et al. (2012) isso ocorre porque a estabilidade rotacional da broca é melhor em velocidades mais altas que em velocidades mais baixas.

Em relação ao desgaste da ferramenta Rawat e Attia (2009a), citam que a medida que o desgaste de flanco aumenta ocorre também o aumento do erro de circularidade. Os autores estudaram como que esse erro ocorre na entrada e na saída da broca, e constataram que inicialmente não há diferenças, mas à medida que o desgaste de flanco aumenta o erro na saída da broca passa a ser maior que na entrada.

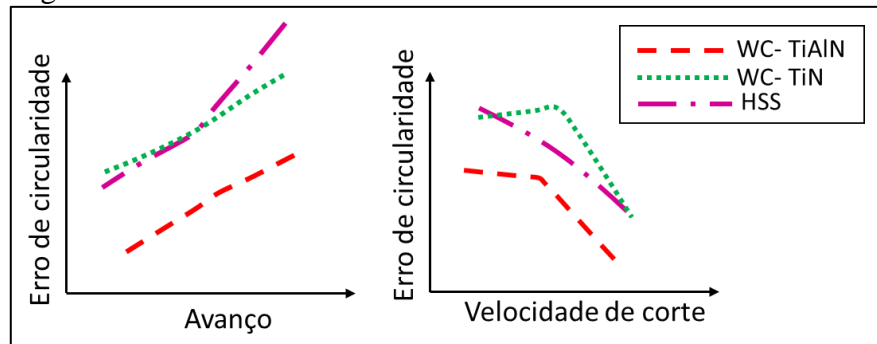
Figura 39 - Efeito do avanço, velocidade de corte e desgaste de flanco no erro de circularidade



Fonte: Autoria própria

De acordo com Ponnuvel, Moorthy e Hariharan (2015) o material da ferramenta de corte também influencia no erro de circularidade, pois a temperatura na região do corte irá depender do material da broca utilizada no processo de furação, a qual afeta a expansão térmica ao longo da direção transversal e longitudinal da matriz e do reforço, causando assim as distorções no furo.

Figura 40- Efeito do material da ferramenta no erro de circularidade



Fonte: Autoria própria

3.7 MONITORAMENTO DO PROCESSO DE USINAGEM

Atualmente, os maiores investimentos na área da usinagem estão focados em reduzir os custos, diminuir o tempo de produção, maximizar os lucros, redução dos tempos improdutivos, dentre outros, isto é, visam otimizar o processo de usinagem. Para isso, são realizados diversos investimentos, como aquisição de maquinários mais modernos, utilização de ferramentas de corte que combinem maior tempo de vida e que gere melhor acabamento as peças (BAPTISTA; COPPINI, 2001; BYRNE et al., 1995).

Contudo, um dos maiores desafios da usinagem é determinar com segurança o momento correto para a troca da ferramenta de corte durante o processo de usinagem, ou seja, em tempo real (CONCEIÇÃO JR, 2016; SILVA et al., 2009), principalmente no processo de furação, onde, em geral, são utilizados métodos básicos de análise, como medições ópticas, acabamento superficial, tamanho de cavacos, etc (ELBESTAWI; DUMITRESCU; NG, 2006).

Para isso, existem diversos campos de pesquisa com foco em monitorar os processos de usinagem, como a mensuração da potência, vibração, temperatura, emissão sonora e acústica, força, dentre outros (AMBHORE et al., 2015; DOWNEY; O'LEARY; RAGHAVENDRA, 2014; NOURI et al., 2015; SILVA et al., 2009, 2011).

O monitoramento do processo de usinagem pode representar economia e praticidade, pois ajuda a identificar o desgaste da ferramenta, rugosidade e anomalias durante o corte (BYRNE et al., 1995; LAURO et al., 2014). Neste estudo optou-se pela utilização do consumo de potência, da

vibração do sistema, da força de avanço e da emissão sonora como parâmetros de monitoramento do sistema.

Segundo Díaz-Álvarez (2014) e Wang et al. (2019) conhecer o comportamento do consumo de potência durante o processo de furação é muito importante, pois uma relação entre o comprimento da broca, o desgaste da ferramenta e o consumo de potência pode otimizar o processo. De acordo como o autor essa simples relação pode determinar a melhor hora para a troca da ferramenta de corte, o que contribui para uma melhor qualidade superficial. Além de minimizar o consumo de energia, pois altos desgastes necessitam de maiores potências, o que encarece o produto final.

Trent e Wright (2000) e Santos (2011) citam que quando há o excesso de vibrações no sistema pode ocorrer o desgaste prematuro e avarias nas ferramentas de corte, e que se essas vibrações ocorrerem de forma persistente por longos períodos, podem danificar a integridade e reduzir a vida dos rolamentos do eixo-árvore da máquina-ferramenta. Além disso, altas vibrações causam baixa qualidade superficial e perda dimensional da peça usinada, ruídos indesejáveis e desagradáveis, e o aumento do consumo de energia elétrica (SIDDHPURA; PAUROBALLY, 2012; TRENT; WRIGHT, 2000).

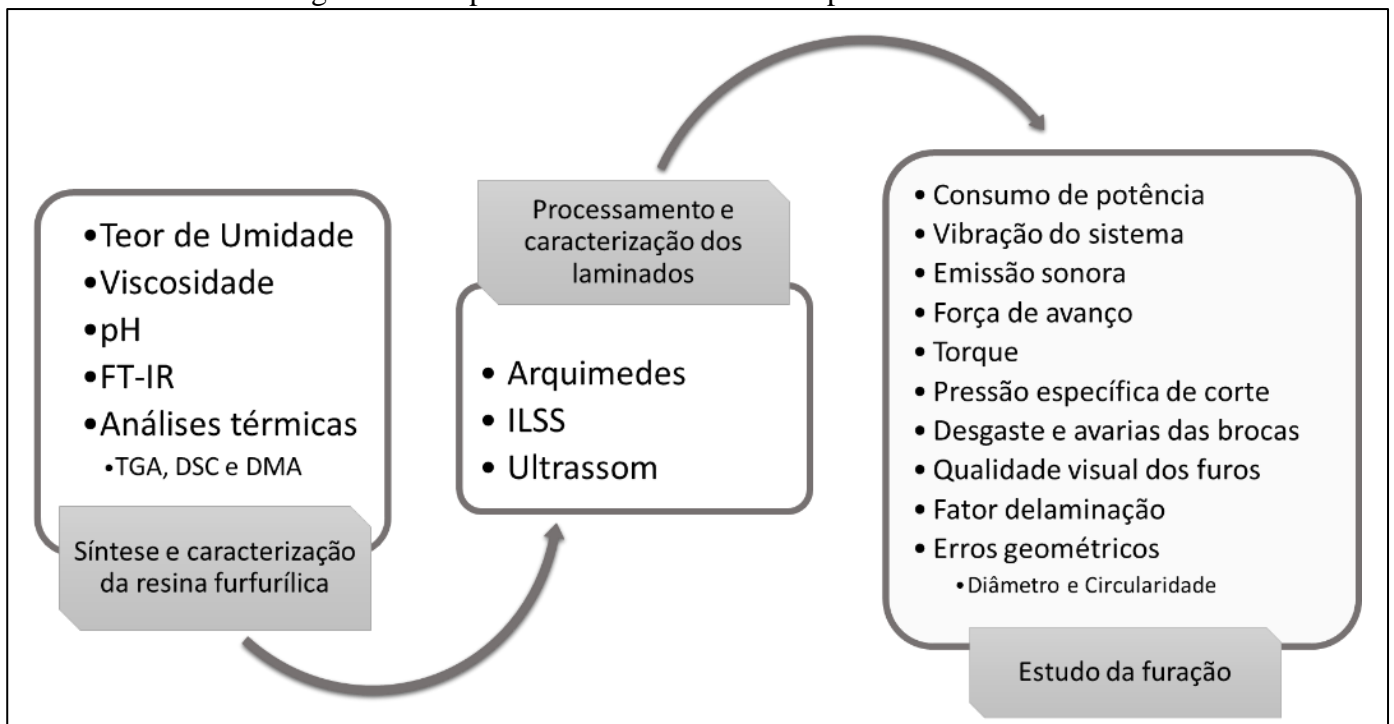
Segundo Liu, Tang e Cong (2012), Saoudi et al. (2016) e Ojo et al. (2017), a força de avanço está ligada à delaminação dos materiais compósitos, sendo que quanto maior a força de avanço maior será a delaminação. De acordo com Liu et al. (2012) através do controle da velocidade de corte, do avanço, da geometria da broca e do desgaste da ferramenta é possível minimizar os efeitos ocasionados pela força de avanço.

Segundo Fernandes (2005), os processos industriais, carros, equipamentos, etc. emitem sons, os quais muitas vezes podem ser prejudiciais à saúde humana. Entretanto, alguns pesquisadores tentaram tirar proveito desses sons, mais especificamente dos sons gerados pelos processos de usinagem, pois de acordo com Takata et al. (1986) e Robben et al. (2010), o som transmitido no ar contém informações valiosas sobre o andamento do processo, bem como é útil para prever o comportamento da vibração da ferramenta. Por meio da emissão sonora é possível reconhecer quando a ferramenta de corte está com um desgaste grande ou sofre uma avaria.

4 MATERIAL E MÉTODOS

Na Figura 41 são apresentadas as etapas do presente trabalho, sendo iniciado pela síntese da resina furfurílica, em seguida realizada a produção dos compósitos e, após isso, o estudo da usinagem.

Figura 41- Etapas do desenvolvimento do presente trabalho



Fonte: Autoria própria

4.1 PRODUÇÃO DOS COMPÓSITOS

Para este estudo foram produzidos dois tipos de compósitos (Quadro 5) com resina furfurílica e reforçados com fibras de carbono, sem e com a adição de CNTs.

Quadro 5- Condições de confecção dos compósitos

Condição	Resina	Adição de nanotubos
1	Furfurílica	Sem nanotubos
2	Furfurílica	Com nanotubos

Fonte: Autoria própria

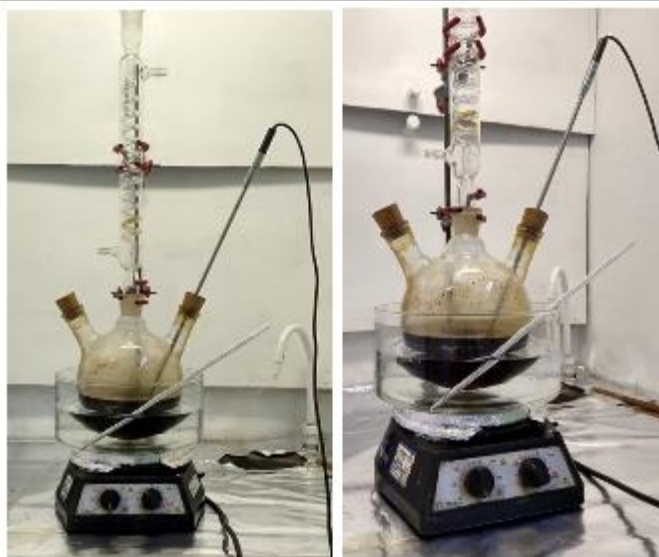
4.1.1 Síntese da resina furfurílica

A síntese da resina furfurílica foi realizada baseada nos trabalhos desenvolvidos por Oishi (2009, 2013), assim sendo, os valores utilizados nessa etapa são em virtude desses trabalhos. Para

tal, foi utilizado o álcool furfurílico da empresa Aldrich Chemistry, com 98% de concentração e, como catalisador, uma solução aquosa de ácido sulfúrico (50 g/L) na proporção de [álcool furfurílico]/[solução de ácido]=70.

A reação de polimerização foi realizada em um balão de 3 bocas de 2L, sob refluxo e agitação magnética, o qual foi colocado em banho-maria como forma de controlar a temperatura da reação, sendo que a temperatura foi mensurada por meio de um termômetro e um termopar (Figura 42). O conjunto de balão e banho maria foi colocado sobre uma chapa de aquecimento com agitação magnética. Quando a temperatura atingiu 32°C, foi adicionado o catalisador e desligado o aquecimento da chapa, mantendo somente a agitação. O processo da síntese foi realizado no Laboratório de Síntese e Materiais Carbonosos da Unesp/Campus de Guaratinguetá-SP.

Figura 42- Aparato para a realização da síntese da resina furfurílica



Fonte: Autoria própria

Como a reação é exotérmica, a temperatura continuou a aumentar, então ao atingir 50°C a reação foi interrompida por meio de choque térmico em banho de gelo e água gelada, para que a temperatura não continuasse subindo. O processo foi mantido a 50 °C por aproximadamente 1h, visando obter uma viscosidade de 1000 mPa.s. Após a finalização do processo de síntese a resina foi resfriada em banho-maria a 8°C.

Como o processo de síntese da resina furfurílica é uma reação de policondensação há a formação de água como subproduto, a qual é necessária ser retirada. Para isso, inicialmente a água foi retirada por decantação e, em seguida, a resina foi destilada a 50 rpm em um rotoevaporador IKA® RV10, visando uma maior remoção de água (Figura 43). A temperatura foi aumentada a

cada 2 °C, da temperatura ambiente até atingir 70°C, permanecendo nessa temperatura até o fim do processo, o que levou aproximadamente 1h.

A neutralização da resina foi realizada utilizando 0,15g de hidróxido de sódio (NaOH) dissolvido em água destilada. Essa etapa foi realizada antes da resina ser colocada no rotoevaporador. Esse processo foi realizado, pois segundo recomendações de Oishi (2009), o meio ácido favorece a continuidade da polimerização o que ocasiona o aumento excessivo da sua viscosidade.

Figura 43- RotoEvaporador IKA® RV10



Fonte: Autoria própria

4.1.2 Caracterização da resina furfurílica

A caracterização da resina furfurílica foi realizada por meio das análises de viscosidade, teor de umidade, pH, espectroscopia no infravermelho com transformada de Fourier (FT-IR), termogravimetria (TGA), calorimetria exploratória diferencial (DSC) e análise dinâmico-mecânica (DMA).

4.1.2.1 Viscosidade

Para a determinação da viscosidade dinâmica foi utilizado um viscosímetro Brookfield, modelo RV DV-II + Pro, com fuso SC4-27, localizado no laboratório de Caracterização de Materiais da Unesp/Campus de Guaratinguetá-SP.

Foram realizadas medidas de viscosidade da resina sem e com catalisador, a fim de compreender como seria o comportamento da mesma em cada uma dessas situações. Para isso,

inicialmente foram realizadas medições até 100°C. O volume de resina utilizado foi de aproximadamente 10 mL, a velocidade de rotação do fuso variou entre 120 e 200rpm e a taxa de aquecimento foi de 1 °C/min

4.1.2.2 pH

Para a determinação do pH da resina foi utilizado um pHmetro da Metrohm Pensalab, modelo 827 pH lab, adaptado com um eletrodo combinado de vidro -Unitrode. As medidas foram realizadas na resina após a destilação no rotoevaporador. O processo foi realizado no Laboratório de Síntese e Materiais Carbonosos da Unesp/Campus de Guaratinguetá-SP.

4.1.2.3 Teor de Umidade

Para a determinação do teor de umidade foi utilizado o titulador Karl Fischer Titrino plus 870 da Metrohm Pensalab, do Laboratório de Síntese e Materiais Carbonosos da Unesp/Campus de Guaratinguetá-SP. Este equipamento utiliza a reação de Karl Fischer, que se baseia na oxidação do dióxido de enxofre por iodo, porém neste caso, o determinante do ponto final não é o SO₂ e sim a água. Para este procedimento foram utilizados um reagente Karl Fischer sem piridina (5mg H₂O/mL) e álcool metílico anidro.

4.1.2.4 Espectroscopia no Infravermelho com Transformada de Fourier

As amostras de resina furfúrica sintetizadas foram analisadas por Espectroscopia no Infravermelho com Transformada de Fourier (FT-IR), com o auxílio de um espectrofotômetro da PerkinElmer, modelo Spectrum 100, na faixa espectral de 4000 a 600 cm⁻¹, com um total de 8 varreduras, sendo os espectros obtidos segundo a técnica de refletância total atenuada universal (UATR). O processo foi realizado no Departamento de Física da Unesp/Campus de Guaratinguetá-SP.

4.1.2.5 Análise Termogravimétrica

Análises termogravimétricas (TGA) foram realizadas utilizando um equipamento TG/DTA 6200, modelo EXSTAR6000 da marca SII Nanotechnology, do Laboratório de Análises térmicas da Unesp/Campus de Guaratinguetá-SP. Para as análises foram utilizadas aproximadamente 8 mg de resina com catalizador (não curada), porta-amostra de platina e alumina como material de referência. As amostras foram aquecidas utilizando-se taxas de aquecimento de 10 °C/min, sob fluxo constante de nitrogênio ou ar sintético, ambas com 100 mL/min, com faixa de temperaturas

compreendida entre 30 e 1000°C. Os ensaios foram realizados de acordo com as recomendações da ASTM E 2550:2017, visando conhecer o comportamento de degradação do material.

As análises de TGA foram realizadas em atmosfera de N₂, visando a determinação do perfil de perda de massa com o aumento da temperatura, bem como para determinar os teores de materiais voláteis e de resíduos (carbono fixo e cinzas), além de poder comparar com os trabalhos realizados por Oishi (OISHI, 2009, 2013)

Também foram realizadas análises de TGA em atmosfera de ar sintético, o objetivo de compreender como a resina seria afetada durante o processo de cura, visto que o mesmo é realizado em meio ambiente.

4.1.2.6 Análise por Calorimetria Exploratória Diferencial

A análise por Calorimetria Exploratória Diferencial (DSC) foi realizada com o objetivo de se avaliar o ciclo de cura da resina furfurílica. As análises foram realizadas utilizando-se um equipamento da TA Instruments, modelo DSC 2910, acoplado a uma célula de pressão, do Laboratório de Análises Térmicas da Unesp/Campus de Guaratinguetá-SP.

Utilizou-se uma massa de aproximadamente 2 mg de amostra (resina com 2% catalisador, em relação a massa da resina) e porta amostra de alumínio. A razão de aquecimento foi de 10°C/min, pressão de 300 psi em atmosfera de N₂ e uma faixa de temperaturas compreendida entre 30 e 250 °C. As análises foram realizadas segundo a norma ISO 11357-1:2016, visando determinar a temperatura de cura da resina.

4.1.2.7 Análise dinâmico-mecânica

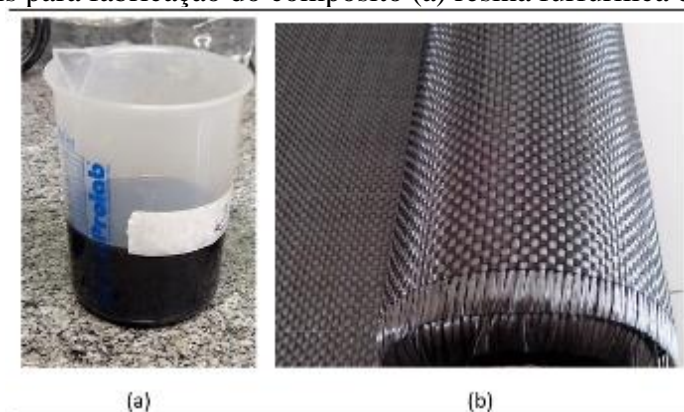
As análises dinâmico-mecânica (DMA) foram realizadas utilizando-se um SII Nanotechnology, modelo DMS 6100, do Laboratório de Análises Térmicas da Unesp/Campus de Guaratinguetá-SP. As amostras foram preparadas em forma de barras, com aproximadamente 50mm x 10mm x 3mm, utilizando a resina curada. A razão de aquecimento utilizada foi de 3°C/min, frequência de 1 Hz, faixa de temperatura de 30 a 190 °C, amplitude de 15 µm, atmosfera de nitrogênio com fluxo de 100 mL/min e solitação mecânica tipo flexão, *dual cantilever*. As análises foram realizadas segundo a norma ASTM D7028:2015, com o objetivo de se determinar a temperatura de transição vítrea.

4.1.3 Processamento dos compósitos

O processamento dos compósitos ocorreu em duas etapas. Inicialmente, a laminação foi realizada de forma mais “rudimentar”, o que gerou uma grande porosidade no material, observada pelo ultrassom das placas. Essa porosidade acabou prejudicando a qualidade dos furos, por isso, foram estudadas formas de aperfeiçoar o processamento dos laminados, visando uma redução dos vazios.

Em ambas as etapas foi utilizada a resina furfurílica sintetizada (Figura 44a) e fibra de carbono no estilo *plain weave* (Figura 44b), da empresa Hexcel Composites, contendo 3.000 monofilamentos por cabo, massa específica de $1,77 \text{ g/cm}^3$ e 0,17 mm de espessura nominal. Os laminados foram produzidos com uma razão volumétrica de 60% de reforço e 40% de matriz.

Figura 44- Materiais para fabricação do compósito (a) resina furfurílica e (b) fibra de carbono



Fonte: Autoria própria

Como forma de acelerar a cura da resina furfurílica foi utilizada uma solução aquosa, na razão de 60% (m/v), de ácido p-toluenossulfônico (APTS) como catalisador. Por meio de testes preliminares foi determinado que 2% da solução em relação à massa da resina, era a quantidade de catalisador mais adequada para a cura da resina sintetizada.

Os compósitos foram produzidos sem e com a adição de nanotubos de carbono. No caso dos laminados nanoestruturados foi utilizado 0,5% em massa de CNT, com base na massa de resina. Os CNTs utilizados são de paredes múltiplas, da empresa Cheaptubes, já funcionalizados com o grupo funcional COOH e pureza de 95% (Figura 45).

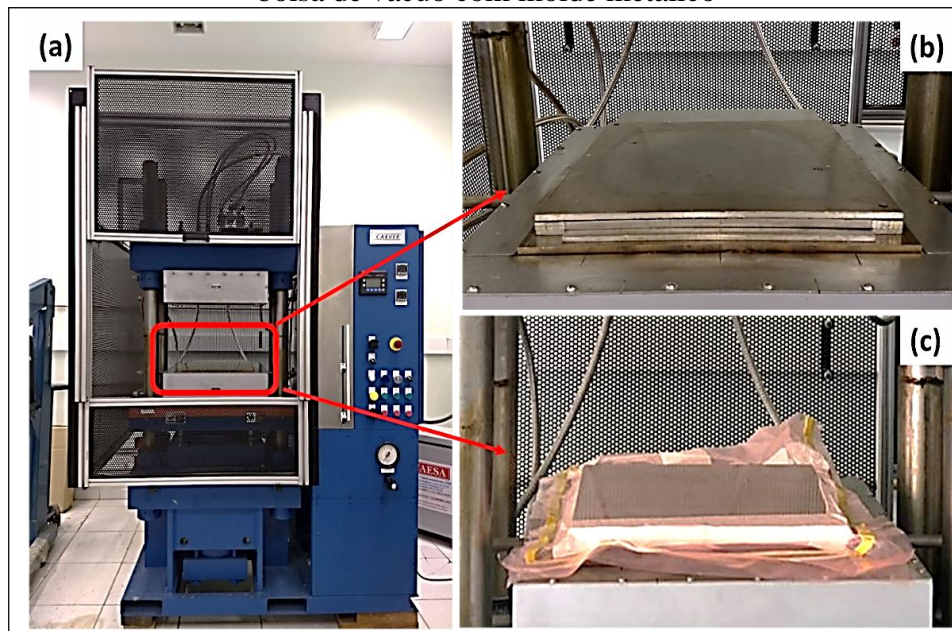
Figura 45- Especificações do nanotubo de carbono utilizado

Propriedade	Valor
Massa específica	2,1 g/cm ³
Pureza	95% em massa
Cor	Preto
Tamanho de aglomeração	0,1 – 1,0 mm
Tamanho médio de paredes	8 – 15 nm
Módulo de elasticidade (teórico)	340 GPa
Tensão a ruptura (teórico)	2,7 GPa
Comprimento	10 – 50 µm
Área superficial	>233 m ² /g
Condutividade elétrica	> 10 ² S/cm
Conteúdo COOH ⁺	2,56 m/m%

Fonte: Adaptado de Ribeiro (2015) e Cheaptubes (2019)

Foram produzidos laminados de aproximadamente 300mm x 300mm x 2,5mm, consolidados por meio de moldagem por compressão a quente, em uma prensa Carver, série Monarch, modelo CMV100H-15-X (Figura 46), com aquecimento e resfriamento controlados, no Laboratório de Metalurgia da Unesp/Campus de Guaratinguetá-SP.

Figura 46- (a) Prensa Carver, série Monarch, modelo CMV100H-15-X, (b) Molde metálico e (c) bolsa de vácuo com molde metálico

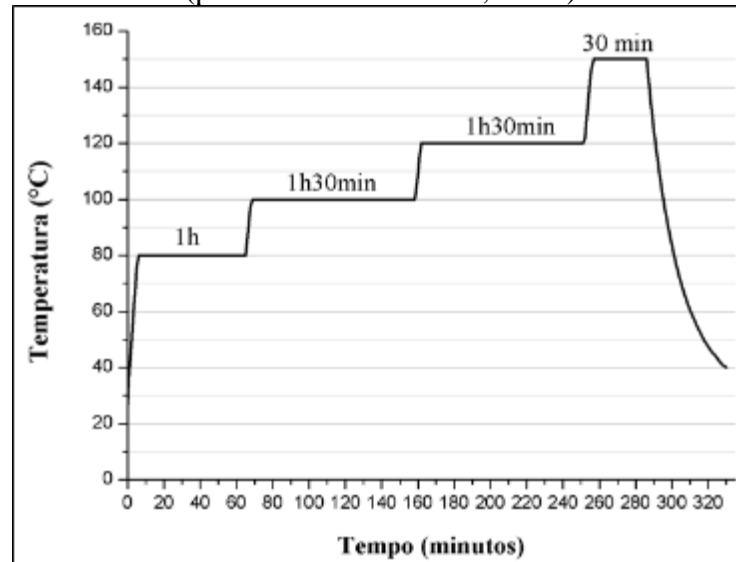


Fonte: Autoria própria

A prensagem foi realizada segundo o ciclo de cura apresentado na Figura 47, no qual foram utilizados quatro patamares, sendo esses de 80°C, 100°C, 120°C e 150°C, e um resfriamento por

meio da passagem de água e ar nas tubulações do equipamento, o que permite um rápido resfriamento do laminado. Em todo o processo foi utilizada pressão constante de 0,5 MPa.

Figura 47- Ciclo de cura do compósito de resina furfurílica reforçado com fibra de carbono (pressão constante de 0,5MPa)



Fonte: Autoria própria

4.1.3.1 Primeira Etapa

Na primeira etapa de produção dos laminados foi utilizada uma técnica mais rudimentar, cujo processo consistia na distribuição manual da resina sobre a fibra, sem o auxílio de nenhum equipamento/ferramenta. Além disso, nesta etapa a dispersão do CNT foi realizada manualmente com o auxílio de uma haste de madeira.

Para este processo foi utilizado um molde de aço inox de 300 mm x 300 mm preparado com uma calda de desmoldante líquido Polidesmo 55 da empresa Silaex[®] Química Ltda, o qual é uma resina à base de silicone que suporta temperaturas de até 400 °C.

Inicialmente foi depositado diretamente no molde uma quantidade de resina e espalhada a mesma de forma manual, em seguida foi colocado uma camada do reforço e depositado resina sobre a fibra e então a resina foi espalhada, e assim, sucessivamente até completar 15 camadas de reforço.

Nos laminados confeccionados com a adição de CNT, foi adicionado em um béquer a quantidade necessária de resina para a produção de um laminado. Posteriormente, foi adicionado 0,5% de CNT, o qual foi misturado à resina com o auxílio de uma haste de madeira. Na sequência, foram adicionados 2% de catalisador à mistura e deu-se início a laminação do compósito como descrito.

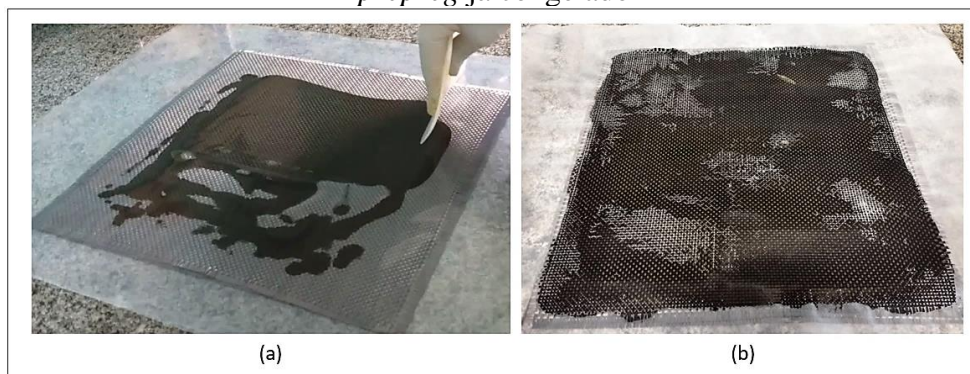
4.1.3.2 Segunda Etapa

Inicialmente, foi desenvolvido um *prepreg* com o intuito de melhorar o processo de laminação (Figura 48), visto que espalhar a resina manualmente não gerava uma distribuição uniforme da matriz polimérica, além de causar a distorção do tecido.

Para a produção do *prepreg* foi utilizado um plástico transparente espesso com aproximadamente 450mmx450mm, para auxiliar na distribuição da resina nas fibras. Para cada *prepreg* foi utilizado duas camadas de reforço sobrepostas e a quantidade de resina, já catalisada, correspondente às duas camadas.

As fibras foram colocadas sobre o plástico e adicionada a resina. Então outra camada de plástico foi colocada por cima e com o auxílio de uma espátula foi espalhada a resina às fibras (Figura 48a). Após a total distribuição da resina, os *prepregs* foram levados ao congelador (Figura 48b).

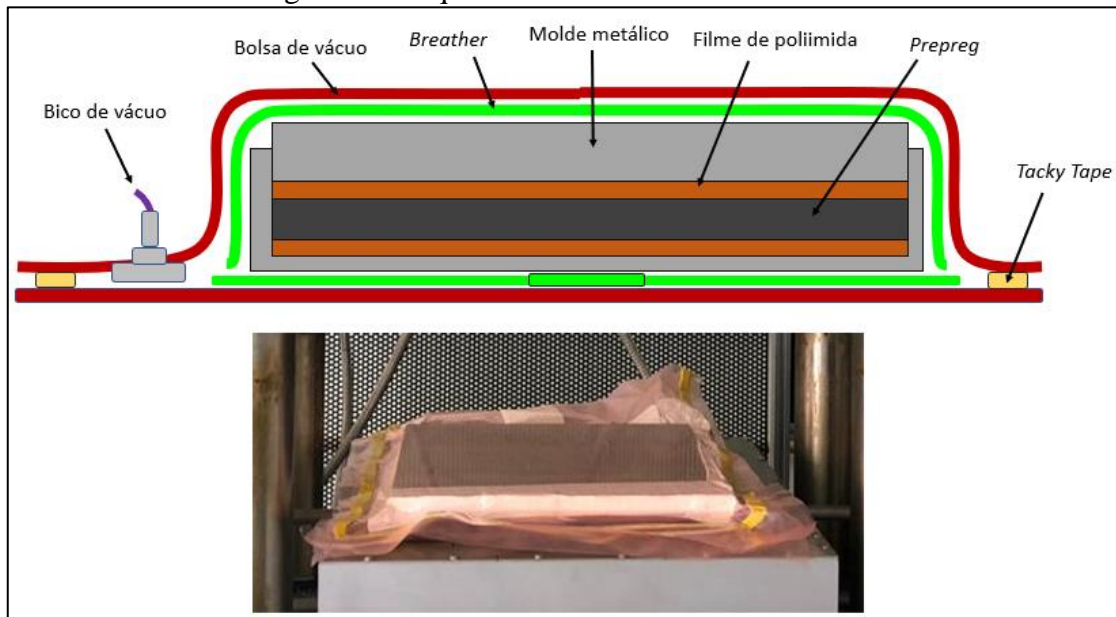
Figura 48- (a) Preparação do *pepreg* de fibra de carbono embebido com resina furfurílica e (b) *prepreg* já congelado



Fonte: Autoria própria

Após alguns testes preliminares foi determinado que a melhor forma de realizar a prensagem do material seria utilizar o molde metálico dentro de uma bolsa de vácuo, pois assim seria possível controlar a porosidade e a espessura do laminado (Figura 49). Além disso, foi utilizado um filme de poliimida para melhorar o acabamento superficial do laminado, e conseqüentemente, melhorar a qualidade dos furos.

Figura 49- Esquema da bolsa de vácuo utilizada



Fonte: Autoria própria

Para compreender como aperfeiçoar o processamento dos laminados foram realizadas somente análises do compósito sem adição de CNT, devido ao custo dos nanotubos.

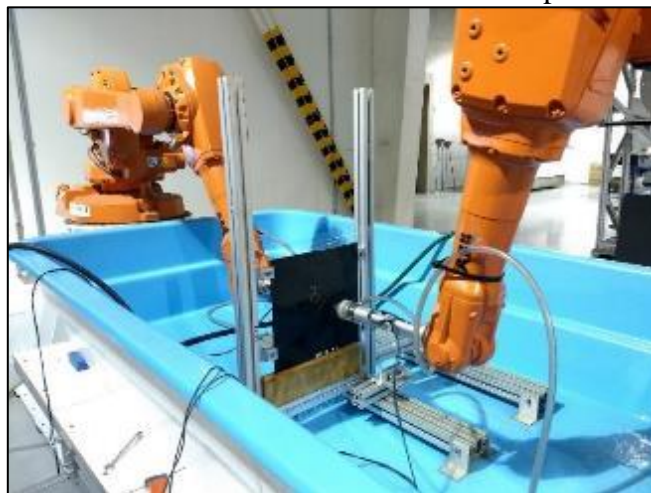
4.1.4 Caracterização dos compósitos produzidos

A caracterização dos compósitos foi realizada por meio das análises resistência ao cisalhamento interlaminar, porosidade e ultrassom.

4.1.4.1 Ultrassom

As análises por ultrassom dos laminados produzidos foram realizadas no Laboratório de Estruturas Leves do Instituto de Pesquisas Tecnológicas (IPT), de São José do Campos-SP. Para tal, foi utilizado um ultrassom de transmissão total da empresa Fibraforte, utilizando um sistema de jato d'água como meio de propagação, frequência do *probe* de 5 MHz, velocidade de varredura de 40 mm/min com precisão de 1 mm. (Figura 50). Como não havia um material de referência foi tomado como tal, a transmissão do sinal água-água, o qual foi de 90%.

Figura 50- Ultrassom de transmissão total da empresa Fibraforte



Fonte: A autoria própria

4.1.4.2 Porosidade

A análise da porcentagem de porosidade foi realizada por meio da metodologia de Arquimedes, segundo recomendações da norma ASTM C830-00:2016. Para tal, foram determinadas as massas: seca (m_s), úmida (m_u) e imersa (m_i). Todas as medições foram efetuadas à temperatura ambiente com auxílio de uma balança semi-analítica. Por meio desse método, foi possível calcular a porosidade aparente (Equação 1) do laminado.

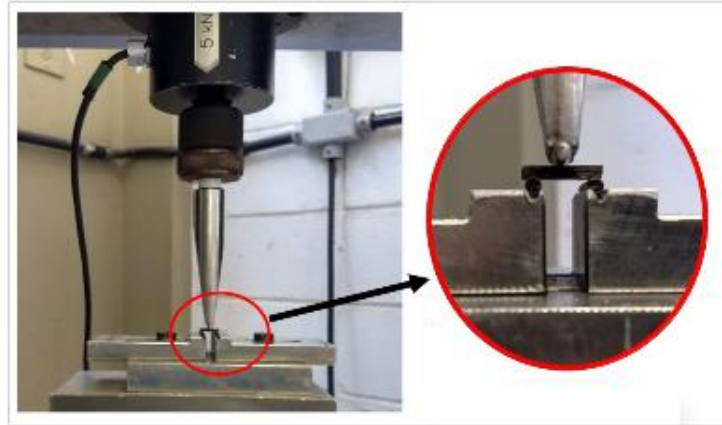
$$\text{Porosidade Aparente (\%)} = \frac{m_u - m_s}{m_u - m_i} \times 100 \quad (1)$$

Para a análise estatística foi realizada uma análise de variância (ANOVA) e teste de Tukey, ambos com 95% de confiabilidade. Para o tratamento da variável resposta foi escolhida a modalidade “menor melhor”, no qual o ajuste final é caracterizado pelo menor valor da variável resposta.

4.1.4.3 Resistência ao cisalhamento interlaminar

O ensaio de cisalhamento interlaminar (*Interlaminar Shear Strength -ILSS*) foi realizado conforme o procedimento descrito na ASTM D2344: 2016 em uma máquina universal de ensaio Shimadzu, modelo AG-X, do Laboratório de Ensaios Mecânicos da Unesp/Campus de Guaratinguetá-SP. Para o ensaio foi utilizada uma célula de carga de 5 kN e velocidade de avanço de 1mm/min. Os corpos de prova possuíam dimensão nominal de 15mm x 5mm x 2,5mm (Figura 51).

Figura 51-Ensaio de cisalhamento interlaminar



Fonte: Autoria própria

A resistência ao cisalhamento do ensaio de ILSS é calculada a partir da Equação 2.

$$F^{sbs} = 0,75 \times \frac{P_m}{b \times h} \quad (2)$$

F^{sbs} = resistência ao cisalhamento interlaminar, em MPa;

P_m = carga correspondente à ruptura da amostra, em N;

b = largura, em mm;

h = espessura, em mm.

Para a análise estatística foi realizada uma análise de variância (ANOVA) e teste de Tukey, ambos com 95% de confiabilidade. Para o tratamento da variável resposta foi escolhida a modalidade “maior melhor”, no qual o ajuste final é caracterizado pelo menor valor da variável resposta.

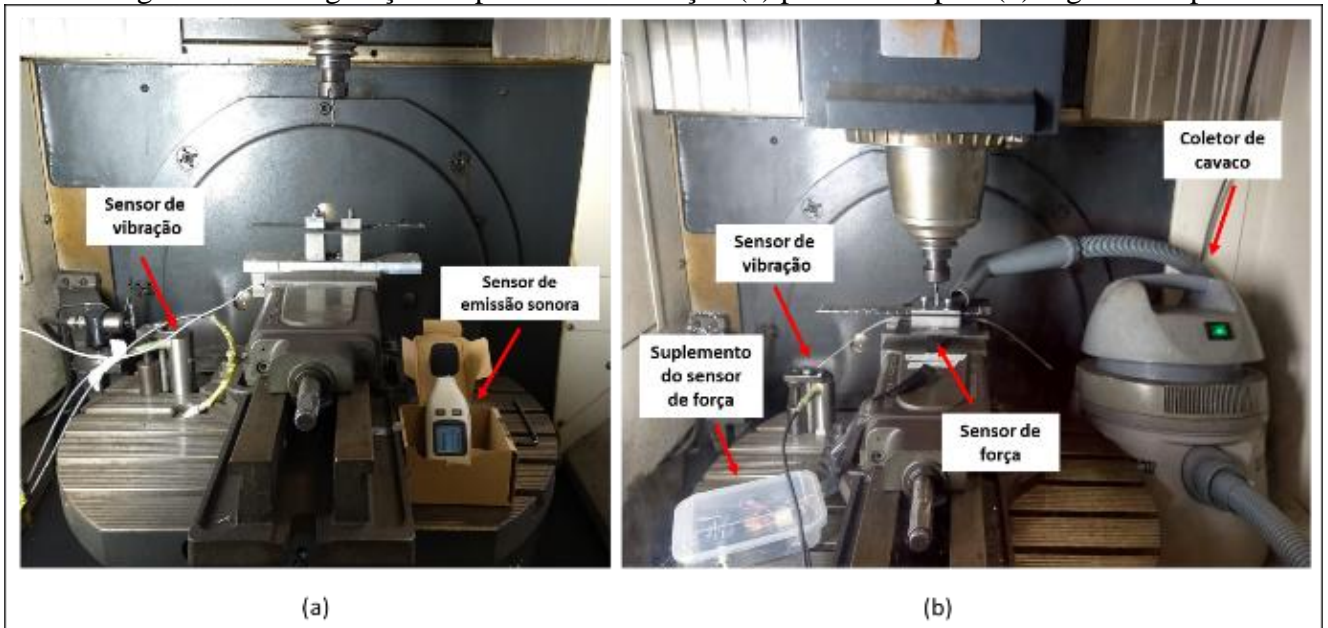
4.2 ESTUDO DA FURAÇÃO

4.2.1 Processo de furação

Os materiais foram submetidos aos processos de furação em cheio, em um centro de usinagem marca DMG modelo DMU50ECO, com rotação máxima do fuso de 8000rpm e potência de 17kVA. Os ensaios foram realizados no Laboratório de Estudos da Usinagem da Unesp/Campus de Guaratinguetá-SP, em duas etapas.

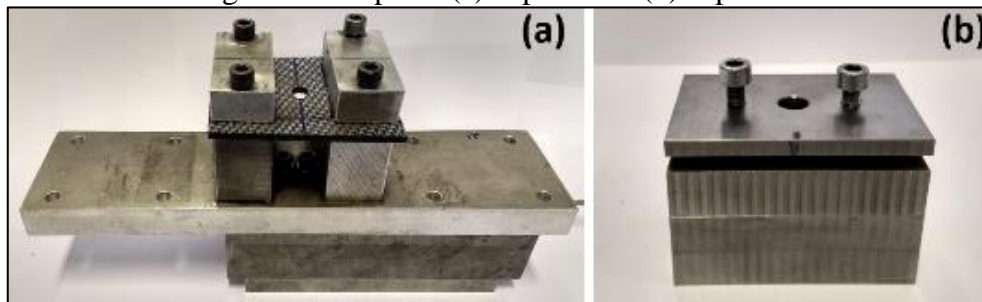
Na primeira etapa (Figura 52a) foram coletados dados de potência, vibração e emissão sonora utilizando o suporte 1, com 25mm de vão entre os apoios (Figura 53a). Na segunda etapa (Figura 52b) foram coletados dados de potência, vibração e força de avanço utilizando o suporte 2, inteiriço com um furo central de 7 mm (Figura 53b).

Figura 52- Configuração do processo de furação (a) primeira etapa e (b) segunda etapa



Fonte: Autoria própria

Figura 53-Surpotes (a) suporte 1 e (b) suporte 2



Fonte: Autoria própria

Para o processo de furação, foram utilizados corpos de prova de 250mm x 25mm, sendo que os furos foram usinados a uma distância de 25mm (Figura 54).

Figura 54- Corpos de prova de furação

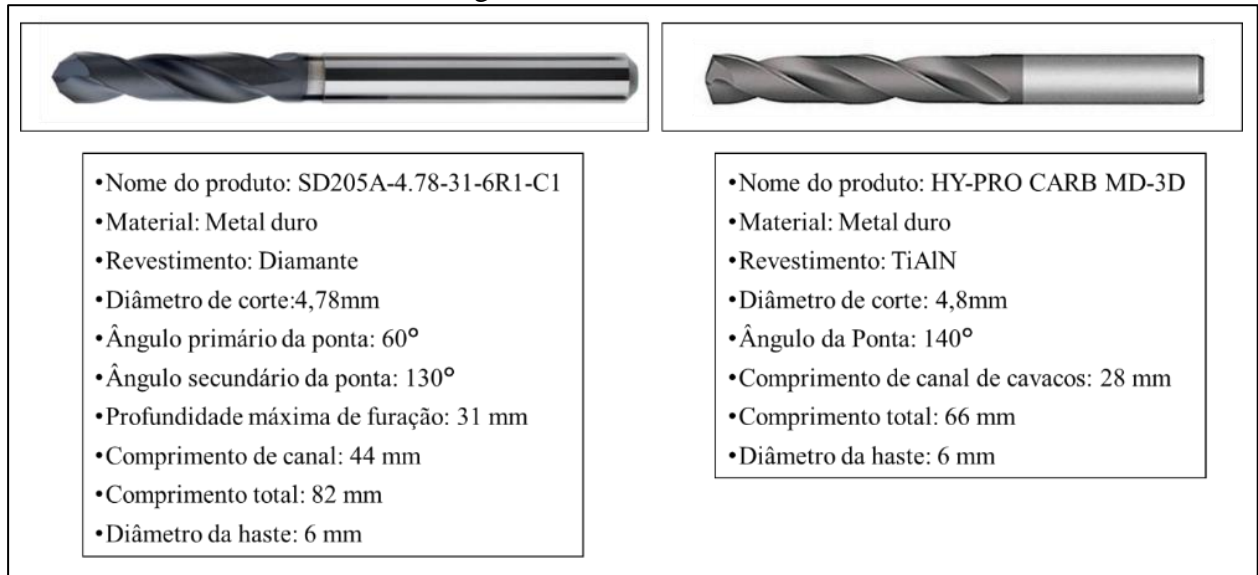


Fonte: Autoria própria

Para a furação foram utilizadas brocas de metal duro revestida com TiAlN ou com diamante (Figura 55). As brocas revestidas com TiAlN foram doadas pela empresa OSG, com perfil helicoidal para uso geral, com 4,8mm de diâmetro.

As brocas com revestimento de diamante foram doadas pela empresa Seco Tools. Essas ferramentas foram desenvolvidas especificamente para a usinagem de compósitos poliméricos reforçado com fibras. Possuem um perfil multifacetado e diâmetro de 4,78mm.

Figura 55- Brocas utilizadas



Fonte: Adaptado de Seco Tools (2018b) e OSG (2017)

Para este estudo foi utilizado um fatorial completo, composto por três rotações, cinco avanços, dois suportes e duas brocas. No Quadro 6 são apresentados os valores utilizados para cada uma das variáveis de entrada. Os valores escolhidos foram baseados na literatura utilizada na revisão bibliográfica deste trabalho e em estudos preliminares.

Quadro 6- Variáveis de entrada

Parâmetro	Valores
Broca	Diamantada e TiAlN
Rotação (rpm)	4000, 6000 e 8000
Avanço (mm/rot)	0,0125; 0,025; 0,05; 0,1 e 0,2
Suporte	1 e 2

Fonte: Autoria própria

4.2.2 Sistema de aquisição de dados

Durante o processo de usinagem foram coletados dados de potência, vibração e força de avanço com o auxílio de um sistema de aquisição de dados computadorizado, o qual coletou os dados do processo em tempo real. Esse sistema permite a obtenção de quaisquer variáveis físicas

que, mediante sensores ou transdutores apropriados, são convertidos em sinais elétricos proporcionais.

Para isto foi desenvolvido um aplicativo que adquirisse os dados com uma taxa de 10.000 pontos por segundo. Este programa foi desenvolvido na plataforma do software Labview 7.1 2012, da National Instruments. O sistema ainda contou com uma placa de aquisição de dados da mesma empresa do software, modelo NI PCI 6220, que foi acoplada no computador. A placa teve a função de receber os sinais analógicos enviado dos sensores acoplados ao centro de usinagem e transformá-los em sinais digitais para serem interpretados pelo software.

4.2.2.1 Potência consumida

Para a aquisição da potência consumida do motor do centro de usinagem foi utilizado um sensor de corrente, da marca LEM modelo AT 100 B10. O sensor, em função da corrente elétrica de uma das fases do motor, gera uma saída proporcional de 0 a 10 Volts de Corrente Contínua (VCC), que é armazenada pelo computador. Como o sinal adquirido pelo sistema tem uma saída proporcional em volts é necessário converter o valor para amperes. O fabricante do sensor fornece a Equação 3 para a transformação do dado adquirido em volts para amperes.

$$I = U_{cc} * 10 \quad (3)$$

I = corrente de uma das fases em Ampéres;

U_{cc} = tensão de corrente continua em Volts.

Substituindo o valor da corrente, o valor da tensão de fase do motor do centro de usinagem (220 V) e o fator de potência (0,92) do motor, na Equação 4 que foi utilizada para transformar o sinal adquirido em Volts para Watts e, multiplicado toda a equação por $\sqrt{3}$, visto que motor utilizado é trifásico, obtêm-se a Equação 5.

$$P_c = I \times U_f \times F_p \times \sqrt{3} \quad (4)$$

P_c = potência consumida, em Watts;

I = corrente alternada de uma das fases, em Ampéres;

U_f = tensão de uma das fases, em Volts;

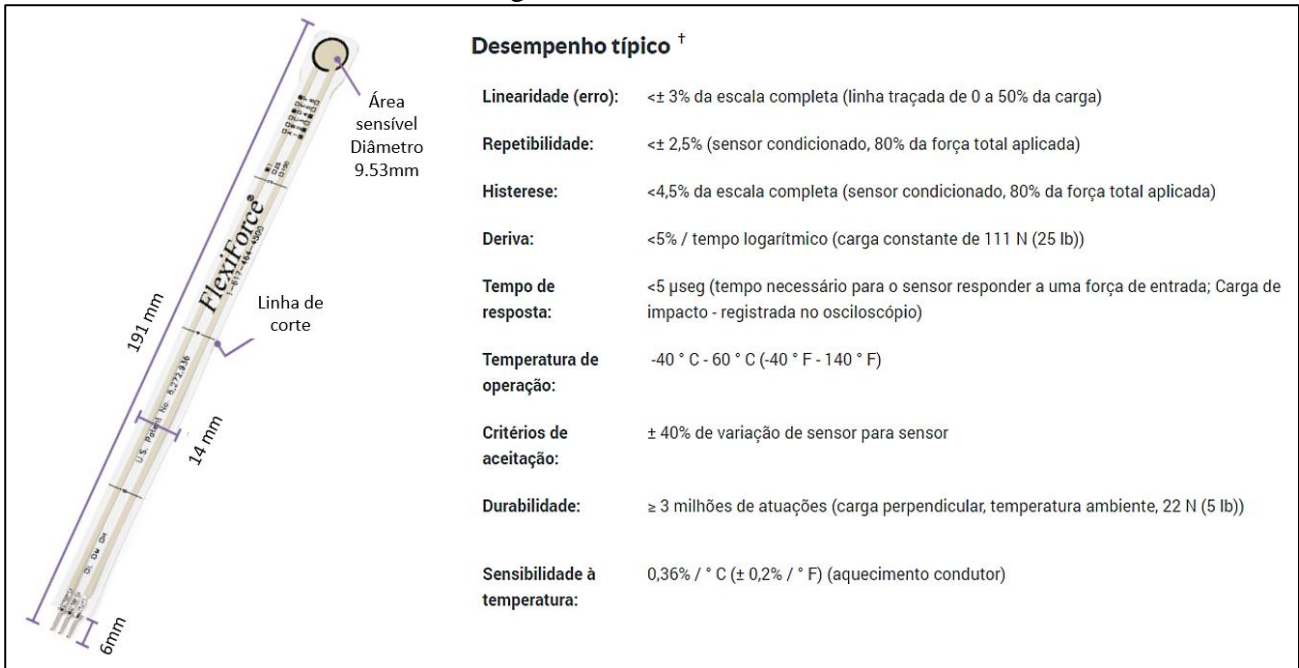
F_p = fator de potência.

$$P_c = U_{cc} * 10 * 0,92 * 220 * \sqrt{3} \quad (5)$$

4.2.2.2 Força de avanço

Para a aquisição da força de avanço foi utilizado um transdutor de força FlexiForce A201-100 lb, com 0,203 mm de espessura da empresa Tekscan, Inc. (Figura 56). O A201 é um sensor de força piezoresistivo fino e flexível, utilizado para a mensuração não intrusiva de força e pressão.

Figura 56- FlexiForce A201



Fonte: Adaptado de Tekscan, Inc. (2019)

Para a captação dos dados o sensor foi acoplado em uma placa de início rápido desenvolvida para o FlexiForce pela fabricante, a qual foi ligada a placa de aquisição de sinal. Para a transformação dos dados coletados em Newton, foi utilizada uma curva de calibração, segundo recomendações do fabricante.

4.2.2.3 Vibração

Para a aquisição dos valores de vibração foram utilizados um sensor piezométrico (acelerômetro) e um amplificador de sinal com saída retificada em RMS (valor quadrático médio), marca Vibro Control, modelo TV100. Os valores obtidos em voltagem (VCC) foram convertidos depois para valores de velocidade em mm/s por meio da Equação 6, fornecida pelo fabricante.

$$\text{Vibração} = \frac{25 \cdot VCC}{8} \quad (6)$$

4.2.2.4 Emissão sonora

Para a aquisição dos dados de emissão sonora foi utilizado um decibelímetro da marca Decibelímetro Digital Medidor de Som e Ruído 30-130 Decibéis da KKMOON. O decibelímetro foi mantido a uma distância nominal de 30 centímetros do corpo de prova usinado. Para o estudo foi optado pela máxima emissão sonora de cada ensaio, sendo que os valores obtidos foram em decibel.

4.2.3 Torque

Para a determinação do torque, foi utilizada a Equação 7, proposta por Davim e Reis (2003b), na qual a potência pode ser determinada por meio dos valores de torque e velocidade angular. Neste presente estudo foi utilizado o valor obtido para a potência consumida e a velocidade de corte, com base na rotação e diâmetro das brocas utilizadas para cada combinação.

$$P_c = B * \omega \quad (7)$$

P_c = potência consumida, em Watts;
 B = Torque, em N.m;
 ω = Velocidade Angular, em radianos.

4.2.4 Pressão específica de corte

Assim como para o torque, a pressão específica de corte foi determinada com base em uma equação proposta por Davim e Reis (2003b), na qual a k_s pode ser determinada por meio dos valores de torque, avanço e diâmetro da broca (Equação 8).

$$k_s = \frac{8*B}{f*D^2} \quad (8)$$

k_s = Pressão específica de corte, em N.mm²;
 B = Torque, em N.mm;
 f = Avanço, em mm/rot;
 D = Diâmetro da broca, em mm

4.2.5 Força de corte

A força de força de corte foi determinada com base em uma equação proposta por Diniz, Marcondes e Coppini (2013), para a qual foi utilizado o valor calculado analiticamente de k_s e determinada a área da sessão de corte das brocas, com base nos valores disponibilizados pelos fabricantes (Equação 9). Para o cálculo da área da sessão de corte foi utilizado a proposta de Diniz,

Marcondes e Coppini (2013), na qual é feita a multiplicação da base pela altura da sessão transversal de corte.

$$F_c = k_s * A \quad (9)$$

F_c = Força de corte, em N;

k_s = Pressão específica de corte, em N.mm²;

A = Área da sessão de corte.

4.2.6 Desgaste e avaria das ferramentas de corte

Após os processos de usinagem foram determinados os desgastes e as avarias que as brocas sofreram durante os processos. Para realizar a avaliação do tipo de desgaste qualitativo foi utilizado um microscópio óptico da Carl Zeiss, modelo Stemi 2000 com a câmera da AxioCam ICc 3 da Zeiss, acoplado para a captação de imagem, do Laboratório de Microscopia da Unesp/Campus de Guaratinguetá-SP.

Foi realizada a mensuração do desgaste de flanco (VB) utilizando a Máquinas de Medição Óptica 2D - QS-LZB Série 359, da empresa Mitutoyo, localizado no Laboratório de Estudos da Usinagem da Unesp/Campus de Guaratinguetá-SP.

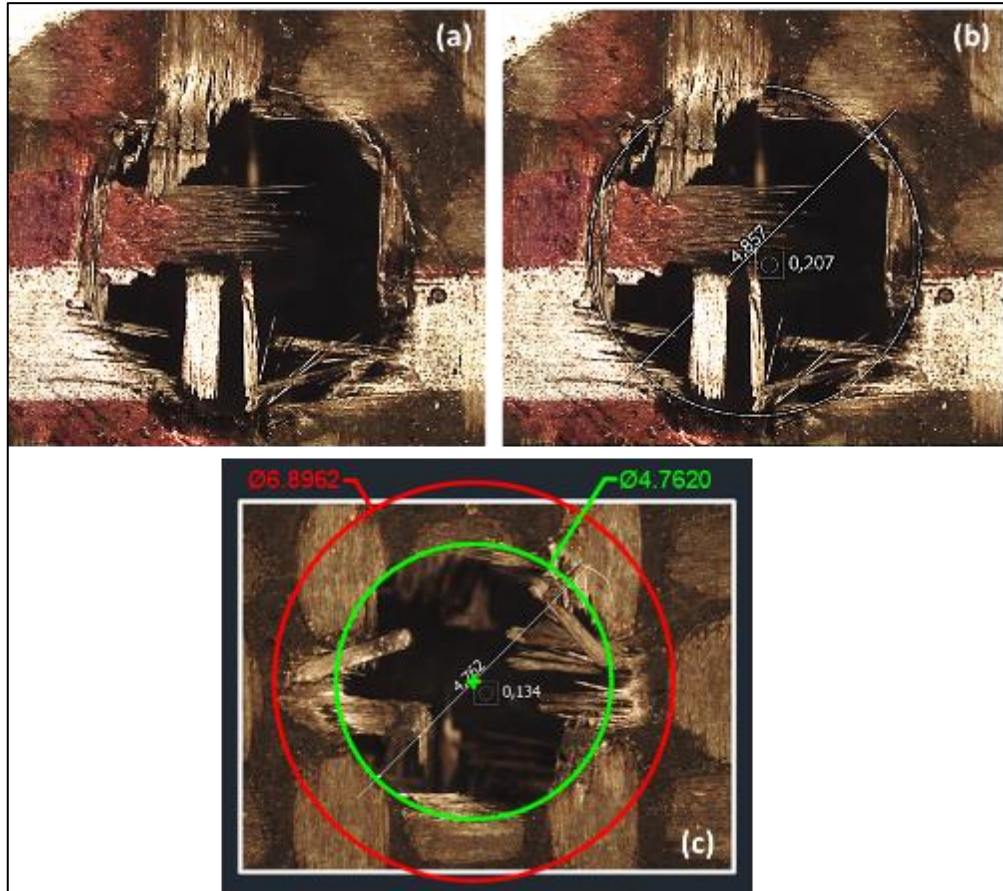
4.2.7 Qualidade dos furos

A influência do processo de furação na qualidade do furo foi avaliada por meio da topografia dos furos (Figura 57a), dos erros de dimensão e de circularidade (Figura 57b) e pelo fator delaminação (Figura 57c). Para a realização dessas análises foi utilizada a Máquinas de Medição Óptica 2D - QS-LZB Série 359, da marca Mitutoyo.

O fator de delaminação convencional (F_d) foi usado para descrever a delaminação, que é um número unidimensional, mostrando a relação entre o diâmetro máximo da área de delaminação (D_{max}) e o diâmetro nominal do furo (D_{nom}), conforme a Equação 9. As análises foram realizadas para a avaliar a delaminação *peel-up* e *push-out*.

$$F_d = \frac{D_{max}}{D_{nom}} \quad (10)$$

Figura 57- (a) Análise topográfica dos furos (b) método de determinação da circularidade dos furos e (c) esquema do cálculo do fator delaminação



Fonte: Autoria própria

4.2.8 Análise estatística

Para a análise estatística foi realizada uma análise de variância (ANOVA) e teste de Tukey, ambos com 95% de confiabilidade. Para o tratamento das variáveis resposta foi escolhida a modalidade “menor melhor”, no qual o ajuste final é caracterizado pelos menores valores de cada variável resposta. Para tal foram utilizados métodos lineares e interações de segunda ordem, visto que as interações de 3ª ordem podem se confundir com as de 1ª ordem e as de 4ª com as de 2ª ordem. Para cada modelo foi realizado o melhor ajuste, com base no desvio padrão, R^2 , R^2 ajustado e R^2 predito.

Além disso, foi realizada uma análise de regressão linear simples ou a múltipla. A regressão linear simples foi utilizada para casos onde somente um dos fatores principais contribuiu com mais de 90% do resultado. E a regressão linear múltipla, foi utilizada quando um conjunto de fatores e/ou interações foram responsável pelo resultado.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 PROPRIEDADES DA RESINA

5.1.1 Teor de umidade, Viscosidade e pH

Na Tabela 1 são apresentados os resultados de pH, teor de umidade e viscosidade da resina sintetizada. Os valores estão de acordo com os recomendados por Oishi (2013), os quais possuem um teor de umidade abaixo de 2%, após a destilação; um pH entre o ácido e o neutro e uma viscosidade após a destilação de aproximadamente 1000 mPa.s.

Tabela 1- Caracterização da resina

Propriedade analisada	Valor encontrado
Teor de umidade	1,34%
pH	5,2
Viscosidade	1104 mPa.s

O controle do teor de umidade é muito importante, pois elevados teores de umidade acarretam em uma grande quantidade de poros após a cura da resina furfurílica. Ou seja, quanto menor a umidade melhor será a qualidade do material final (OISHI, 2009; OISHI et al., 2012).

Quando o pH é muito ácido, acaba prejudicando a durabilidade da resina, por isso a resina foi neutralizada até próximo de cinco, segundo recomendações, pois a neutralização ajuda a manter a resina com a viscosidade inicial, aumentando sua durabilidade (OISHI, 2013; OISHI et al., 2012).

A viscosidade obtida para a resina logo após a destilação está dentro do recomendado por Oishi (2013), visto que uma baixa viscosidade acarretaria no escoamento da resina, ou seja, quando fosse aplicada pressão para a consolidação do compósito e resina iria vazar, e uma elevada viscosidade dificultaria o processo de laminação, ou seja, seria difícil permear a resina através do reforço. Em ambos os casos, não seria possível realizar uma impregnação adequada das fibras, consequentemente, o laminado produzido não teria boas propriedades.

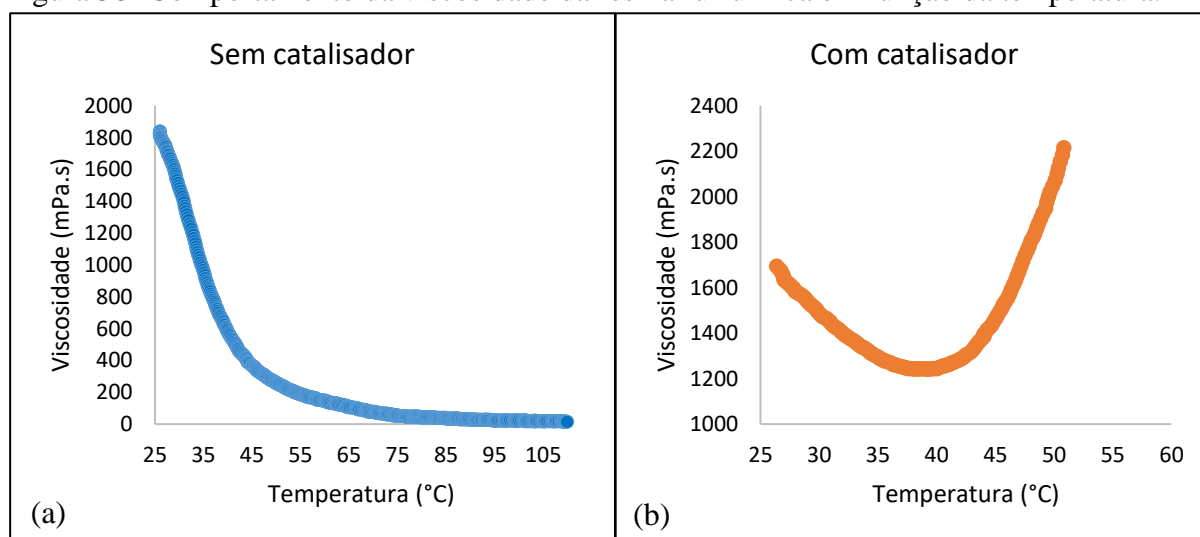
Após finalizada a síntese a resina foi separada em béqueres e levada ao congelador. Antes do preparo dos *prepregs* foram realizadas novas análises viscosimétricas, sem e com a adição de catalisador, ambas em temperatura ambiente. O teste com catalisador foi realizado, pois a resina utilizada para a produção dos *prepegs* é com a resina já catalisada, e por isso, é necessário compreender o seu comportamento viscométrico com o aumento da temperatura.

Observou-se que a viscosidade aumentou após o processo de congelamento, onde passou de 1104 mPa.s para aproximadamente 1765 mPa.s (Figura 58a). Esse aumento da viscosidade está relacionado a acidez da resina, a qual propicia que a reação de polimerização da resina furfurfílica continue ocorrendo. Comparando-se os resultados obtidos com os citados por Oishi (2013), constata-se que os valores obtidos nas novas análises estão dentro do esperado, em ambos os casos, antes e após o congelamento.

Nota-se que, com a adição do APTS à resina furfurfílica (Figura 58b), a viscosidade da resina diminuiu até 40°C, com o aumento a temperatura. E então, voltou a subir rapidamente, ultrapassando o valor inicial. Isso porque o catalizador ajuda na reticulação do polímero.

Baseando-se nesses resultados, constatou-se que seria interessante que o primeiro patamar de temperatura, no ciclo de cura do compósito, fosse em ~40°C (próximo a temperatura de gel), pois ajudaria na percolação da resina nas fibras. Comparando com a literatura, verifica-se que a empresa TransFurans Chemicals (2018b) cita que o processo de cura de compósitos utilizando a resina furfurfílica, que eles produzem, seja a iniciado em uma temperatura de ~ 50°C, por um período de ~10 min.

Figura 58- Comportamento da viscosidade da resina furfurfílica em função da temperatura.



Fonte: Autoria própria

5.1.2 Espectroscopia no Infravermelho com Transformada de Fourier

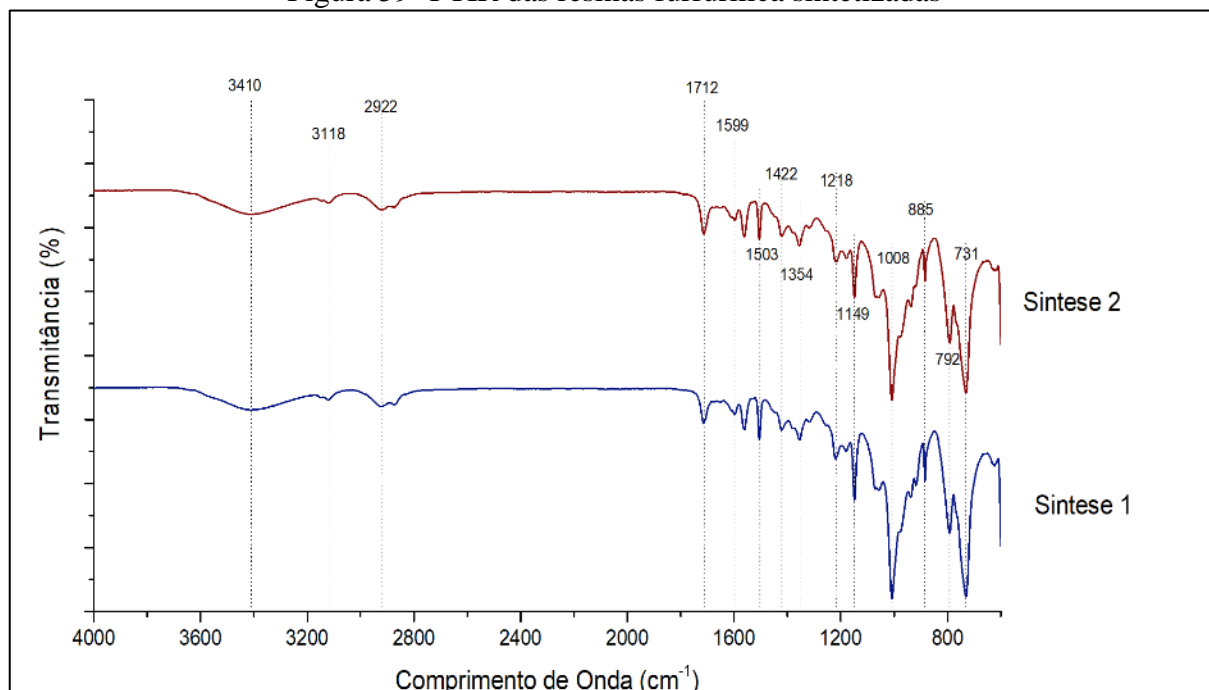
A técnica de FT-IR é amplamente utilizada para a identificação de compostos orgânicos, visto que as ligações químicas das substâncias possuem frequências de vibração específicas, às quais correspondem a níveis de energia da molécula, denominado de níveis vibracionais. Nessa técnica a radiação infravermelha provoca a vibração das ligações dos grupos funcionais presentes

nas moléculas de um determinado composto, sendo que estas vibrações podem ter amplitudes e velocidades diferentes (OISHI, 2009).

O espectro obtido no infravermelho fornece um agregado muito rico de bandas de absorção, as quais podem ser utilizadas para a determinação de grupos funcionais, o que permite a obtenção de informações estruturais úteis para a identificação da estrutura da molécula (LOPES; FASCIO, 2004).

Sendo assim, a técnica de FT-IR foi utilizada com o objetivo de caracterizar as resinas sintetizadas e compará-las com espectros de resinas obtidos da literatura. Na Figura 59 são apresentados os resultados obtidos das análises de FT-IR das resinas furfurílica sintetizadas. Comparando-se os espectros das duas sínteses, observa-se que não houve nenhuma modificação estrutural significativa.

Figura 59- FTIR das resinas furfurílica sintetizadas



Fonte: Autoria própria

Na Tabela 2 são apresentados os valores obtidos nesse estudo, bem como os da literatura, para as principais bandas observadas no espectro da resina furfurílica e suas respectivas atribuições propostas. Novamente, pode-se afirmar que as bandas características são similares e confirmam que a resina sintetizada foi de fato a furfurílica.

Tabela 2- Atribuições propostas para as principais bandas presentes no espectro FT-IR da resina furfurílica obtidas da literatura e para a resina furfurílica sintetizada no presente trabalho

(OISHI, 2009)	(CONEJO, 2019)	Obtido nesse trabalho	Grupos	Atribuição Proposta
3413	3393	3410	OH com ligações de hidrogênio intermoleculares	ν O-H
3120	3098	3118	Posições 3 e 4 do anel furano	ν C-H
2935	2922	2922	Carbono saturado, CH ₂	ν C-H
1713	1713	1712	Cetona alifática e/ou dicetona	ν C=O
1561	1597	1599	Ligações –C=C- do anel furano	ν C=C
1505	1505	1503	Ligações –C=C- do anel furano	ν C=C
1420	1423	1422	-CH ₂ -CO-	δ C-C-O (CH ₂)
1355	1354	1354	Ligações –C=C- conjugadas	ν C=C
1218	1220	1218	Ligações C-O do álcool ou C-O-C do anel	ν C-OH, ν C-O-C
1150	1148	1149	Hidrogênios do anel ou C-O-H do álcool	δ C-C-H, ν C-O
1010	1008	1008	Anel furano	ν C-O
884	884	885	Hidrogênios do anel furano	δ C-C-H
791	792	792	Hidrogênios do anel furano	δ C-C-H
732	715	731	Hidrogênios do anel furano	δ C-C-H

5.1.3 Análise Termogravimétrica

As análises termogravimétricas (TGAs) foram realizadas em atmosfera de N₂ (Figura 60) e ar sintético (Figura 61), utilizando a resina catalisada.

A TGA da resina em atmosfera de N₂ mostra que a mesma se decompõe em pelo menos três etapas de decomposição térmica, comprovada pela presença dos três picos principais na derivada, (verifica-se que alguns eventos de decomposição estão sobrepostos devido à presença de picos múltiplos dentro das principais etapas).

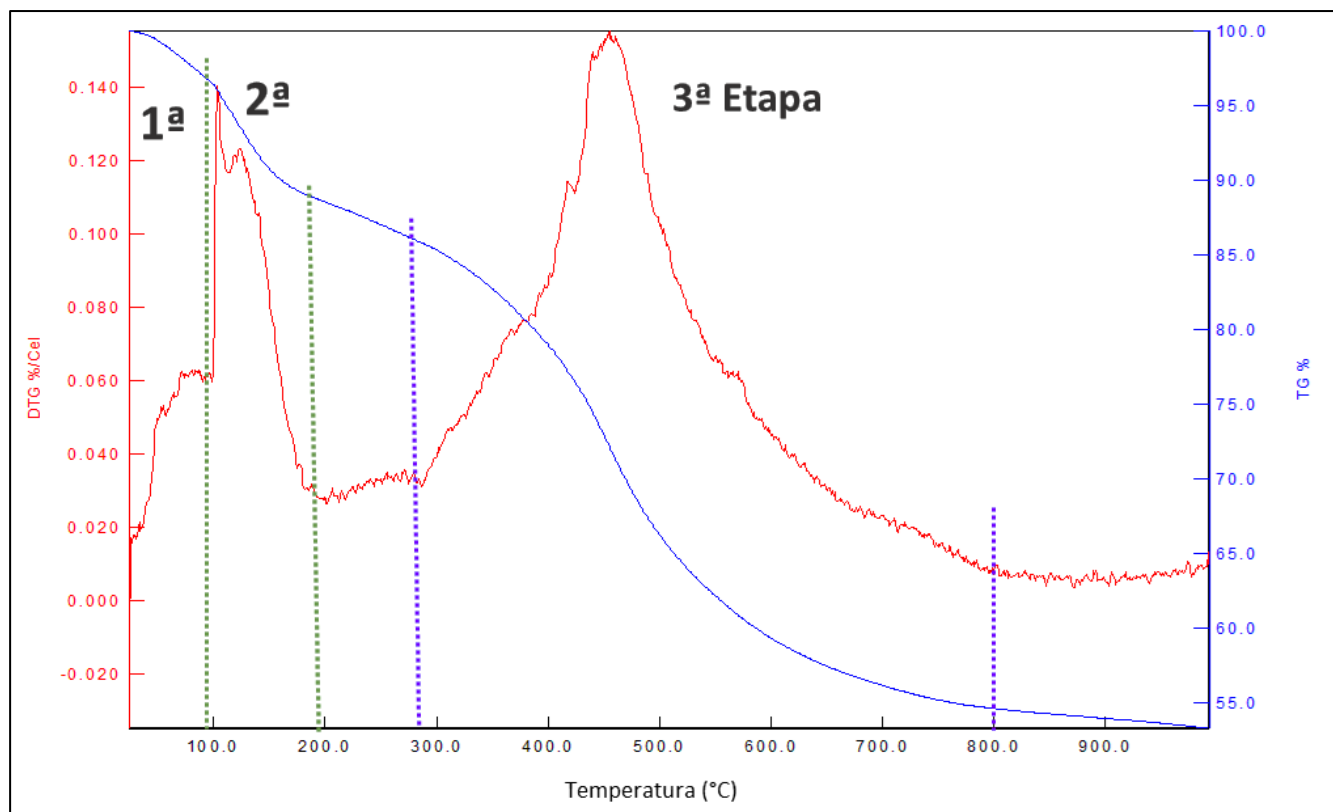
A primeira etapa ocorre entre a temperatura ambiente e 100°C, com uma perda de massa de ~4%, a qual provavelmente está relacionada com a saída de voláteis e umidade. A segunda etapa ocorre entre 100°C e 200°C com uma perda de massa de ~10%, devido à degradação térmica da resina furfurílica sob atmosfera inerte, pois segundo Oishi (2009), a partir de 120°C ocorre a desidratação da resina, a qual contribui para a formação de pontes metilênicas (CH₂) e acima de 150°C essas pontes se quebram e liberaram metano (CH₄), como subproduto.

Entre 200°C e 800°C há uma perda de massa de ~25% a qual está relacionada com duas etapas, primeiramente entre 300°C e 400°C há a ruptura do anel furano e liberação de CO, CO₂ e H₂O. A partir de 450°C há uma possível reação das pontes metilênicas que restaram com a água

para formar grupos cetona, com a liberação de uma quantidade significativa de hidrogênio (OISHI, 2009). Observou-se a presença de aproximadamente 50% de resíduos em 1000°C.

De forma geral, pode-se dizer que a partir de 100°C a resina furfurílica começa seu processo de degradação térmica e ao final possui um teor de carbono fixo e cinzas de 50%, devido à essa degradação.

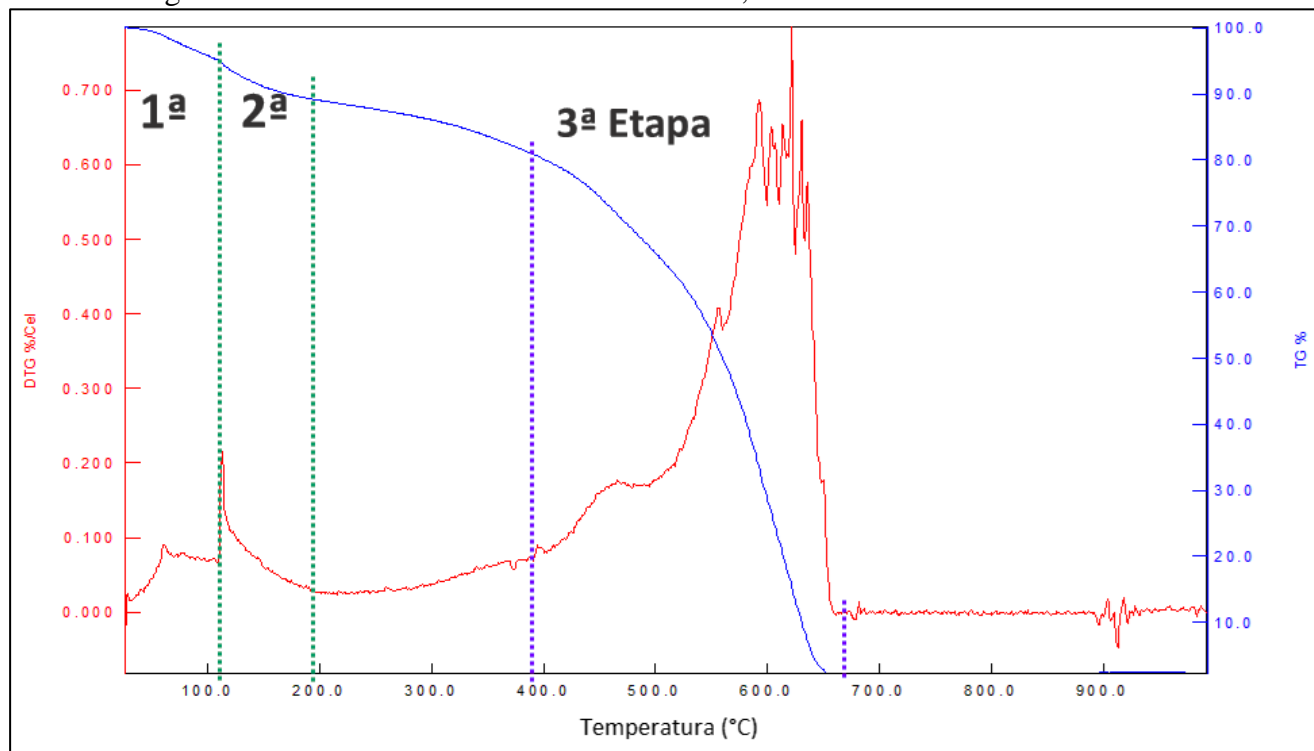
Figura 60- TGA da resina furfurílica catalisada, sob atmosfera de N₂.



Fonte: Autoria própria

A TGA da resina em atmosfera de ar sintético apresenta uma perda de massa de ~4% próximo a 100°C, provavelmente relacionada à saída de voláteis e umidade. Entre 100 e 660°C ocorre duas perdas de massa, uma de ~15% entre 100 e 400°C e uma de 79% entre 400 e 660°C. Ambas estão relacionadas com a degradação térmica da resina furfurílica, porém como a análise não é em atmosfera inerte, os valores de formação das pontes de CH₄ e de grupos cetona ou a liberação de CO, CO₂, H₂O e H₂ podem ser diferentes. Além disso, não há a formação de resíduos, que devido à presença de oxigênio leva à degradação de toda a amostra.

Figura 61- TGA da resina furfurílica catalisada, sob atmosfera de ar sintético



Fonte: Autoria própria

5.1.4 Análise por Calorimetria Exploratória Diferencial

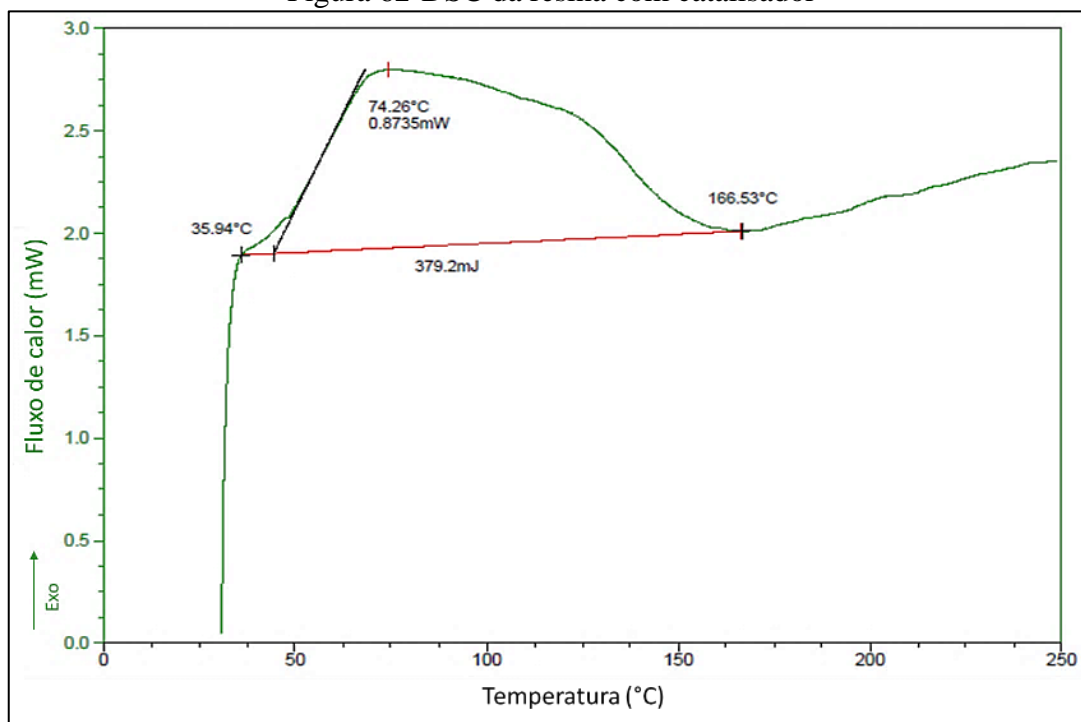
Na Figura 62 é apresentado o perfil de cura da resina furfurílica com catalisador, onde se verifica que a reação de cura é representada por um evento exotérmico. Os resultados obtidos para as temperaturas de pico, *onset*, *endset* e a variação de entalpia são apresentados na Tabela 3.

Tabela 3- Análise por Calorimetria Exploratória Diferencial da resina com catalisador

	Temperatura de <i>Onset</i> (°C)	Temperatura de Pico (°C)	Temperaturas de <i>Endset</i> (°C)	ΔH (mJ)
Resina Furfurílica	35,94	74,26	166,53	379,20

Esses resultados estão bem próximos dos obtido por Oishi (2009), onde no qual a autora encontrou valores de 48,10°C para *Tonset*, 78,90°C para *Tpico* e 150°C para *Tendset*, para a resina furfurílica com a adição de 2% de catalisador.

Figura 62-DSC da resina com catalisador



Fonte: Autoria própria

Pela análise de DSC, constatou-se que no ciclo de cura (Figura 47) deve-se adicionar um patamar de temperatura menor que 80 °C, pois nessa temperatura já ocorreu o pico de cura.

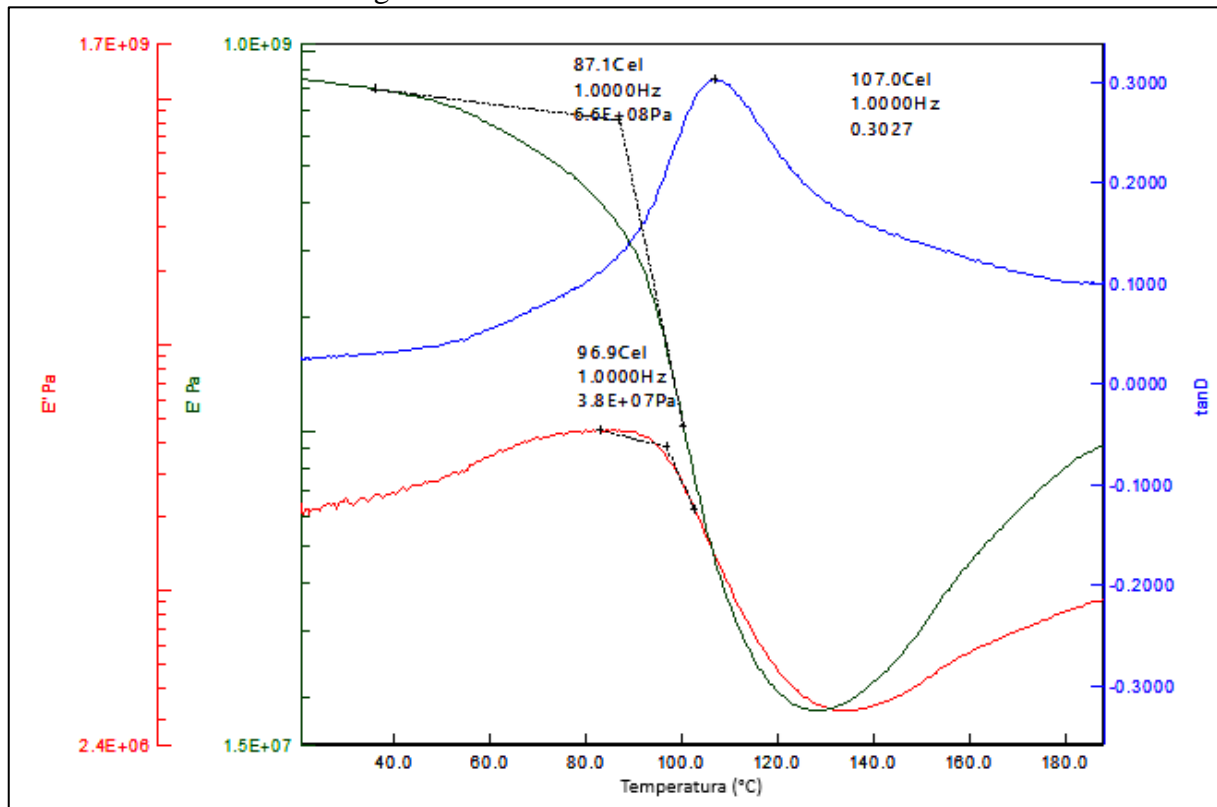
5.1.5 Análise dinâmico-mecânica

Na Figura 63 é apresentado o comportamento viscoelástico da resina furfurílica curada, por meio das curvas de módulos de armazenamento (E'), perda (E'') e amortecimento ($\tan \delta = E''/E'$).

Para a determinação da temperatura de transição vítrea (T_g), foram utilizados os valores da temperatura de *onset* da curva E' e dos picos das curvas de E'' e $\tan \delta$. O valor encontrado para a T_g pelo pico da $\tan \delta$, está próximo dos valores obtidos por Oishi (2013), que estão entre 90 e 100°C dependendo da viscosidade e do pH da resina.

Entretanto, a forma mais conservadora para se determinar a T_g a partir da curva E' , visto que é a primeira a apresentar variações significativas durante a variação da temperatura (ASTM D7028: 2015). Sendo assim, a T_g poder ser considerada como próxima de 87°C.

Figura 63- DMA resina furfurilica curada



Fonte: Autoria própria

5.2 CARACTERIZAÇÃO DOS COMPÓSITOS

5.2.1 Ultrassom

Após a primeira etapa de processamento dos laminados foram realizadas análises de ultrassom. Como não havia um material de referência foi tomado como tal, a transmissão do sinal água-água, o qual foi de 90%. Na Figura 65 são apresentados os resultados de ultrassom dos melhores laminados, sem e com adição de CNT, utilizando diferentes amplitudes de escala.

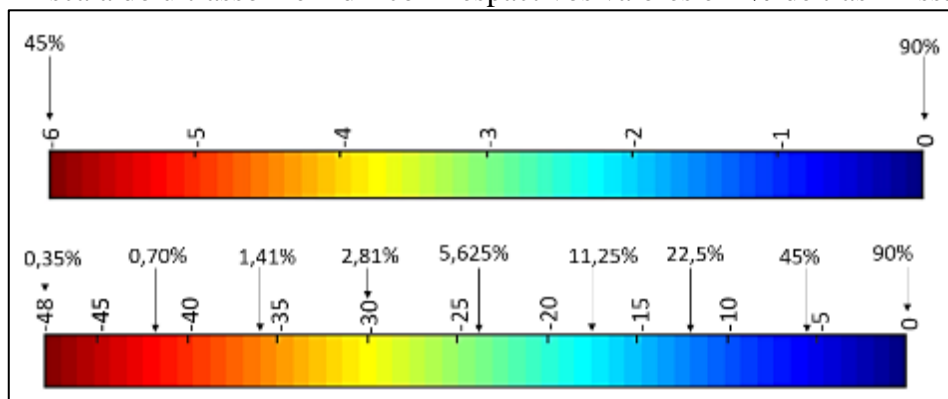
As análises de ultrassom são apresentadas em escala de decibel (dB), o qual é uma ordem de grandezas de mesmo tipo e expressas na mesma medida, por exemplo, a análise de uma potência na entrada e na saída de um sistema de áudio, sendo ambas as medidas em watts (ANDREUCCI, 2014; HOFMANN, 2015).

Vale ressaltar que um resultado em dB, pode expressar o ganho, a atenuação ou a não-alteração de um sinal, ou seja, um valor em dB positivo significa uma razão maior do que 1 (ganho). Um valor negativo indica uma razão menor do que 1 (atenuação) e um valor de zero significa que não há alteração no sinal (ANDREUCCI, 2014; GRAHAM-JONES; SUMMERSCALES, 2016; HOFMANN, 2015; PETERS, 1998).

As Figuras 65a e 65b são do mesmo laminado, mudando apenas a escala, sendo uma até -6 dB e na outra até -48 dB. Essa mudança de escala foi realizada, pois em alguns casos, não foi possível observar nenhuma área com coloração diferente da vermelha.

A escala em dB é logarítmica e nesse caso, pode ser considerado que a cada 6dB o valor da transmissão cai pela metade. Como a referência é de 90% de transmissão de sinal, esse é o valor de 0 dB. Já em -6 dB o valor cai pela metade, ou seja, 45% de transmissão de sinal e assim sucessivamente (Figura 64). Vale salientar que, à medida que se diminuiu o valor de dB, aumentou a atenuação do sinal, conseqüentemente, diminuiu a porcentagem (%) de transmissão de sinal.

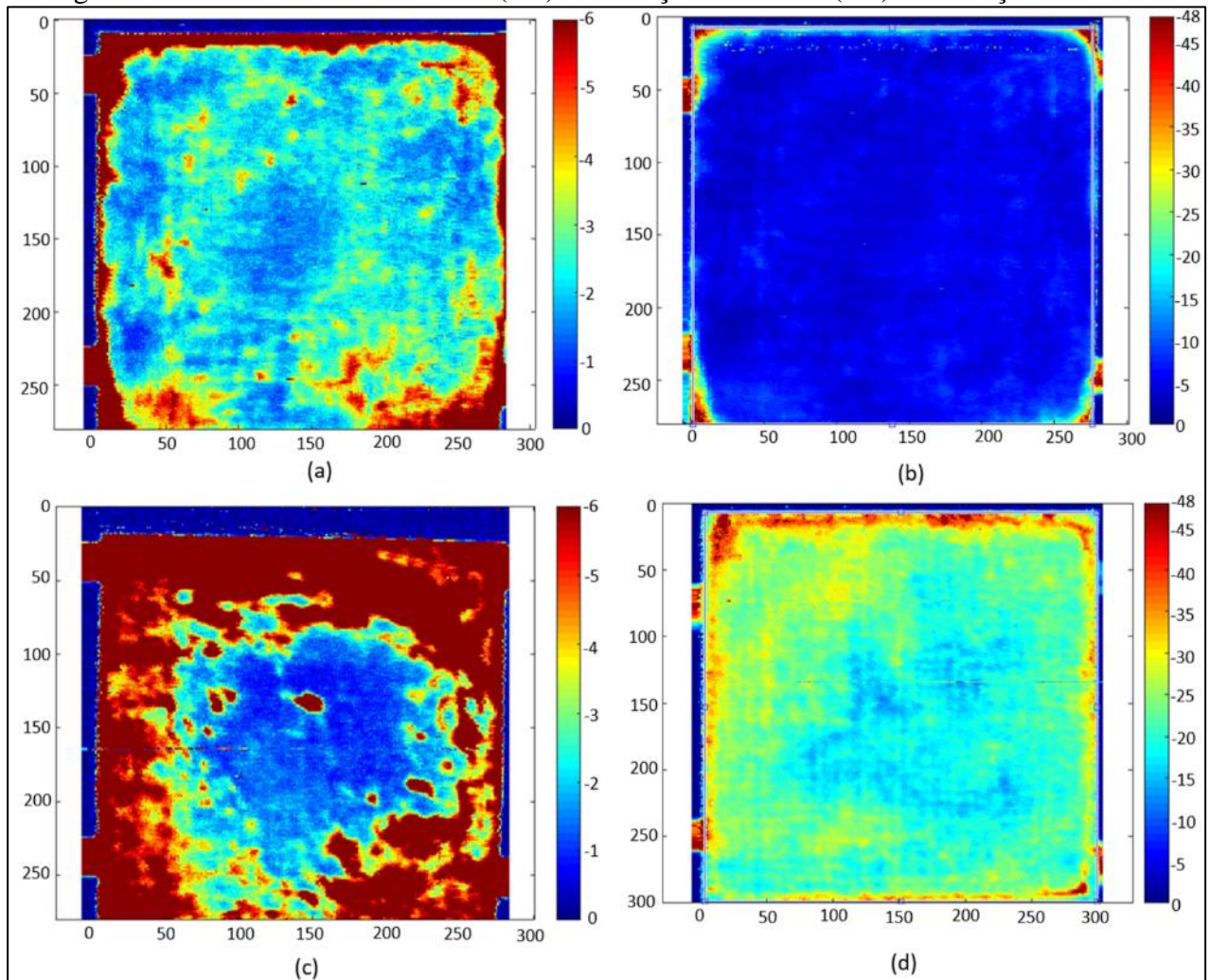
Figura 64- Escala do ultrassom em dB com respectivos valores em % de transmissão de sinal



Fonte: Autoria própria

Por meio das análises, constatou-se que os laminados sem adição de CNT, tiveram atenuação de sinal ultrassônico de aproximadamente -5dB, ou seja, a transmissão do sinal foi próxima a 45%, em relação a água-água. Já os com adição de CNT, atenuação de sinal ultrassônico de ~ -22dB, ou seja, a transmissão do sinal foi próxima de 6%, em relação a água-água. Esses resultados podem ser em razão da porosidade do material e da não dispersão correta dos CNTs. Por isso, foi proposta uma nova forma de processamento dos laminados.

Figura 65- Ultrassom dos laminados (a-b) sem adição de CNT e (c-d) com adição de CNT



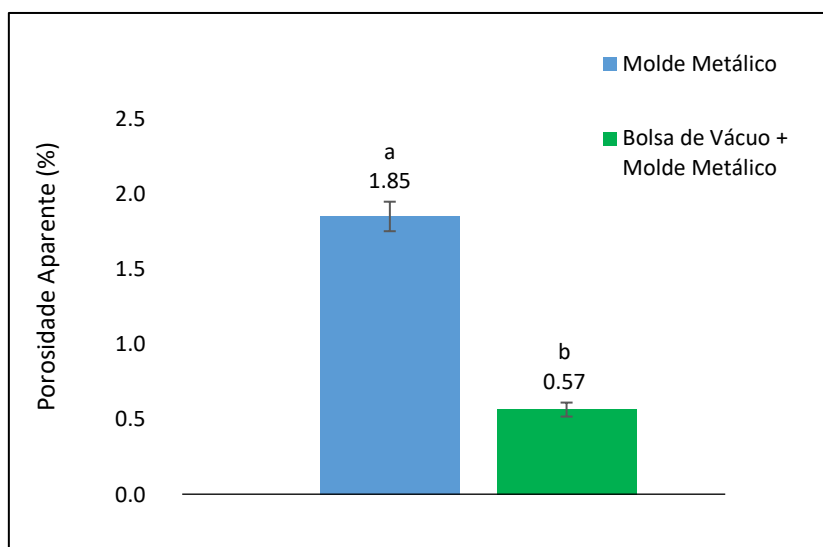
Fonte: Autoria própria

5.2.2 Porosidade

Como forma de compreender como aperfeiçoar o processamento dos laminados foram realizadas somente análises do compósito sem a adição de CNT, devido ao custo dos nanotubos de carbono. Comparando-se os métodos de processamento utilizados observa-se que a combinação de molde com a bolsa de vácuo resultou em menor porosidade em comparação com somente o molde metálico (Figura 66).

Ao analisar o teste de Tukey, o qual é representado pelas letras *a* e *b* sobre as barras, constata-se que há uma diferença estatística entre os métodos de processamento. Vale ressaltar que, a porcentagem de poros pode ser maior, pois o método de Arquimedes só é capaz de detectar a porosidade superficial, visto que os poros não são interconectados.

Figura 66- Porosidade aparente para os laminados sem a adição de CNT



Fonte: Autoria própria

Uma grande dificuldade da utilização de materiais compósitos em aeronaves é a tendência que esse material possui de formar vazios e trincas no interior e na superfície dos componentes. Por isso, é necessário um controle rigoroso do volume de vazios nesse material (COSTA, 2002; MONTORO; CIOFFI, 2015), pois a presença de vazios nos compósitos acarreta na redução das propriedades mecânicas (ANCELOTTI JUNIOR, 2006; ASHIR et al., 2019). A formação, distribuição, localização, formato e tamanho dos vazios dependem de algumas condições de processamento inadequadas, arranjo e distribuição do reforço (unidirecional, bidirecional, etc.) e das características químicas da matriz (ANCELOTTI JUNIOR, 2006; ASHIR et al., 2019; COSTA, 2002). Além disso, devido a matriz polimérica utilizada possuir um alto grau de ligações cruzadas, há muitos poros

Os efeitos da porosidade nas propriedades mecânicas podem ser avaliados de várias maneiras, e principalmente por ensaios mecânicos. Os ensaios mecânicos mais apropriados para tal objetivo, são aqueles em que a matriz tem papel preponderante, ou seja, cisalhamento e compressão (ANCELOTTI JUNIOR, 2006; COSTA, 2002).

5.2.3 Resistência ao cisalhamento interlaminar

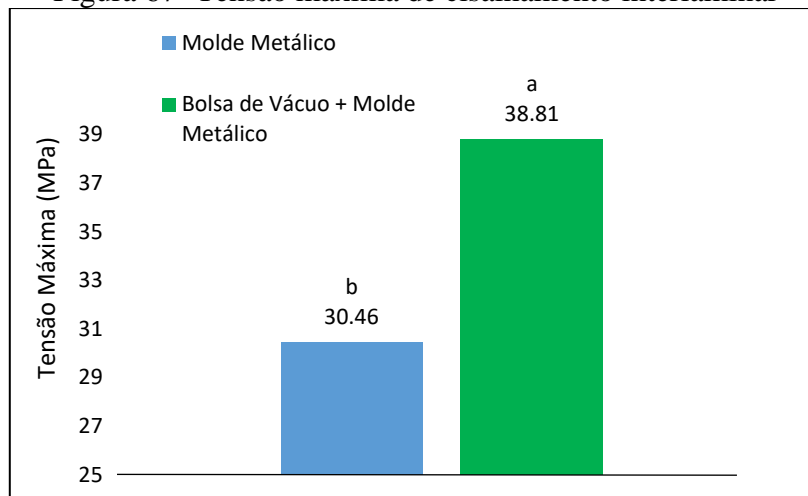
Assim como no caso da porosidade, foram realizadas somente análises de ILSS no compósito sem adição de CNT.

Tendo como base o resultado obtido no processamento com molde metálico, observa-se um aumento de 27,4% na tensão máxima de cisalhamento para o processamento com a combinação

de bolsa de vácuo + molde metálico (Figura 67). Pelo teste de Tukey, verificou-se novamente uma diferença estatística entre os processamentos realizados.

Comparando-se os resultados de porosidade aparente com os de ILSS, pode-se dizer que para a porosidade menor a tensão de cisalhamento nos laminados foi maior. Isso ocorre pelo fato dos poros apresentarem a tendência de se localizarem nas regiões interlaminares e interfaciais, além do que, os vazios normalmente se alinham na direção das fibras, o que compromete a interface fibra/matriz (ANCELOTTI JUNIOR, 2006; COSTA, 2002).

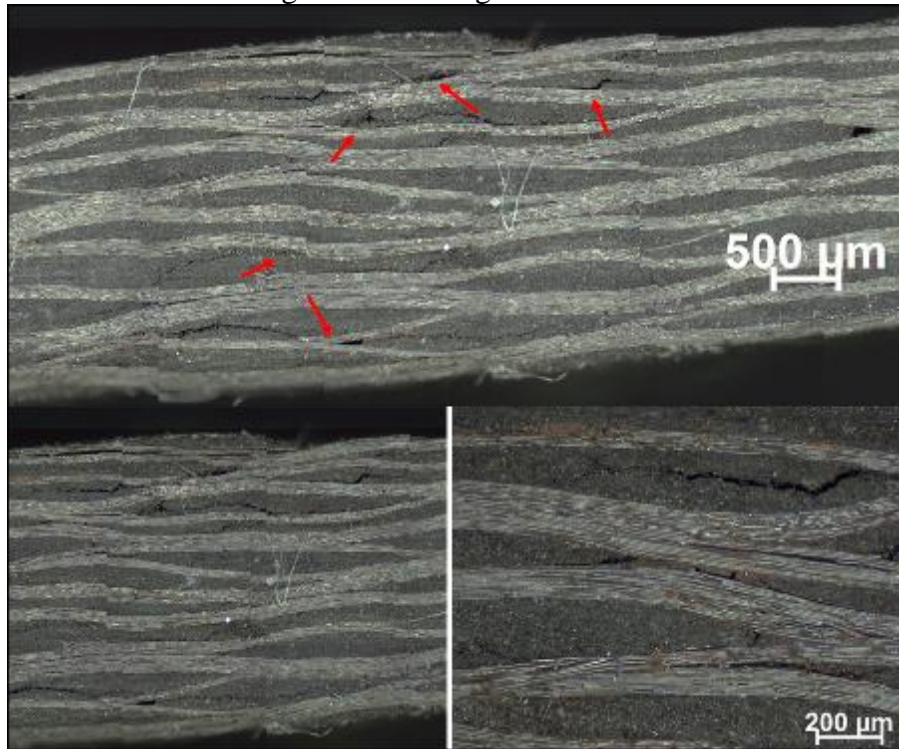
Figura 67- Tensão máxima de cisalhamento interlaminar



Fonte: Autoria própria

Na Figura 68 são apresentadas regiões fraturadas do compósito, onde se pode observar que algumas trincas iniciam a partir de um vazio, o que corrobora com a afirmação realizada por Costa (2002) de que as discontinuidades são geradoras e propagadoras de defeitos. De forma geral, verificou-se que a fratura ocorre pela propagação de delaminações e trincas, que atravessam mechas de fibras, vazios e regiões ricas em resina, o que, segundo Costa (2002), fragiliza o laminado.

Figura 68- Micrografia da falha



Fonte: Autoria própria

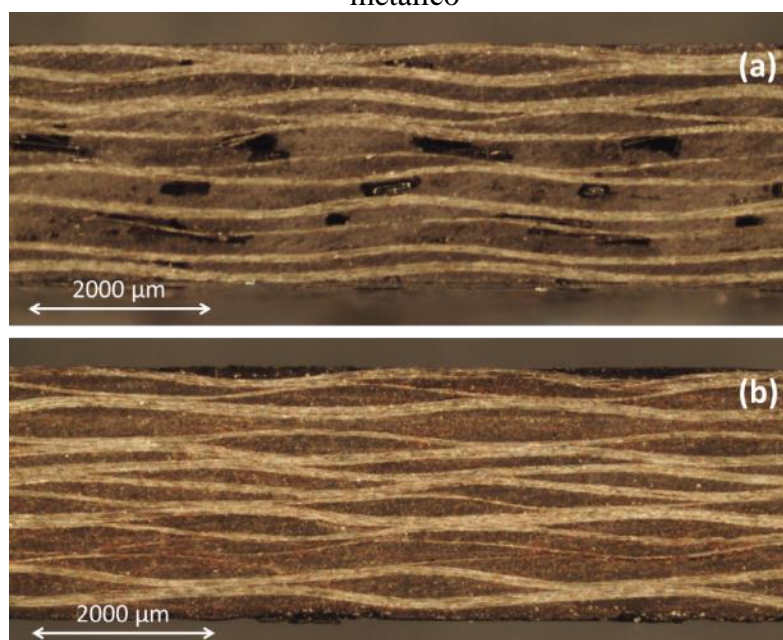
De acordo com Costa (2002), quando os compósitos se tornaram efetivamente uma realidade em aplicações estruturais, a preocupação com a fratura interlaminar aumentou, visto que essa falha é tida como o limitador da vida útil do componente.

Essa falha pode ser intensificada pelo processo de furação, o qual pode causar delaminação e fissuras interlaminares. Sendo assim, um material com elevada porcentagem de vazios quando submetido ao processo de furação, tem maior tendência a esse tipo de falha.

5.2.4 Considerações gerais referentes ao processamento dos compósitos

No decorrer das análises observou-se que a forma inicial com que os laminados foram processados não foi a mais adequada, pois a laminação manual sem a utilização de nenhum equipamento gerou uma grande porosidade (Figura 69), bem como, a distorção das fibras em alguns pontos.

Figura 69 -Aspecto da lateral dos laminados (a) molde metálico e (b) bolsa de vácuo + molde metálico



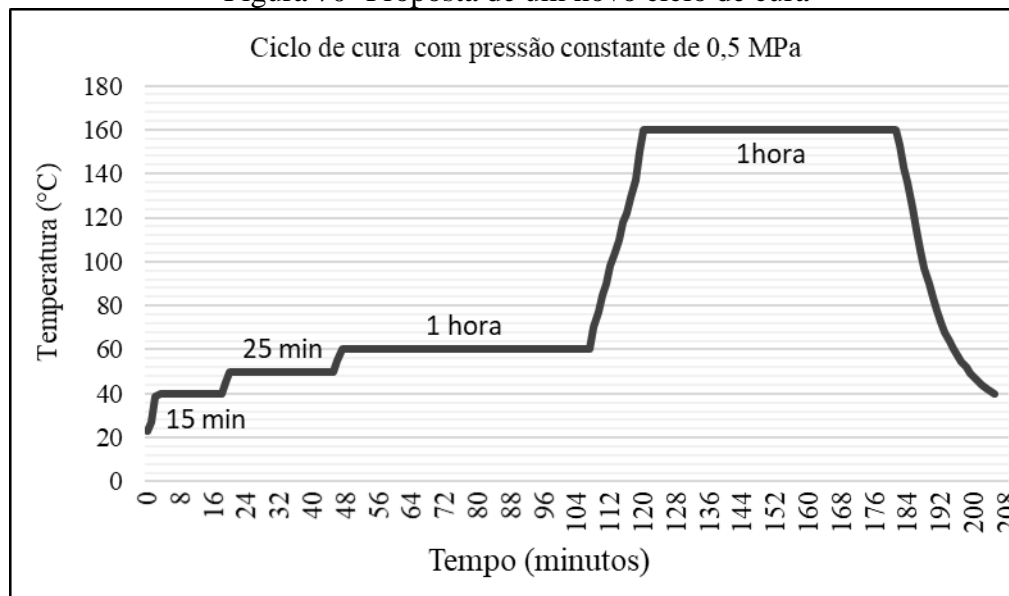
Fonte: Autorial própria

Considerando a validação de uma nova forma de processamento foi utilizado o mesmo ciclo de prensagem inicial e formas diferentes de se realizar a laminação (produção dos *prepregs*) e de realizar a prensagem (utilização da bolsa de vácuo). Com base nos resultados de ILSS e de porosidade, verificou-se que essa nova forma resultou em compósitos melhores.

Com base nos resultados de viscosidade e DSC propõe-se agora a realização de uma terceira etapa de produção dos compósitos utilizando a nova metodologia de laminação e prensagem, mas como um novo ciclo de cura (Figura 70).

Baseando-se nos resultados encontrados até o presente momento, propõe-se um primeiro patamar em 40°C por cerca de 15min, esse patamar seria para que houvesse uma melhor percolação da resina no reforço, o que ajudará a melhorar a consolidação do laminado. O segundo patamar em 50°C com duração de 25min, para uma cura mais lenta, e assim, minimizar a saída de voláteis e diminuir as chances de formação de bolhas. Um terceiro patamar em 60°C com duração de 1h, para não causar tensões residuais no laminado devido ao processo de cura acelerada, fato este que pode ter ocorrido nas placas processadas com patamar inicial de 80°C. E para garantir a cura, um quarto patamar em 160°C por 1h.

Figura 70- Proposta de um novo ciclo de cura



Fonte: Autoria própria

Os valores propostos para o novo ciclo de cura, se baseiam nos resultados obtidos na caracterização da resina furfúrica sintetizada. Porém para verificar se os valores propostos estão corretos é necessário a realização de análises de DSC isotérmico nas temperaturas sugeridas.

5.3 ESTUDO DA FURAÇÃO

Para o estudo da usinagem, optou-se pela utilização de métodos lineares e interações de segunda ordem, pois à medida que o número de fatores cresce em um experimento fatorial, o número de efeitos que podem ser estimados também cresce, o que gera uma dificuldade de interpretação das interações de alta ordem.

Nesses casos deve-se aplicar o princípio da esparsidade dos efeitos³, ou seja, o sistema geralmente é dominado pelos efeitos principais e pelas interações de baixa de ordem, e as interações de terceira ordem ou superiores geralmente são negligenciadas. Isso porque, à medida que o número de fatores aumenta, a visualização das interações fica cada vez mais difícil de ser interpretada (MAYER, 2017; MONTGOMERY, 2013).

Existem outras formas de se analisar quatro ou mais fatores, como a realização de um experimento sem réplicas, e então combinar as interações de ordem alta como a estimativa do erro. No entanto, se eventualmente alguma interação de alta ordem for significativa, então esse procedimento não é adequado (MONTGOMERY, 2017; RUSHING; KARL; WISNOWSKI, 2013).

³ Princípio da Esparsidade: à medida que o número de fatores aumenta em um experimento, o número de efeitos estimáveis também aumenta

Porém, como o material compósito possui uma grande heterogeneidade, optou-se por correr três réplicas e analisar somente os efeitos principais e as interações de segunda ordem. Sendo assim, para cada modelo foi considerado o melhor ajuste, com base no desvio padrão, R^2 , R^2 ajustado e R^2 predito.

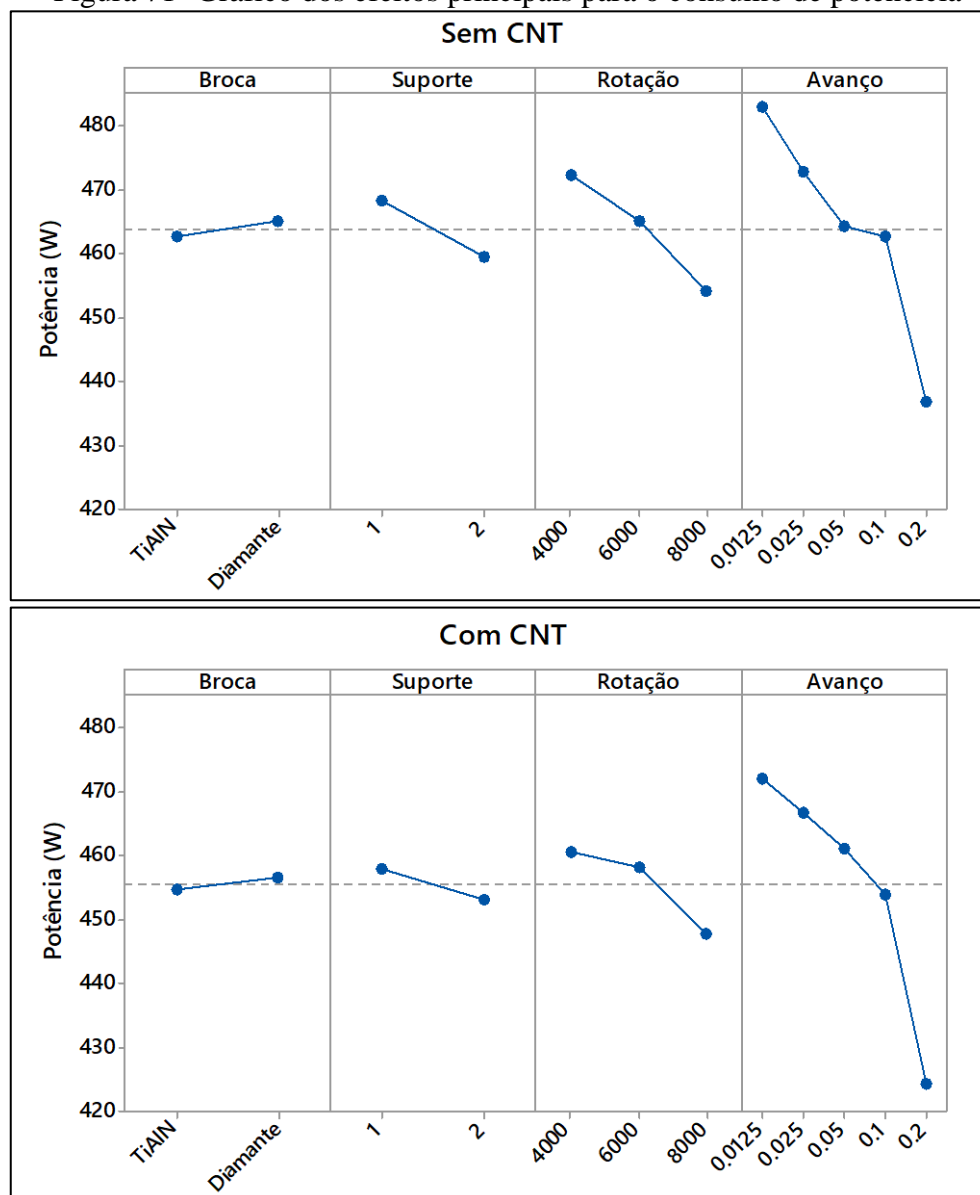
5.3.1 Potência consumida

Para compreender como cada fator analisado influencia na variável de saída, foi analisado o gráfico dos efeitos principais. Esse gráfico apresenta as médias de cada grupo dentro de uma variável categórica, e ao analisar a inclinação da reta, é possível compreender como as variáveis de saída são afetados pelos parâmetros escolhidos.

Ao analisar o gráfico dos efeitos principais para o consumo de potência (Figura 71), observa-se que os fatores são afetados de forma semelhante em ambos os materiais. Avaliando a inclinação das retas, nota-se que o fator broca foi o que menos influente, pois a inclinação da reta está quase paralela ao eixo x, o que indica que pode não haver nenhum efeito principal presente, ou seja, a média da resposta é semelhante em todos os níveis do fator. De forma geral, as brocas revestidas com TiAlN consumiram menos potência.

Graficamente, observa-se que à medida que se aumentou a rotação e o avanço houve uma queda no consumo da potência, e que a utilização do suporte 2 demandou menor potência.

Figura 71- Gráfico dos efeitos principais para o consumo de potência

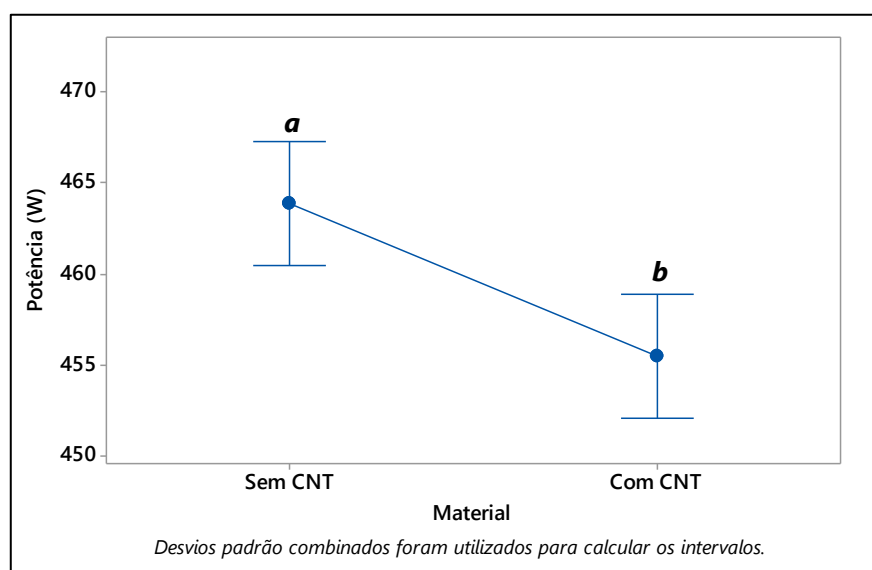


Fonte: Autoria própria

Ao analisar os efeitos dos materiais estudados sobre o consumo de potência (Figura 72), observa-se que os laminados com adição de CNT consomem menos potência que os sem CNT. Entretanto ao comparar as médias de cada material verifica-se que a diferença é de apenas 8,34W.

Essa pequena diferença pode estar ligada a diversos fatores, como a uma possível mudança na pressão específica de corte (k_s), devido a adição dos nanotubos, visto que segundo Machado et al. (2009) e Diniz, Marcondes e Coppini (2013), dentre vários fatores, variar o material da peça usinada muda a dinâmica de corte.

Figura 72- Gráfico do efeito dos materiais sobre a potência consumida



Fonte: Autoria própria

Por meio da análise estatística (Tabelas 10 e 11 - Apêndice A), observou-se que, além do tipo de material, quase todos os outros fatores foram significativos para o consumo de potência, sendo o fator broca a exceção, como previsto pelo gráfico dos efeitos principais. O fator principal que mais contribuiu para o resultado final foi o avanço seguido pela rotação, e o menos influente foi o tipo de suporte usado. Juntos esses fatores contribuíram com ~52% para os laminados sem CNT e ~66% para os laminados com CNT, o que mostra que a adição de CNT faz com que o material seja afetado de formas diferentes.

Pela análise do teste de Tukey, observa-se que a rotação de 8000 rpm diferiu das demais. Além disso, o aumento do avanço resultou em um acréscimo gradativo do consumo de potência, e que em 0,2 mm/rot há uma queda abrupta na potência. Sendo assim, a combinação desses dois fatores resultaria em menor potência.

A diminuição no consumo de potência nessa condição está ligada ao aumento da temperatura na zona de corte. Segundo Kalpakjian (2007) a energia consumida na usinagem é transformada principalmente em calor, do qual parte é transportado pelo cavaco e o restante é dividido entre a ferramenta e a peça de trabalho. Esse calor é gerado devido ao atrito que ocorre entre a ferramenta e o material.

Na usinagem de compósitos poliméricos não é comum o uso de fluido refrigerante por diversos motivos, como a absorção do fluido pela fibra e reação química entre a resina e o fluido (GARA; M'HAMED; TSOUMAREV, 2018). Em seus estudos Weinert e Kempmann (2004) confirmaram esses fenômenos e acrescentaram que o uso de fluido refrigerante pode gerar erros de precisão na peça, mas que usar sem ele pode causar danos térmicos à matriz. Fu et al

(2018) complementam que os fluidos tradicionais geralmente interagem fisicamente e/ou quimicamente com os compósitos, levando a erros de usinagem indesejáveis, além do enfraquecimento da capacidade de carga do laminado.

Devido a não utilização de fluidos e a baixa condutividade térmica e baixo calor específico do laminado, há um acúmulo de calor na zona de corte. Isso acarreta no aumento da temperatura do material, causando um amolecimento da matriz polimérica, o que apesar de prejudicial, facilita o corte (ABRÃO et al., 2007; HOCHENG; TSAO; CHEN, 2016; TAN; AZMI; MUHAMMAD, 2016).

Em geral, ao aumentar a rotação, para avanços constantes, há o aumento da temperatura devido ao atrito entre a ferramenta e o material. Já no caso do aumento do avanço, há uma diminuição no comprimento de corte. Desse ponto de vista, ocorreria um menor tempo de atrito da superfície de folga e da aresta de corte lateral (guia), conseqüentemente, menor geração de calor (GARA; M'HAMED; TSOUMAREV, 2018; WEINERT; KEMPMANN, 2004). Entretanto, segundo Weinert e Kempmann (2004), elevados avanços acarretam em uma espessura de corte maior, causando maior transformação de energia dentro da zona de cisalhamento. Desta forma, o efeito de menos atrito é compensado pelo processo de cisalhamento do material. Esse fenômeno foi comprovado por Alsaeed e Yousif (2014), que constataram que o aumento da rotação e do avanço acarreta em um menor consumo de potência.

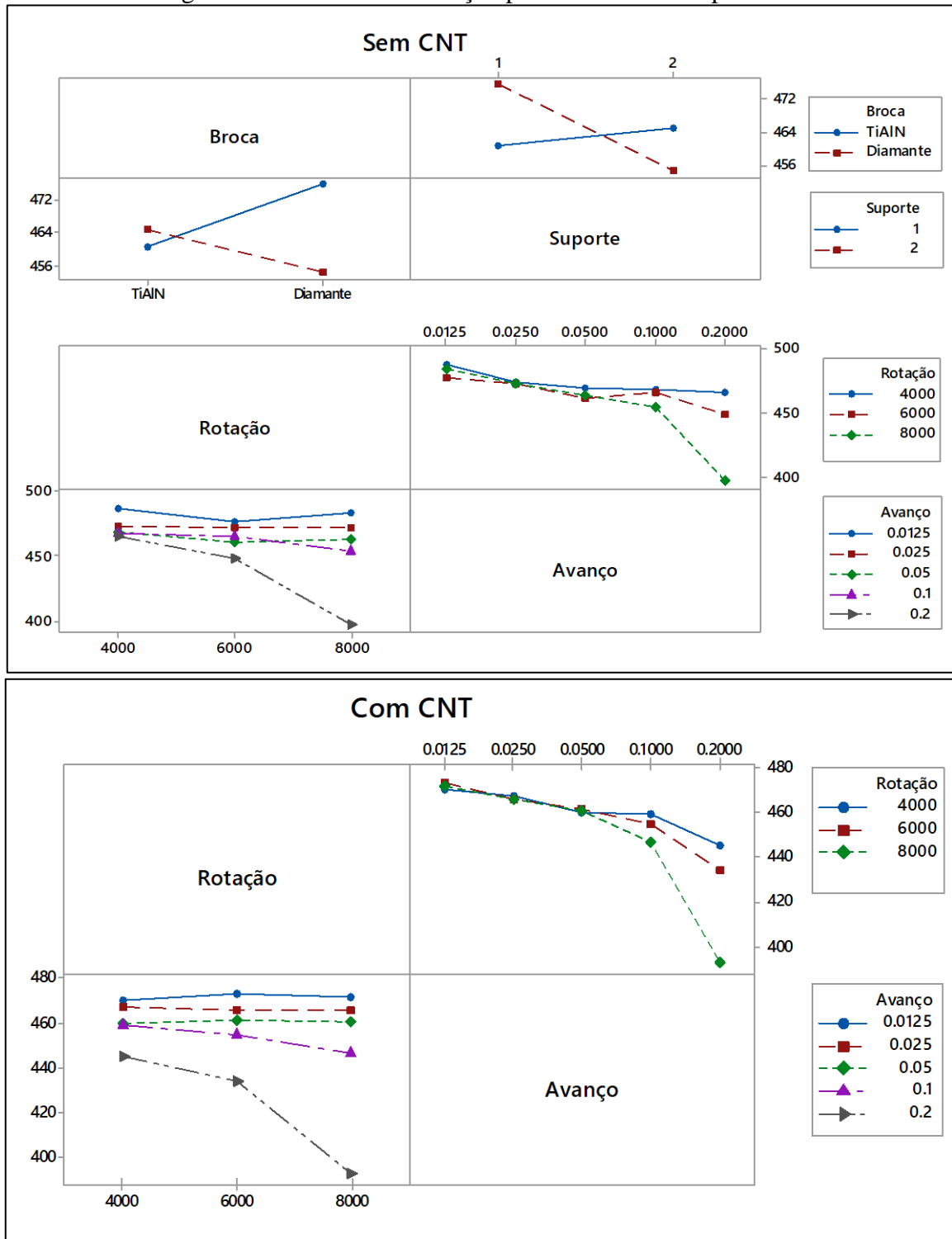
Com relação as interações, quase todas se mostraram influentes no resultado final, entretanto a maior parte teve uma contribuição de menos de 2%. As que mais contribuíram com o resultado final foram broca*suporte e rotação*avanço, para o laminado sem CNT. Já para os laminados com CNT o único que teve contribuição considerável foi rotação*avanço.

Ao analisar os gráficos de interação para os laminados sem CNT (Figura 73), nota-se que apesar do fator principal broca não ter influência significativa nos resultados, a sua interação com o suporte é estatisticamente significativa, tanto pelo gráfico como pelo teste de Tukey. Observa-se que quando utilizado a broca de TiAlN não há diferença entre os suportes, mas para a broca diamantada há uma influência do tipo de suporte utilizado.

Com relação ao suporte, uma hipótese para o ocorrido é em relação a rigidez do apoio utilizado em cada um dos suportes. No suporte 1, o apoio utilizado foi um material compósito e no suporte 2 o próprio aço do suporte (Figura 53), o que torna o apoio 1 menos rígido que o 2, e isso pode ter favorecido a flexão durante a furação. Já o revestimento da broca, em geral, o uso de ferramenta diamantada é melhor, entretanto nesse estudo nota-se que o tipo de suporte influencia no tipo de revestimento que deve ser utilizado para um melhor resultado.

Ao analisar a interação rotação*avanço, para ambos os materiais, nota-se que 8000rpm*0,2mm/rot apresenta um comportamento diferente das demais. Dentre as outras combinações, graficamente, observa-se uma semelhança entre os resultados, a qual, pelo teste de Tukey, ocorre porque muitas combinações não possuem diferença estatística entre elas.

Figura 73- Gráfico de interação para o consumo de potência



Fonte: Autoria própria

Como forma de compreender melhor a distribuição dos dados, foram plotados os gráficos de valor individual, adicionando medidas de tendência central e desvio padrão (Figura 74).

Através das médias (losango azul) e das medianas (losango preto) é possível compreender a tendência central de um conjunto de números. Pela comparação desses dois valores pode-se observar se há *outliers*, ou seja, valores discrepantes. Isso ocorre, pois, a média é influenciada por valores individuais que são muito maiores ou menores do que o resto. Já a mediana é tida como o ponto central de uma sequência. Assim, quando compara-se esses dois valores podemos observar se existem *outliers* na amostra analisada. De forma geral, os resultados apresentaram valores de média e de mediana próximos, o que indica que não houve *outliers* nos resultados obtidos.

Analisando a distribuição dos valores individuais (pontos verdes, laranjas e vermelhos), observa-se que os laminados com adição de CNT possuem menor variabilidade dos dados que os sem CNT.

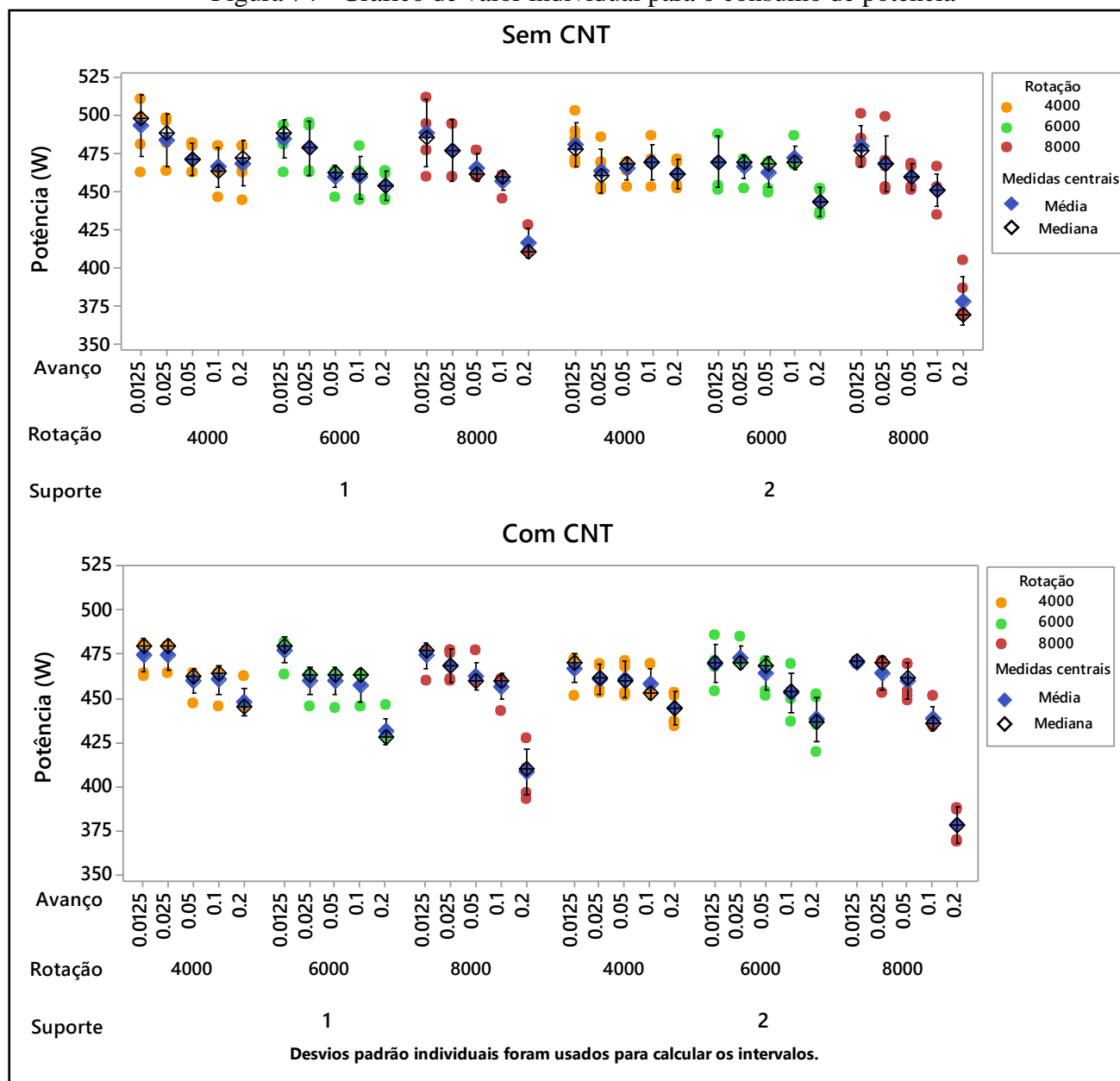
É possível constatar que independente do suporte e da rotação utilizada, para o laminado sem CNT, os valores de avanço mais baixos (0,0125 e 0,025 mm/rot) geraram maior consumo de potência. Já nos avanços mais altos (0,1 e 0,2 mm/rot) o único que diferencia dos demais é 0,2mm/rot em 8000 rpm. Nos laminados com CNT ocorreu fenômeno semelhante, sendo que há uma clara tendência de queda no consumo de potência à medida que se aumentou o avanço.

O desvio padrão diz quão fortemente seus dados estão agrupados em torno da média, ou seja, um desvio padrão pequeno indica que seus dados estão bem agrupados já um desvio padrão grande diz que seus dados estão mais espalhados. O desvio padrão é forma de mensurar a dispersão dos dados.

Partindo desse princípio, ao analisar o desvio padrão do consumo de potência, representado pelas barras (\square) verifica-se que, para os laminados sem adição de CNT, os menores desvios ocorreram para o avanço de 0,05mm/rot e os maiores desvios ocorreram no avanço 0,0125mm/rot. Com esses resultados nota-se que para se obter resultados mais robustos de potência é necessário utilizar avanços mais elevados.

Para o laminado com adição de CNT o desvio padrão foi mais uniforme, destacando-se as combinações do avanço de 0,02 mm/rot com 8000 rpm no suporte 1 e com 6000 rpm no suporte 2, sendo que em ambos os casos ocorreu os maiores desvios. Já em 8000 rpm com 0,0125mm/rot no segundo suporte o desvio foi praticamente nulo, assim como a distribuição dos dados, o que torna esse resultado o mais robusto dentre todos.

Figura 74- Gráfico de valor individual para o consumo de potência



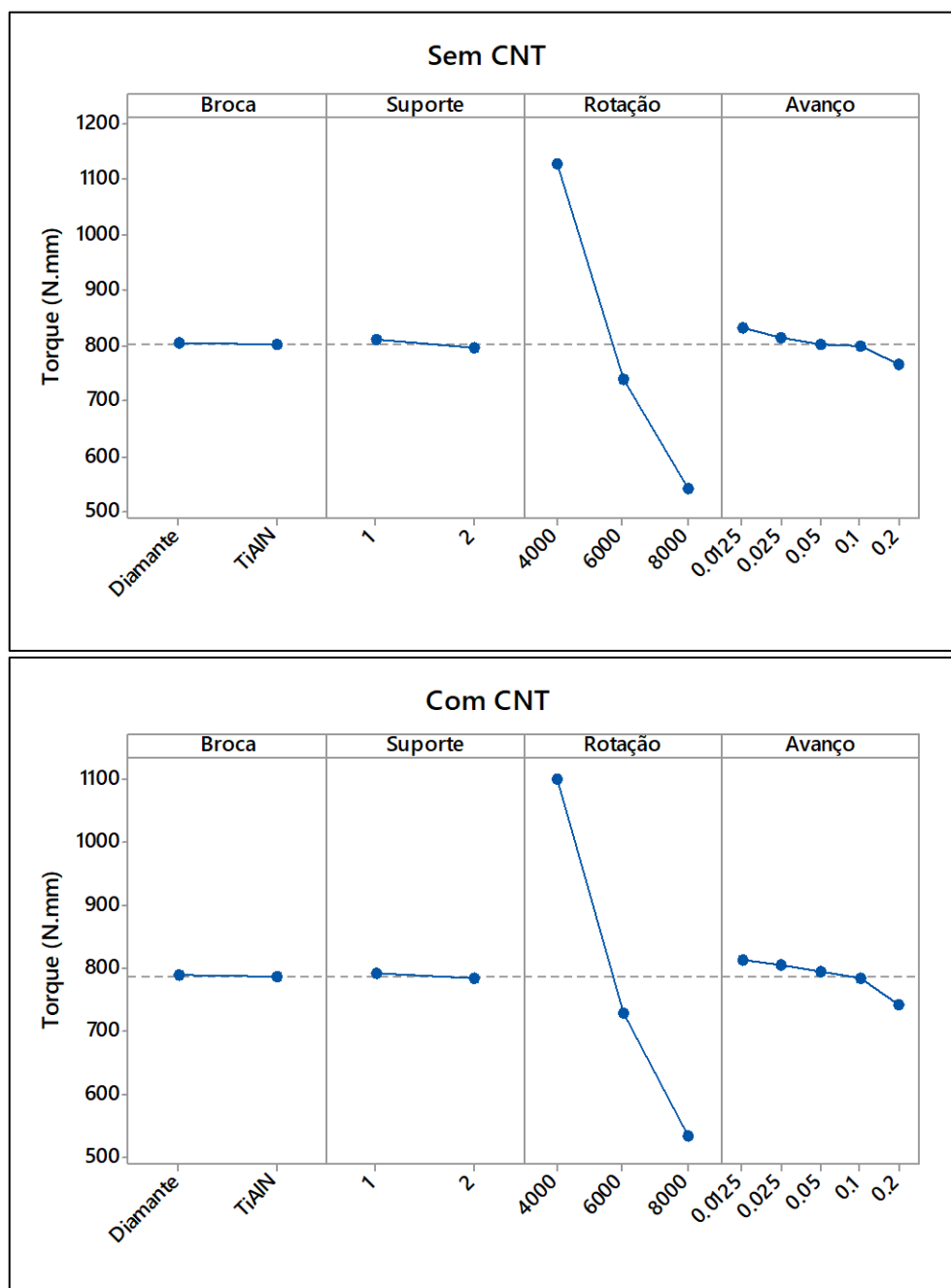
Fonte: Autoria própria

Há pouquíssimos trabalhos sobre furação de compósitos estruturais que estudaram a influência da potência na qualidade dos furos (ALSAEED; YOUSIF, 2014; DAVID-MÜZEL et al., 2020; DAVIM; REIS, 2003b). Nesses estudos a potência apresentou uma relação direta de aumento com o avanço, porém para a rotação houve um comportamento variado. Comparando esses trabalhos com o presente estudo, levanta-se a hipótese que para rotações mais baixas (até 3200 rpm) avanços mais baixos são melhores (até 0,05 mm/rot), já para rotações mais elevadas (acima de 4000 rpm) o ideal são avanços mais altos (acima da 0,05 mm/rot).

5.3.2 Torque

Por meio dos gráficos dos efeitos principais para o torque (Figura 75) verifica-se que, em ambos os materiais, o fator que se mostrou mais influente foi a rotação, sendo que o aumento da mesma gerou a diminuição do torque.

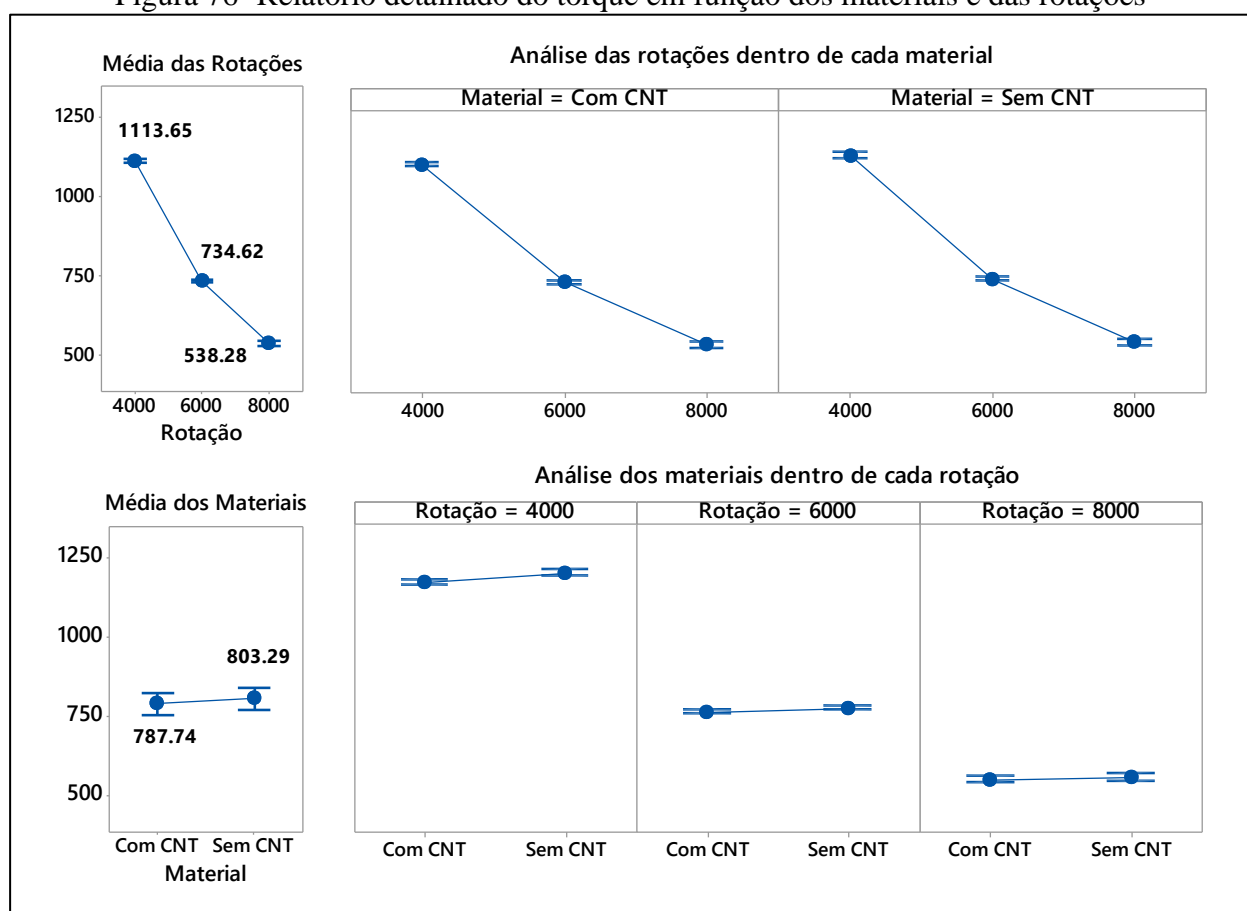
Figura 75- Gráfico dos efeitos principais para o torque



Fonte: Autoria própria

Devido à grande contribuição da rotação para o resultado final, ao realizar uma análise de efeitos principais tradicional para os materiais estudados, como foi na potência, teríamos uma visão errônea do resultado. Ao analisar em separado, ou seja, analisando o material dentro de cada rotação e vice-versa, nota-se que os valores médios entre os materiais são semelhantes, sendo que para laminados com adição de CNT o torque foi menor. A contribuição do material para o resultado é de 0,01% (Figura 76).

Figura 76- Relatório detalhado do torque em função dos materiais e das rotações



Fonte: Autoria própria

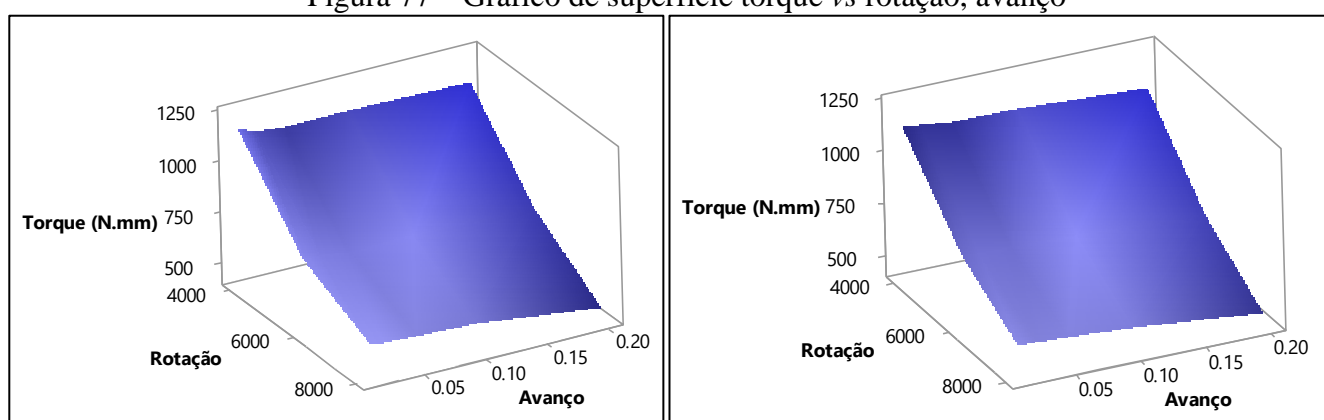
Por meio da análise estatística (Tabelas 12 e 13 – Apêndice A), verificou-se quase todos os fatores foram influentes, entretanto a rotação contribuiu com 98% para o resultado obtido, para ambos os materiais. Pela análise do teste de Tukey verificou-se todas as rotações diferiram entre si.

Isso ocorre porque, com o aumento da rotação a sessão transversal de corte diminui, consequentemente a resistência imposta pelo material ao corte diminui e com isso o torque também diminui. Além disso, segundo Anarghya et al. (2018), conforme a rotação aumenta ocorre um

aumento na temperatura, devido ao atrito entre o material e a aresta de corte, o que gera um amolecimento da matriz, resultando em menor quantidade de material preso à broca e menor deterioração da superfície usinada.

Com relação as interações, a maior parte delas se mostram influentes, porém apresentaram menos de 0,3% de contribuição, sendo que a de maior contribuição foi a rotação*avanço. Para compreender melhor como essa interação afeta o torque foi plotado um gráfico de superfície (Figura 77), no qual é possível observar que o torque diminui conforme se aumenta a rotação e o avanço, resultado esse que está de acordo com o obtido por Anarghya et al. (2018).

Figura 77 – Gráfico de superfície torque vs rotação, avanço

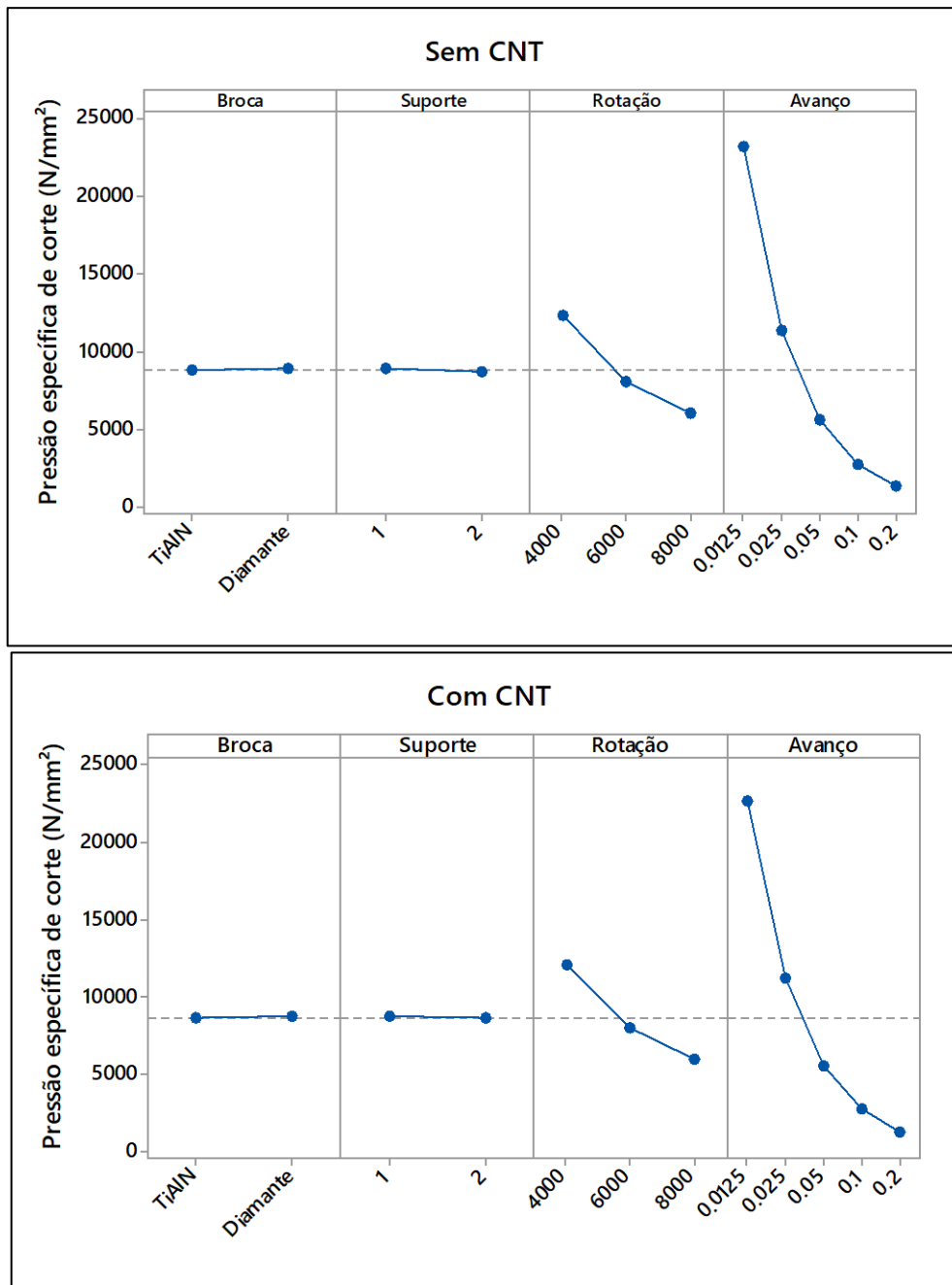


Fonte: Autoria própria

5.3.3 Pressão específica de corte

Ao analisar o gráfico dos efeitos principais para a pressão específica de corte (Figura 78), observa-se que os fatores que mais demonstram ter influência foram a rotação e o avanço, para ambos os materiais.

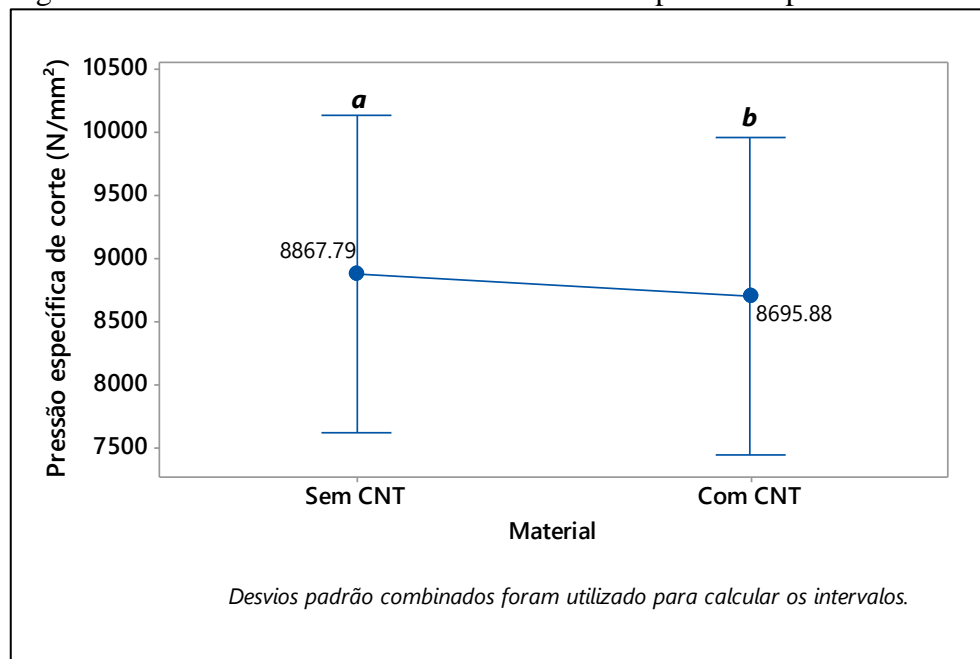
Figura 78- Gráfico dos efeitos principais para a pressão específica de corte



Fonte: Autoria própria

Ao analisar os efeitos dos materiais estudados sobre a k_s (Figura 79), observa-se que os valores médios dos efeitos são estatisticamente diferentes, porém a contribuição do material é de apenas 0,01% para o resultado final.

Figura 79- Gráfico do efeito dos materiais sobre a pressão específica de corte



Fonte: Autoria própria

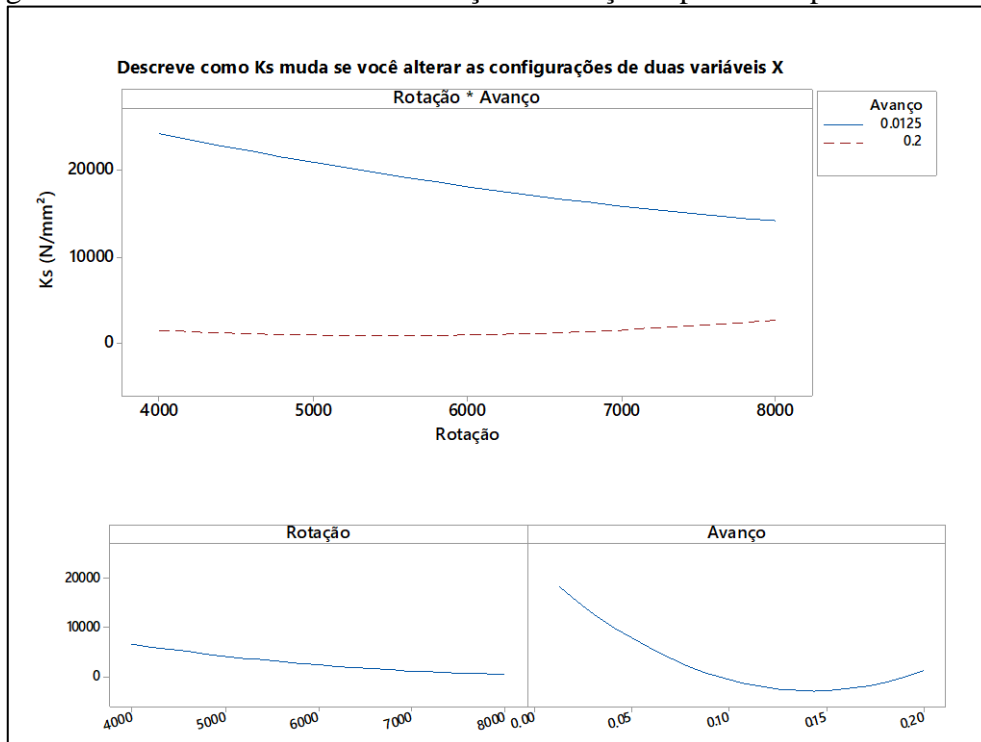
Por meio da análise estatística (Tabelas 14 e 15 – Apêndice A), verificou-se que os fatores que mais contribuíram foram a rotação e o avanço e a interação rotação*avanço. Sendo que o avanço foi o fator que teve maior influência no resultado final. Segundo Davim e Reis (2003b) isso ocorre porque é o parâmetro de corte que tem a maior influência física na k_s .

Por meio do relatório de efeitos (Figura 80) é possível observar como a k_s muda quando é alterado os valores da rotação e avanço. Comportamento esse que é confirmado por meio do gráfico de interações (Figura 81), no qual observa-se esse comportamento de diminuição da k_s em forma de uma curva decrescente à medida que se aumenta o valor de avanço e uma queda mais linear à medida que se aumenta o valor da rotação.

Esse resultado está de acordo como encontrado por Davim e Reis (2003b), os autores notaram que o aumento da rotação e do avanço fez com que a k_s diminuísse. Além disso, segundo Alsaeed e Yousif (2014) a redução da k_s indica uma fácil remoção de material com baixo impacto sobre o ferramenta de corte.

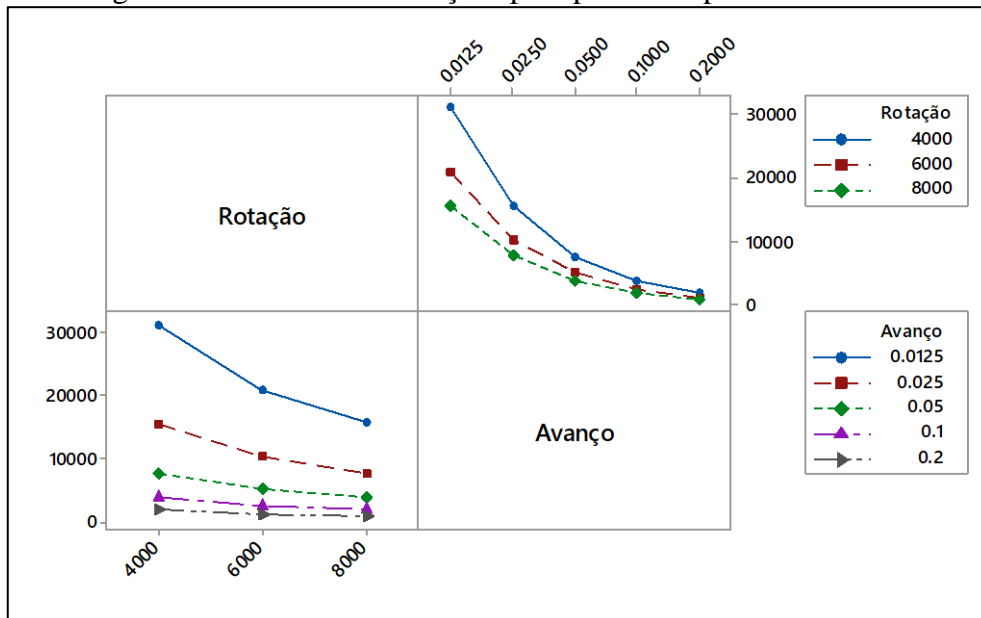
Pelo teste de Tukey verifica-se que a combinação de 4000 rpm com 0.0125 mm/rot foi a que gerou uma maior k_s , sendo um valor médio de 32447,7 N/mm² para os sem CNT e 31332,4 N/mm² para com CNT. Já a combinação que gerou a menor k_s foi 8000 rpm com 0.2 mm/rot, sendo os valores médios de 826,2 N/mm² para o laminado sem CNT e 817,3 N/mm² para o laminado com CNT.

Figura 80- Relatório de efeitos da rotação e avanço na pressão específica de corte



Fonte: Autoria própria

Figura 81- Gráfico de interações para pressão específica de corte



Fonte: Autoria própria

Fazendo uma comparação desses resultados com o consumo de potência, visto que a k_s afeta a potência, observa-se que em ambos os casos a rotação de 8000 rpm e o avanço de 0.2 mm/rot foi a combinação que apresentou menores resultados, isso porque a temperatura gerada durante o processo influencia nas propriedades do material, como a resistência mecânica, o que facilitou o corte.

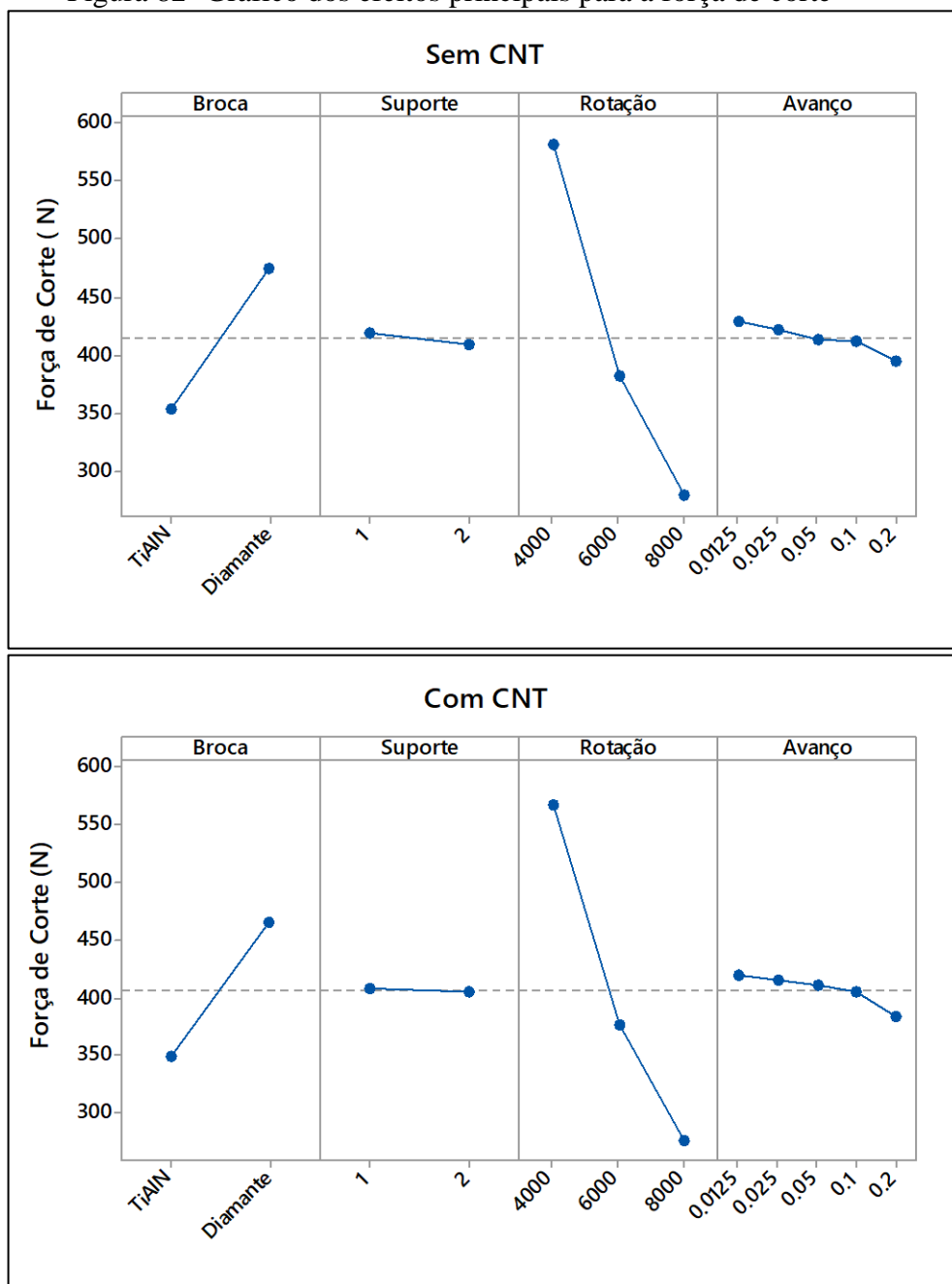
A hipótese da influência do tipo de material na potência, vem a partir das afirmações de Machado et al. (2009) e Diniz, Marcondes e Coppini (2013) e do estudo de Alsaeed e Yousif (2014). De acordo com Machado et al. (2009) e Diniz, Marcondes e Coppini (2013) a pressão específica de corte é afetada por diversos fatores, sendo um deles o material usinado. Essas afirmações são feitas com relação aos materiais metálicos, entretanto Alsaeed e Yousif (2014), observaram que o mesmo ocorreu em seu estudo com epóxi/fibra de vidro.

Por meio das análises realizadas verifica-se que realmente há uma pequena diferença entre as k_s , o que provavelmente fez com que os materiais fossem afetados de formas diferente pelos parâmetros de corte.

5.3.4 Força de corte

Ao analisar o gráfico dos efeitos principais para o consumo de potência (Figura 82), observa-se que os fatores que mais demonstram ter influência na força de corte são a broca e a rotação, devida a inclinação a retas. De forma geral, o comportamento dos fatores é semelhante em ambos os materiais.

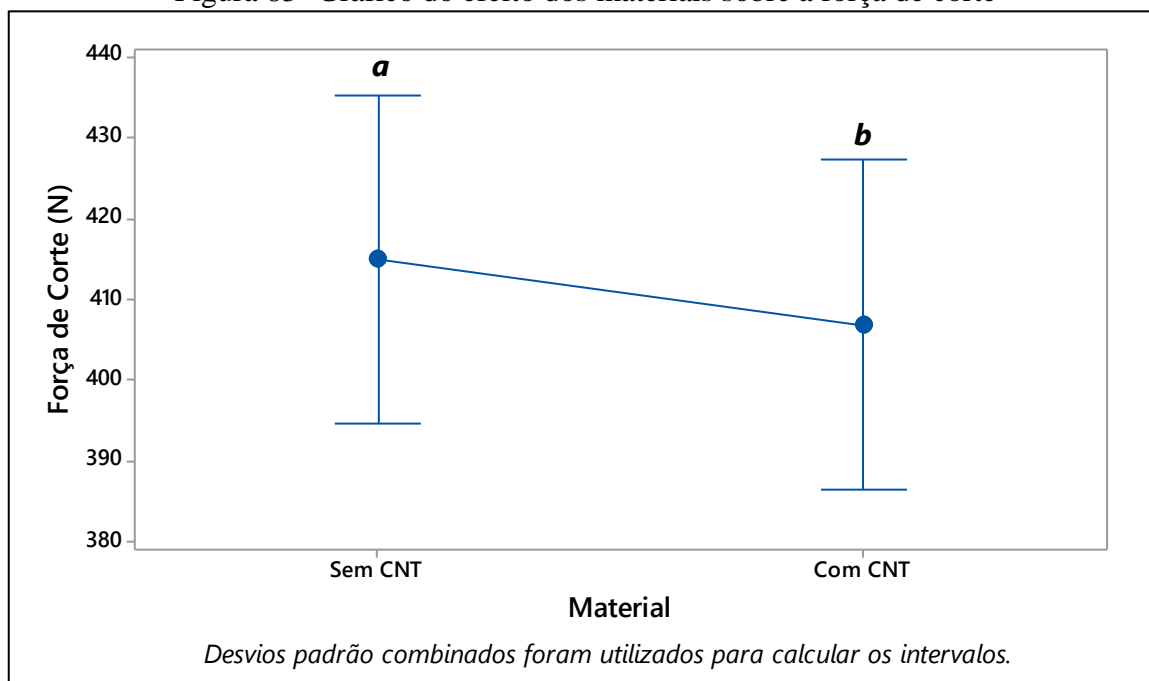
Figura 82- Gráfico dos efeitos principais para a força de corte



Fonte: Autoria própria

Ao analisar os efeitos dos materiais estudados sobre a força de corte (Figura 83), observa-se que os laminados com adição de CNT geraram um menor força de corte, a qual estatisticamente foi significativa, porém a contribuição do material no resultado é de 0,09%.

Figura 83- Gráfico do efeito dos materiais sobre a força de corte



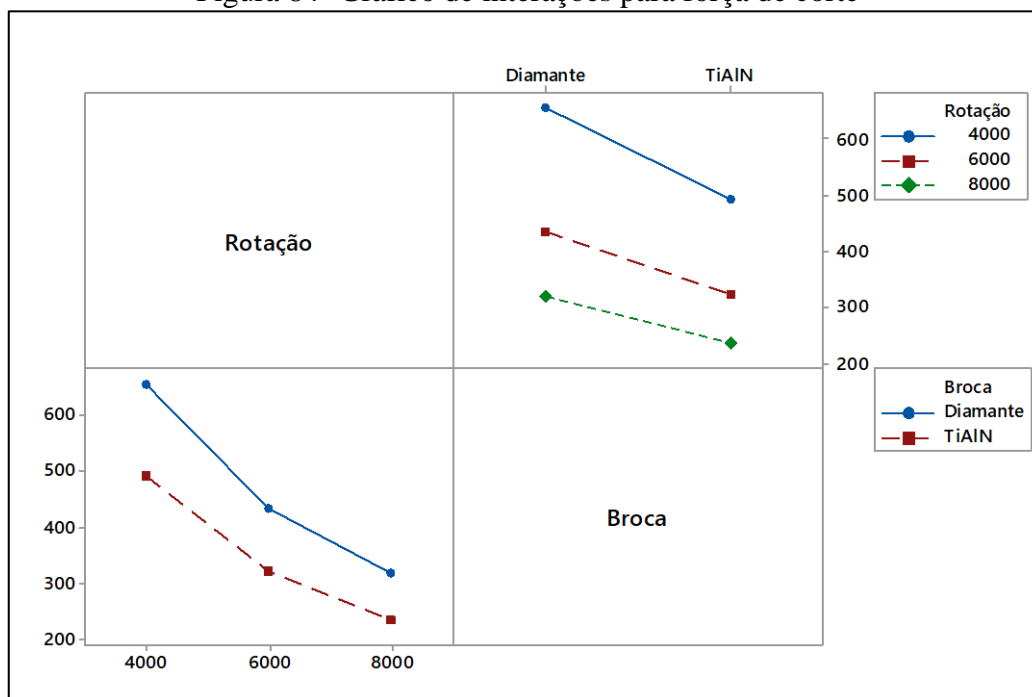
Fonte: Autoria própria

Por meio da análise estatística (Tabelas 16 e 17 – Apêndice A), verifica-se que todos os fatores foram significantes, assim como quase todas as interações. Entretanto os fatores broca e rotação juntos contribuem com 96,57% para o resultado obtido. Além disso, a interação entre esses dois fatores é a única que contribui com mais de 1%.

Por meio do gráfico de interações para força de corte (Figura 84), observa-se uma diminuição da força de corte, com o aumento da rotação, a qual novamente está ligado ao aumento da temperatura, visto que isso facilita o corte, conseqüentemente, diminui a força necessária para o corte. Já em relação ao tipo de broca utilizado, o resultado obtido está relacionado com o perfil geométrico das brocas utilizadas, sendo que as brocas multifacetadas possuem uma maior área da sessão transversal de corte, que a helicoidal, o que faz com que haja um aumento da força de corte.

Esse resultado está de acordo com o citado por Mkaddem, Demirci e Mansori (2008), pois segundo os relatos desses autores, a orientação das fibras e a geometria das ferramentas são os parâmetros que mais influencia na força de corte.

Figura 84- Gráfico de interações para força de corte

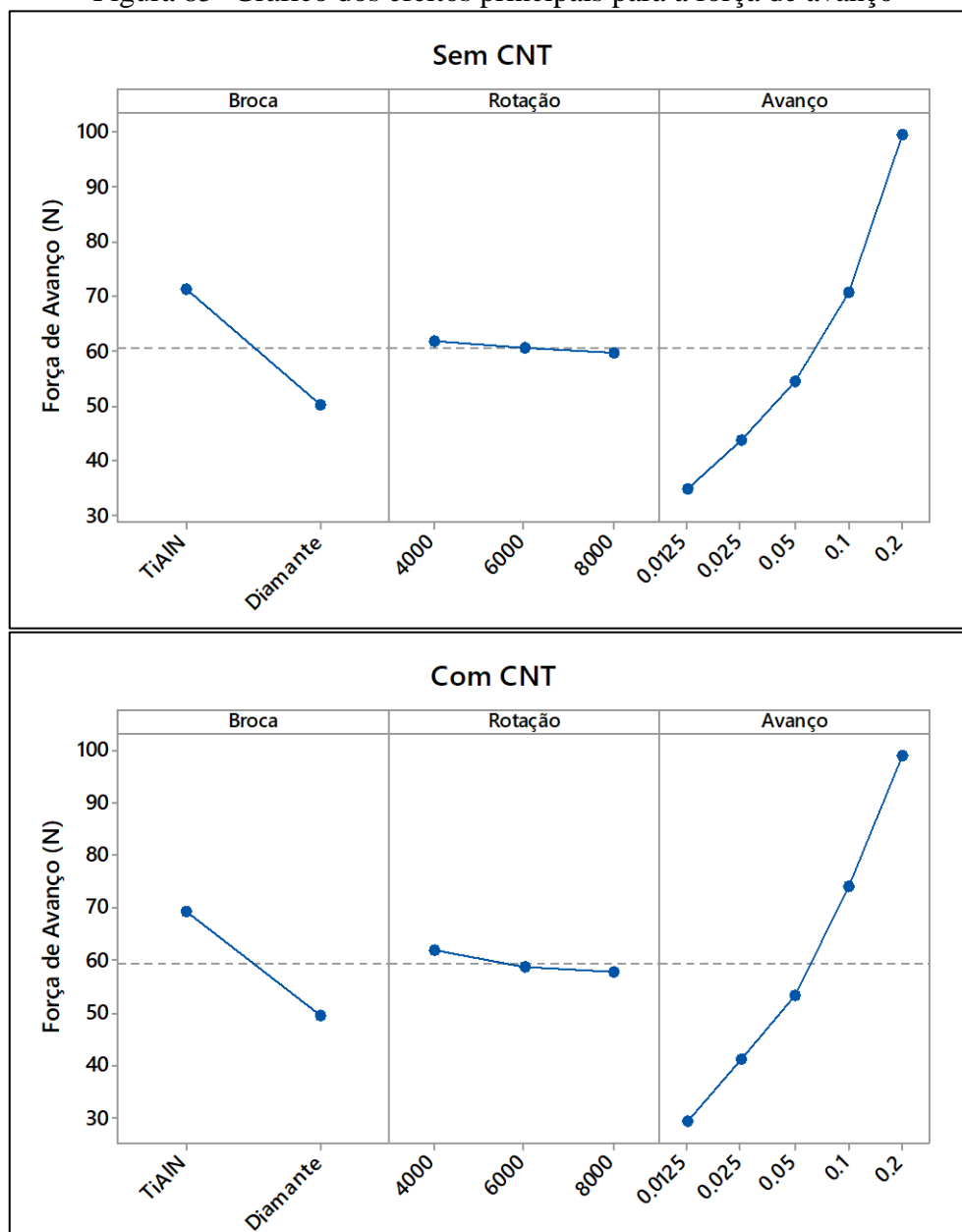


Fonte: Autoria própria

5.3.5 Força de avanço

Por meio da análise gráfica dos efeitos principais para a força de avanço (Figura 85), observa-se que as brocas diamantadas geraram menor força de avanço que as de TiAlN. Segundo Wang et al. (2013), isso ocorre devido à resistência ao desgaste do revestimento, pois quanto maior o desgaste maior a força de avanço. Além disso, nota-se que o avanço aparenta possuir uma grande influência nos resultados obtidos.

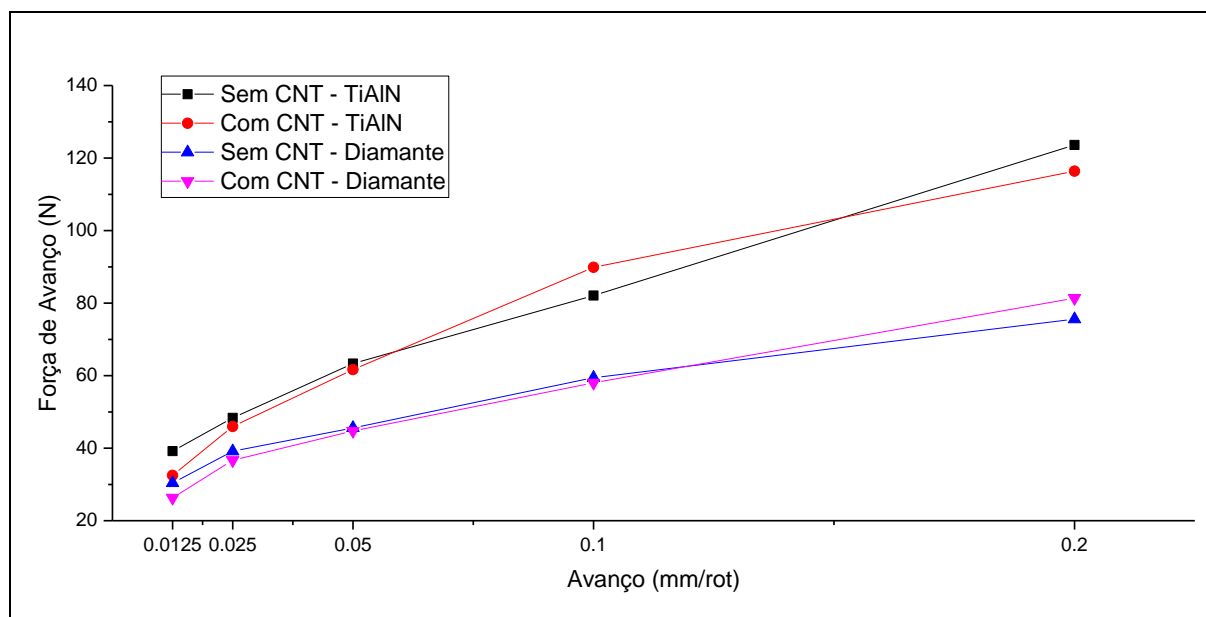
Figura 85- Gráfico dos efeitos principais para a força de avanço



Fonte: Autoria própria

Para melhor compreender os resultados entre os materiais, foi plotado um gráfico separando os materiais pelos avanços e brocas utilizados (Figura 86). Observa-se que a grande diferença está nas brocas utilizadas, visto que para a mesma ferramenta de corte os materiais não se mostram influentes. Além disso, à medida que se aumenta o avanço a força de avanço também aumenta. Também é possível observar que para um mesmo avanço, ao comparar os valores dentro de cada broca, não se nota uma grande variação dos valores.

Figura 86 - Gráfico da força de avanço em função do avanço e do tipo de broca



Fonte: Autoria própria

Por meio da análise estatística (Tabelas 18 e 19 – Apêndice A), verificou-se que os fatores que tiveram maior contribuição foram broca e avanço, sendo que juntos seus valores são de 90,13% para os laminados sem CNT e de 91,43% para os com CNT. Com relação as interações, somente a broca*avanço teve uma contribuição significativa no resultado final, sendo que sua contribuição foi de aproximadamente 7,3% para os laminados sem CNT e de 4,4% para os com CNT.

O fato do tipo de broca e avanço serem os fatores mais influentes já era esperado, pois segundo Liu et al., (2012) o avanço, a geometria da broca, o desgaste da ferramenta são fatores que influenciam na força de avanço.

A geometria da broca influencia diretamente nos estágios 2 e 3 (Figura 22), visto que a penetração da aresta de corte na peça será diferente em função da geometria da broca, bem como na remoção do cavaco. Franke (2011) comprovou com seus estudos que o perfil da aresta de corte tem grande impacto na qualidade dos furos dos laminados estruturais, sendo que a força de avanço é um dos fatores que influencia na qualidade dos furos.

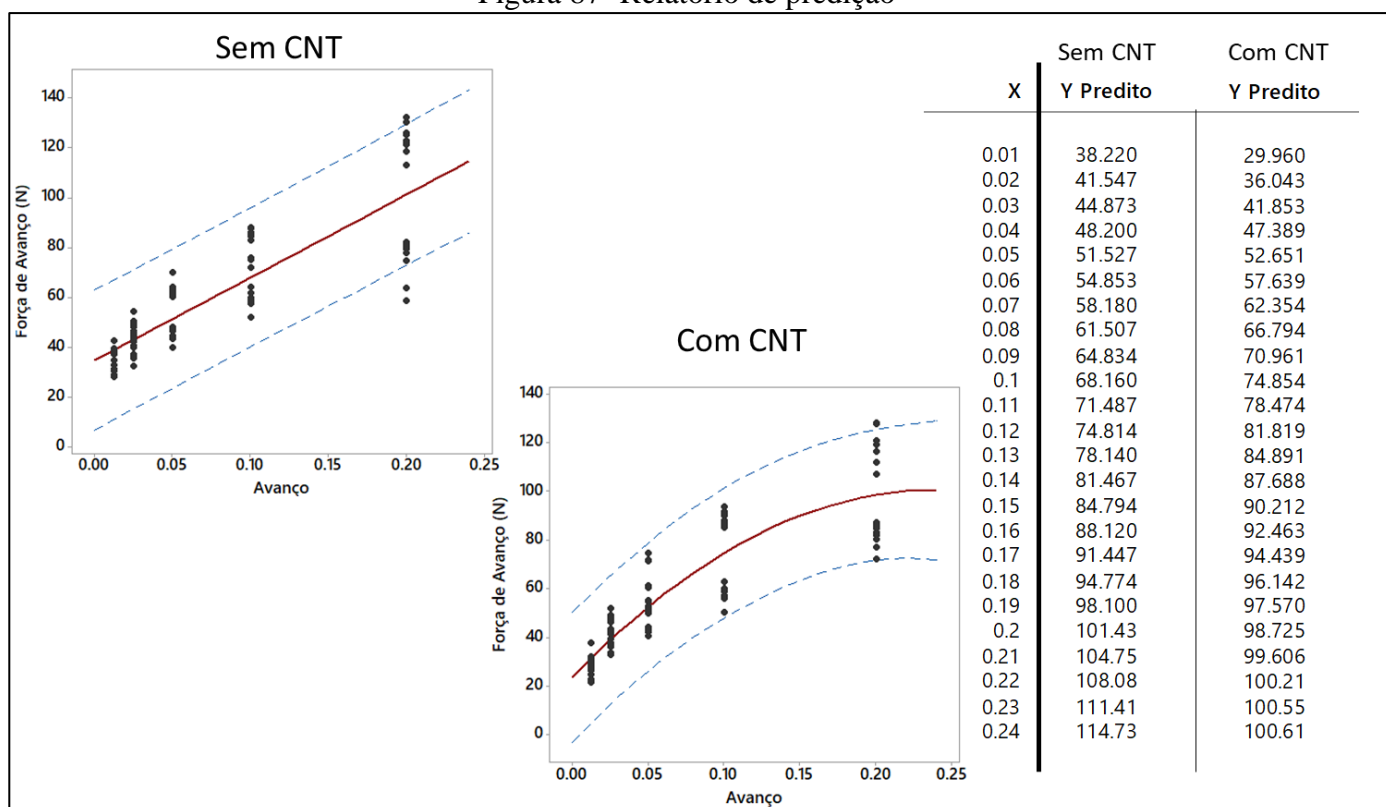
Observando os parâmetros de corte utilizados, nota-se que à medida que se aumentou o avanço a força de avanço também aumentou. De acordo com Geier and Szalay (2017) esse comportamento ocorre porque o aumento do avanço causa um aumento na seção transversal de corte, portanto, a componente de força axial também aumenta.

Devido à grande influência da força de avanço na qualidade dos furos, foi gerado um relatório de predição da força de avanço em função do avanço, visto que o avanço tem uma

contribuição de quase 80% para o resultado final e também contribui com mais de 75% do incremento do R^2 .

Na Figura 87 é apresentado os gráficos de linha ajustada dos relatórios de predição, onde a linha vermelha mostra o Y previsto para qualquer valor de X, ou seja, é que a linha que representa a equação de regressão. E as linhas azuis mostram o intervalo de predição de 95%. Por meio desse relatório observa-se que o compósito sem adição de CNT possui uma tendencia de predição linear, já os com CNT uma predição logarítmica crescente.

Figura 87- Relatório de predição

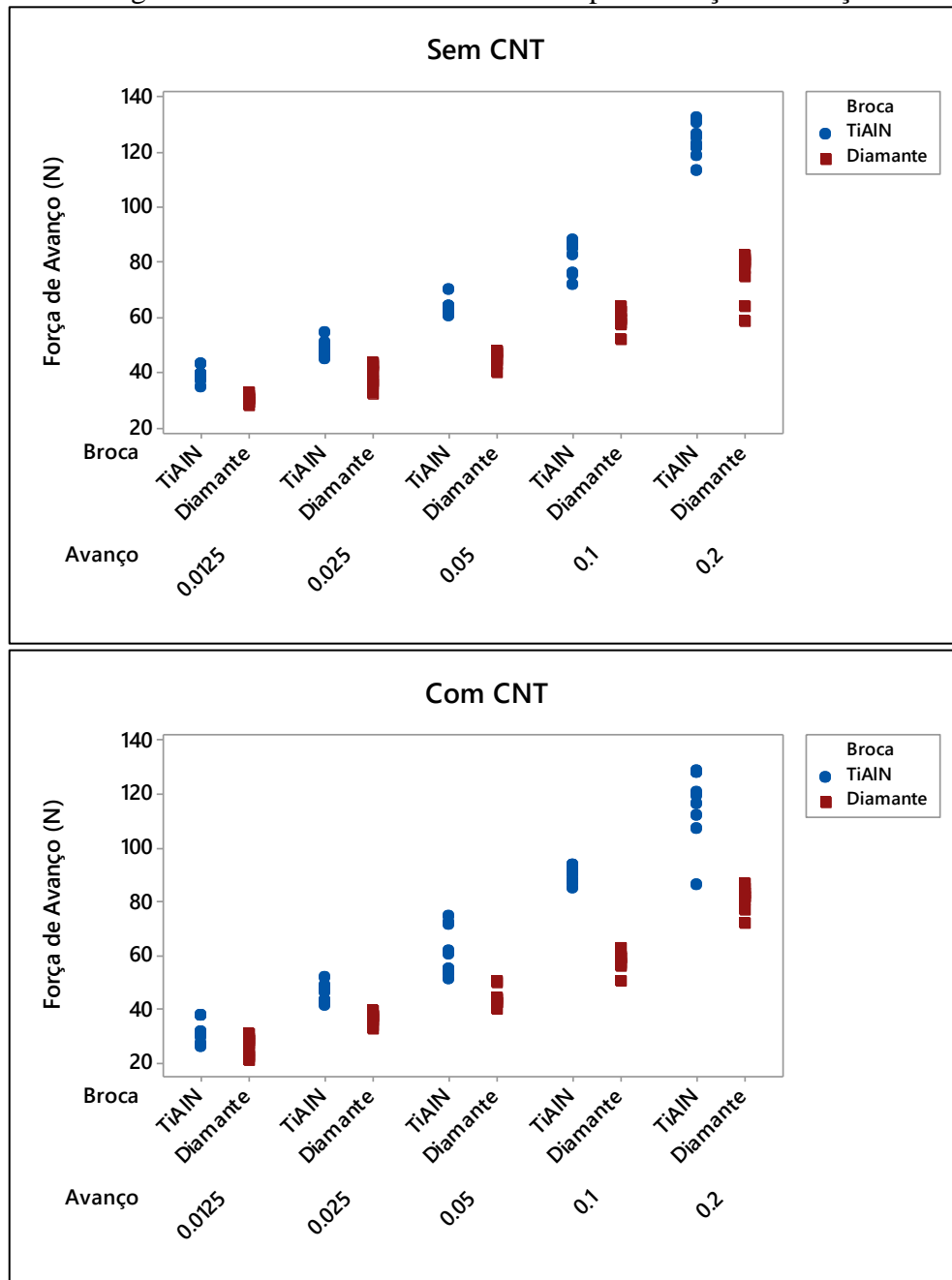


Fonte: Autoria própria

Nos gráficos de linha ajustada nota-se à medida que se aumenta o avanço há um aumento da variação dos dados. Para compreender melhor essa variação, foi plotado um gráfico de valor individual (Figura 88). Como já comentado anteriormente o aumento do avanço faz com que a força de avanço aumente, sendo este aumento mais acentuado para as brocas de TiAlN.

Com relação a variação dos dados é possível observar que as brocas de TiAlN apresentam maior variação que as de diamante, além disso, a variação é mais acentuada para os avanços de 0,1 e 0,2 mm/rot. Com base em todos esses resultados, constata-se que o ideal é utilizar brocas de diamante e avanços mais baixos.

Figura 88- Gráfico do valor individual para a força de avanço

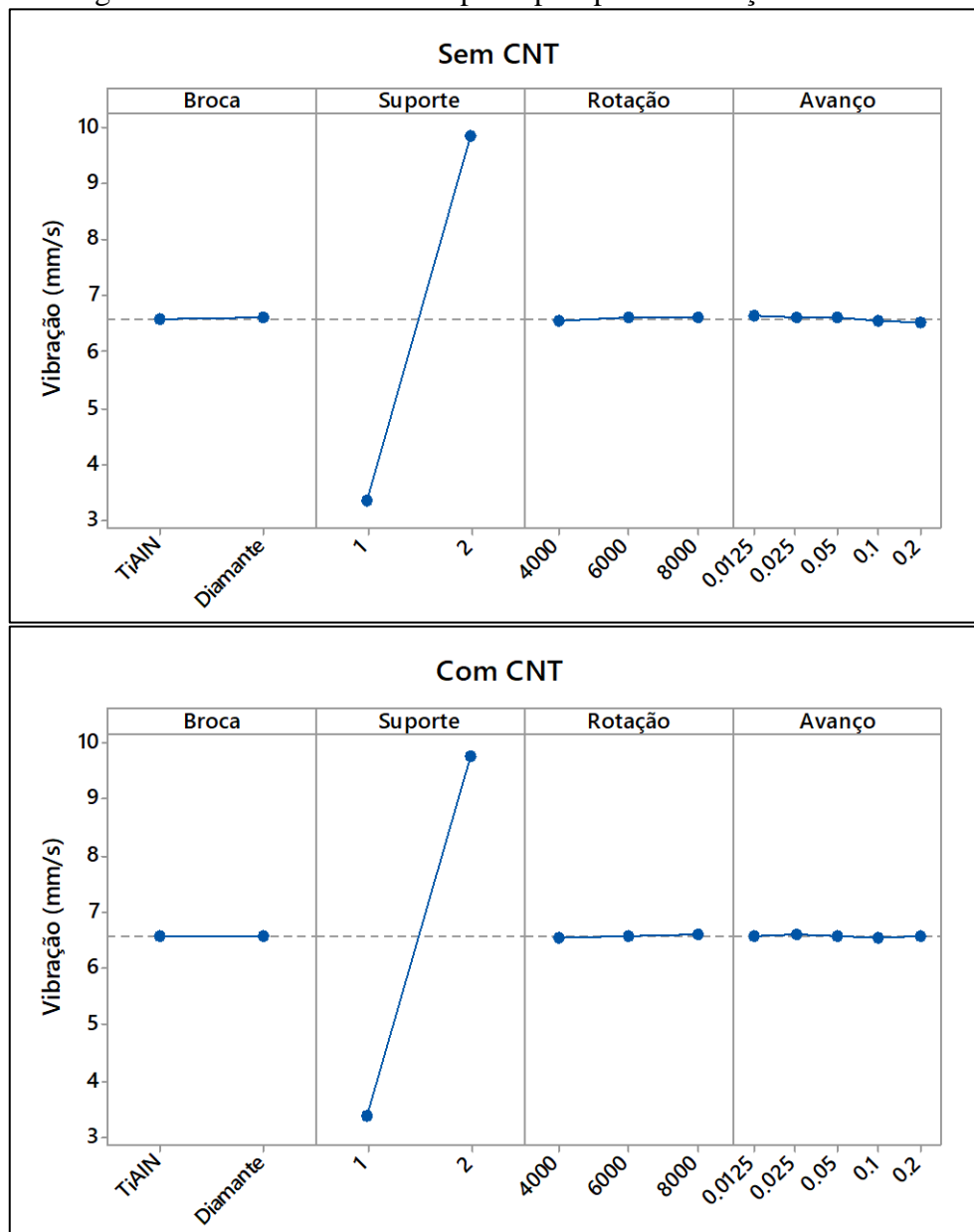


Fonte: Autoria própria

5.3.6 Vibração

Por meio dos gráficos dos efeitos principais para a vibração do sistema (Figura 89) verifica-se que, em ambos os materiais, o tipo de suporte empregado é o único fator que mostra ter influência.

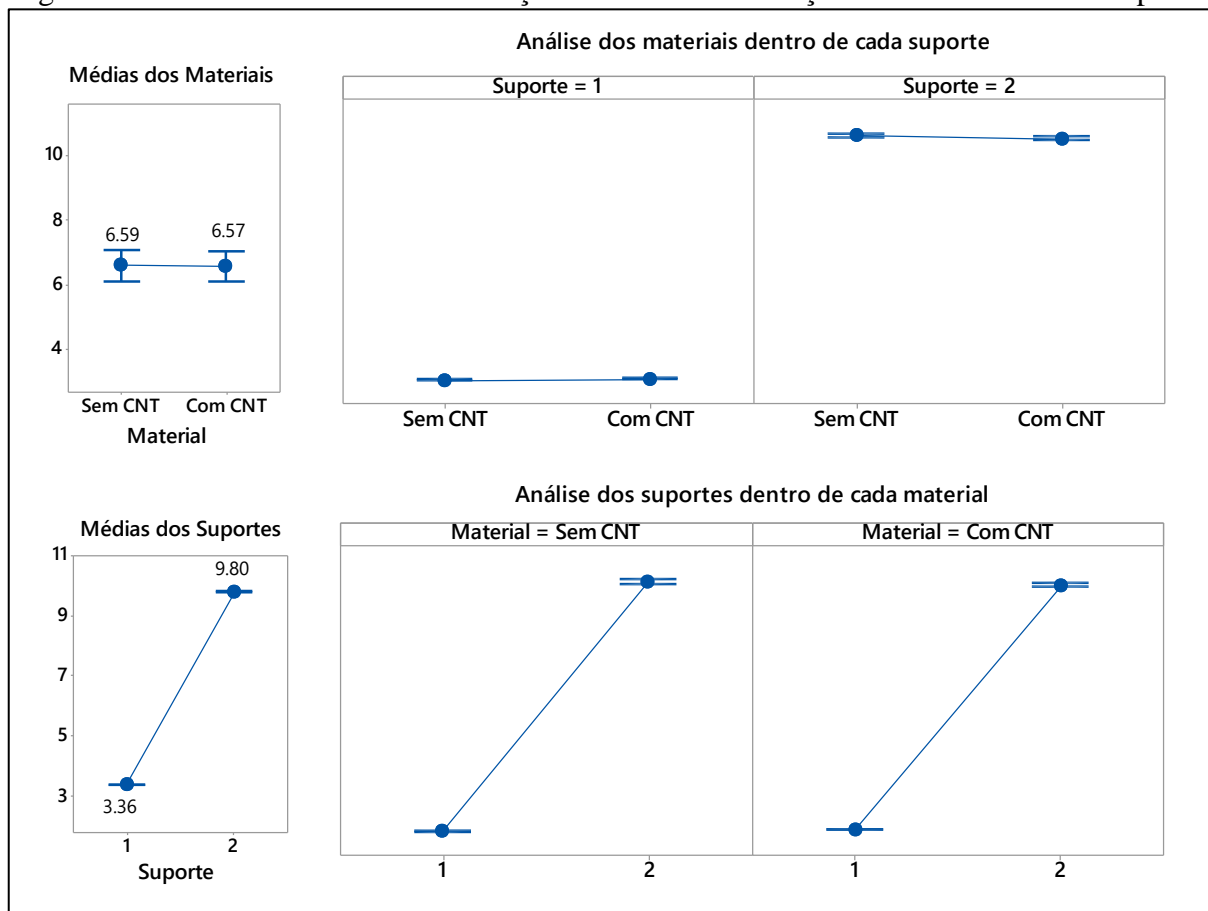
Figura 89- Gráfico dos efeitos principais para a vibração do sistema



Fonte: Autoria própria

Assim como para o torque, não é possível realizar uma análise de efeitos principais tradicional para os materiais estudados, devido à grande importância do tipo de suporte utilizado. Por tanto, foi realizado uma análise por camada, na qual foi possível observar que dentro de cada suporte, as médias dos materiais são semelhantes, mas ao analisar os suportes dentro de cada material, constata-se que o uso do suporte 2 gerou maiores de vibração (Figura 90).

Figura 90- Relatório detalhado da vibração do sistema em função dos materiais e dos suportes



Fonte: Autoria própria

Por meio da análise estatística (Tabelas 20 e 21 - Apêndice A), constatou-se que o único fator que teve influência na vibração do sistema foi o tipo de suporte empregado, o qual teve uma contribuição de aproximadamente 99,7%. O que já era esperado pela análise dos efeitos principais.

Inicialmente, levantou-se a hipótese de que a alta vibração no segundo suporte estava relacionada com a presença do coletor de cavacos encostado na mesa de trabalho pois, o mesmo possui um motor em seu interior, o qual poderia ter aumentado a vibração do sistema. Mas através de testes constou-se que o coletor não interferia na vibração.

Analisando as demais variáveis respostas, que foram coletadas no momento do processo de furação, percebe-se que o fator suporte teve uma contribuição de muito pequena, ou seja, esse fator não modificou muito a dinâmica de corte.

Com base nisso, levantou-se a hipóteses de que, a alta vibração do suporte 2 está relacionada com o modelo do suporte, o qual foi produzido em duas partes para acoplar o sensor de força, pois o mesmo funciona através de pressão. Porém, apesar de ter sido confeccionado com baixa folga entre os componentes, o mesmo ainda pode ter apresentado uma folga em virtude do acoplamento do sensor de força (0,203 mm de espessura), bem como uma folga nos encaixes dos pinos guia.

Para compreender como foi a distribuição dos dados e verificar como que a mudança de suporte pode ter influenciado na vibração do sistema, foi plotado um gráfico de valor individual, com adição das medidas de tendência central e desvio padrão (Figura 91). É possível observar que a variância e a dispersão do conjunto de dados do suporte 1 foi menor que no suporte 2, em ambos os materiais. Sendo que entre os laminados, os com CNT apresentaram menor variação.

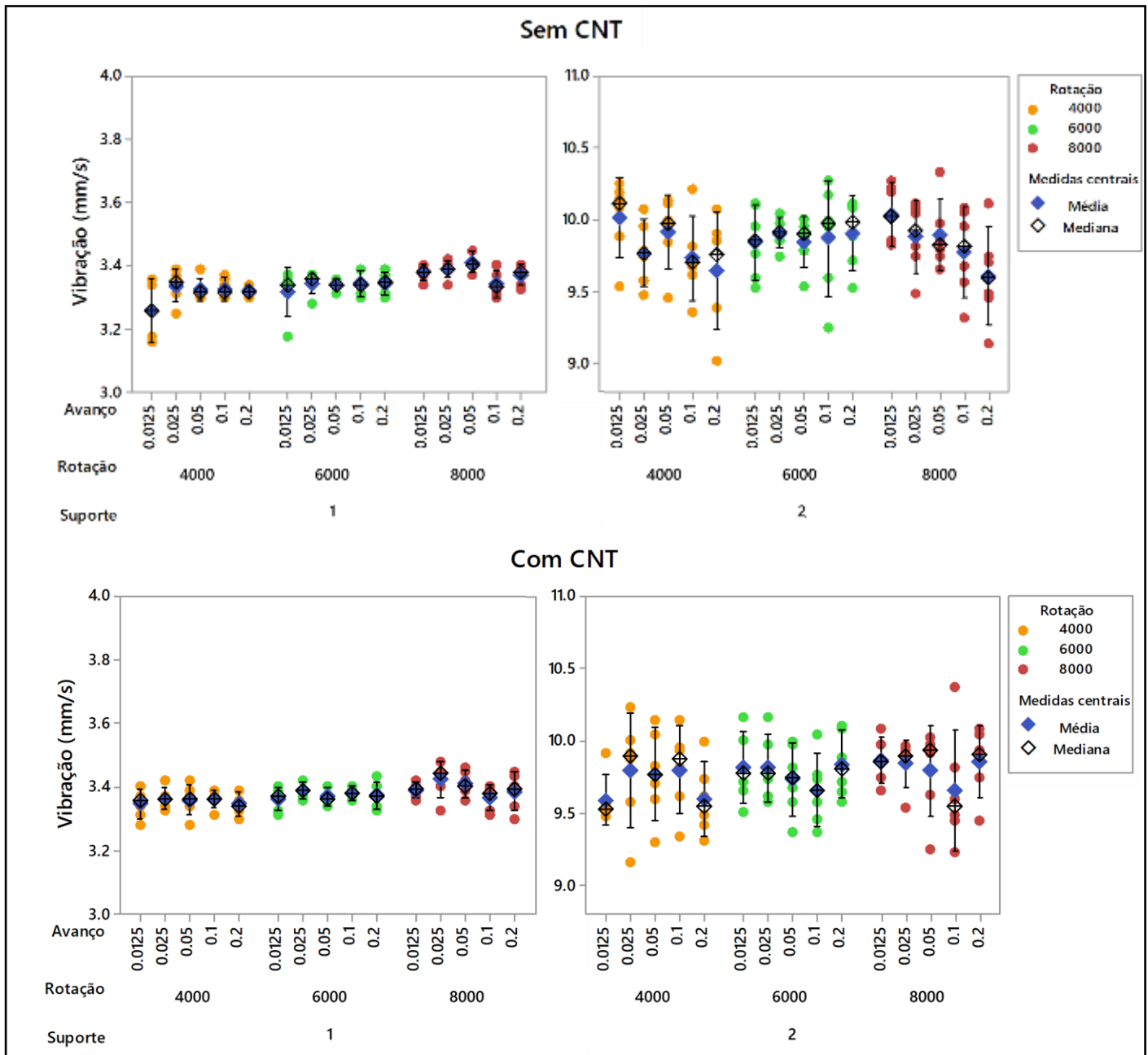
Apesar do fator rotação não ser significativo, pela análise das medidas de tendência central e desvio padrão nota-se que, os valores mais robustos foram obtidos pela rotação de 8000 rpm para os laminados sem CNT e pela rotação de 6000 rpm para os com CNT.

De acordo com Kalpakjian (2007) o estudo da vibração é algo muito complexo devido ao seu comportamento. Altas vibrações podem acarretar no desgaste prematuro e avarias nas ferramentas de corte, e por consequência, baixa qualidade superficial e perda dimensional da peça usinada, ruídos desagradáveis e aumento do consumo de energia elétrica (TRENT; WRIGHT, 2000; SIDDHPURA; PAUROBALLY, 2012).

Com base nessas afirmações e nos resultados obtido para a vibração, a utilização do suporte 2 não é o ideal. Além disso, espera-se que os resultados referentes a qualidade dos furos (delaminação e erro geométrico), desgaste e avaria das brocas, emissão sonora e o consumo de potência sejam maiores quando utilizado o suporte 2.

Com relação a potência, o fator suporte teve pouca influência no resultado, sendo que o suporte 2 foi o que gerou menor consumo de potência. O que indica que apesar da diferença de valores de vibração entre os suportes, pode não ser tão significativo no contexto geral da furação dos laminados estudados. As demais variáveis resposta serão discutidas posteriormente.

Figura 91- Relatório detalhado da vibração do sistema em função dos materiais e dos suportes

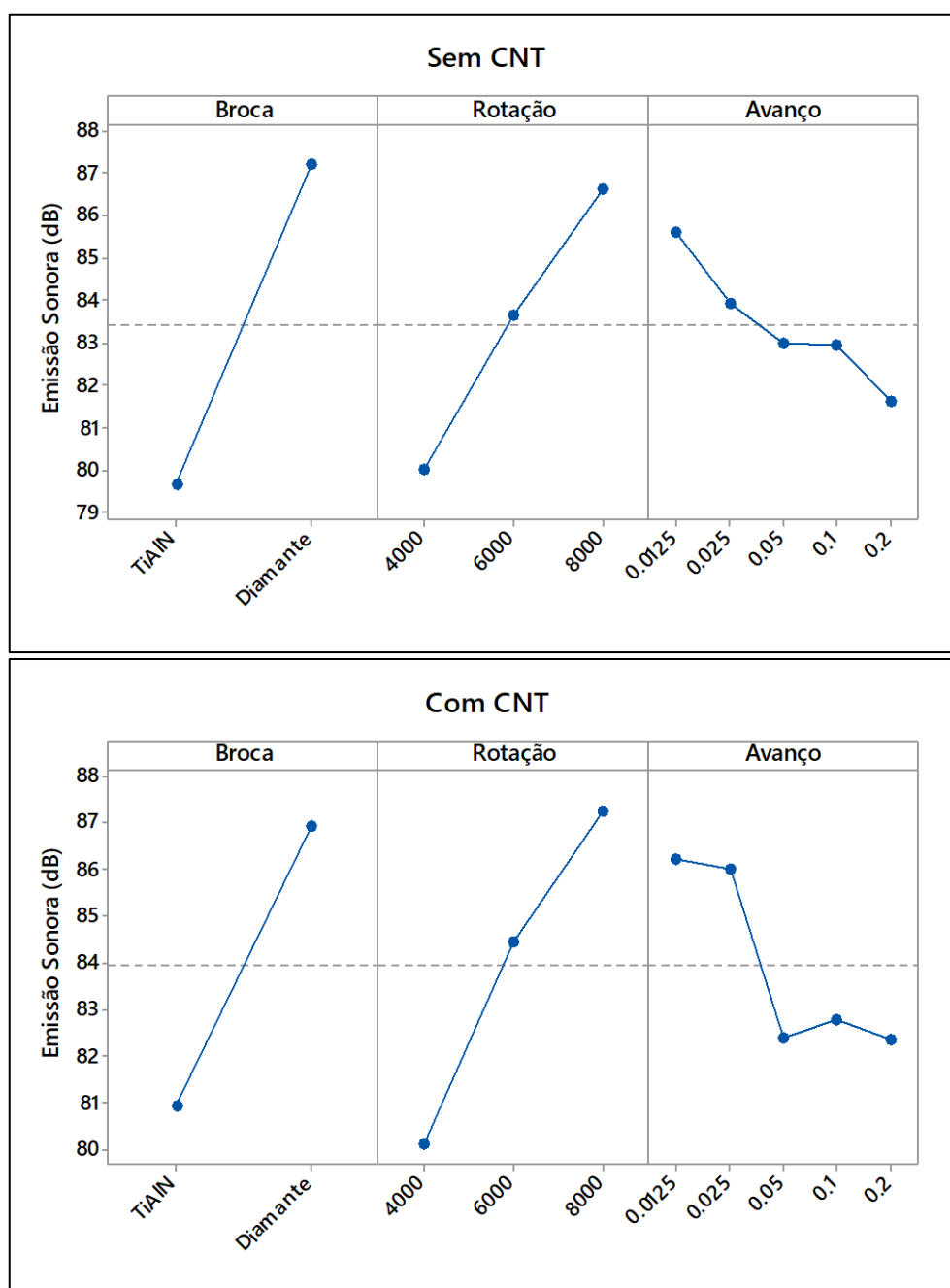


Fonte: Autoria própria

5.3.7 Emissão sonora

Por meio da análise gráfica dos efeitos principais para a emissão sonora (Figura 92), observa-se que o comportamento dos fatores brocas e rotação é o mesmo, independentemente do material. Já para o avanço à medida que o nível do fator aumenta, ambos os materiais apresentam uma queda do valor de emissão sonora, porém a forma como essa queda acontece é diferente.

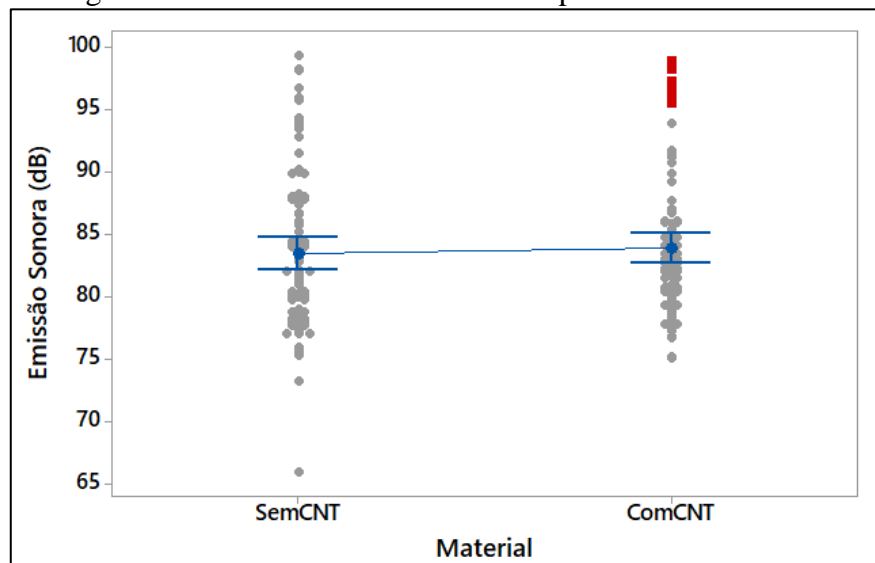
Figura 92- Gráfico dos efeitos principais para a emissão sonora



Fonte: Autoria própria

Ao analisar os efeitos dos materiais estudados sobre a emissão sonora (Figura 93), verifica-se que o tipo de material não influencia no resultado final. Entretanto por meio de um gráfico de valor individual, observa-se uma grande variação dos dados, a qual pode ser explicada pela combinação dos fatores principais. Além disso, nota-se que os laminados com adição de CNT possuem uma grande quantidade de *outliers*, representados pelos pontos vermelhos.

Figura 93- Gráfico do valor individual para a emissão sonora



Fonte: Autoria própria

De acordo com a análise estatística (Tabelas 22 e 23 - Apêndice A), verifica-se que basicamente todos os fatores e as interações foram significativas, para ambos os materiais. Entretanto nota-se que há uma grande diferença na porcentagem de contribuição de cada fator.

O fator broca foi o de maior contribuição, entretanto para os laminados sem CNT representou ~36% e para o com CNT 27,5%. Já a rotação apresentou uma contribuição de 18,4% e 26,5%, para os laminados sem e com CNT respectivamente.

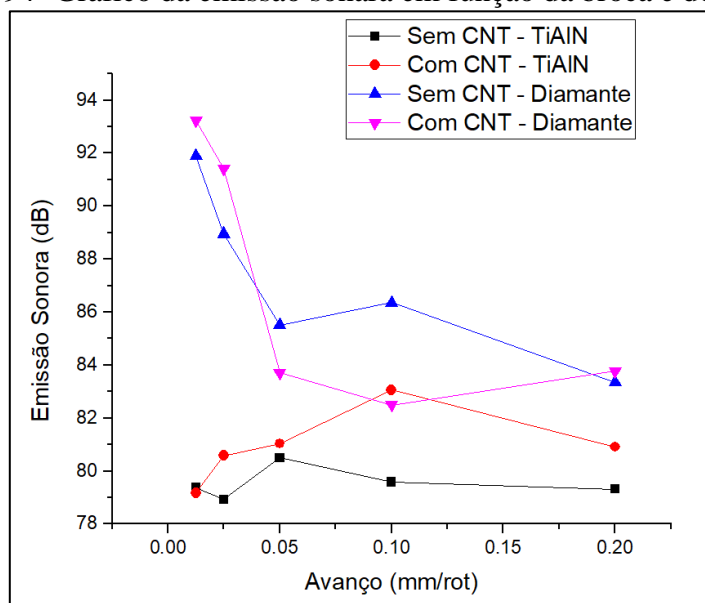
Para melhor compreender os resultados entre os materiais, foram plotados gráficos de linha evidenciando o material, broca, rotação e avanço (Figuras 94 e 95). Em geral as brocas de TiAlN produziram menor ruído que as diamantadas.

Pelo gráfico em função da broca e do avanço, nota-se que para as brocas diamantadas nos avanços de 0,0125 e 0,025mm/rot houve a maior captação de ruído. Isso era esperado pois, nesses avanços, independente da rotação ou laminado, a broca com revestimento de diamante gerava um ruído agudo. Comportamento esse não verificado para os demais avanços.

Uma hipótese para o ocorrido podem ser o fato do som ter reverberado no interior do furo, ou seja, como em baixos avanços o volume de material removido durante o processo é baixo, isso gera espaço vazio entre o canal da broca e a parede do furo que está sendo usinado. De modo que ao aumentar o avanço o volume de cavaco aumenta e o espaço é preenchido, atenuando assim a emissão sonora. Aliado a isso, há a diferença entre as geometrias e revestimentos das brocas, o que pode ter propiciado esse ocorrido.

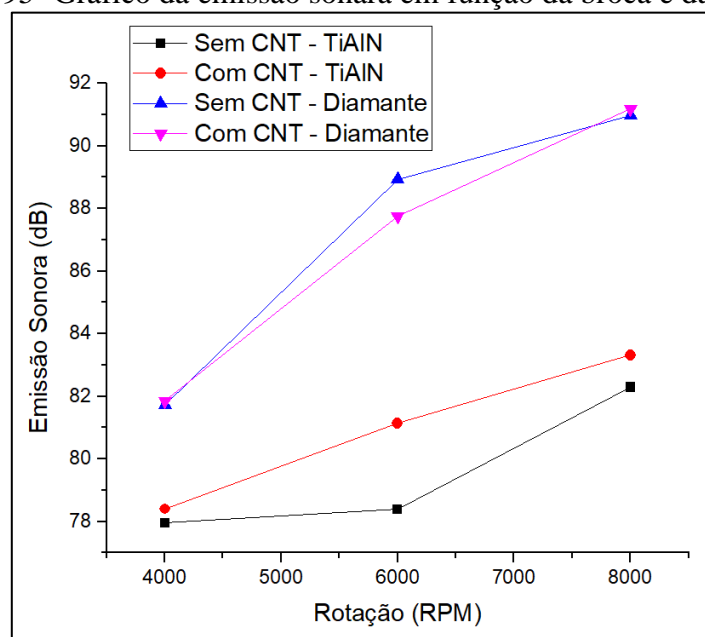
Fenômeno semelhante ocorre em elevadas rotações, visto que o volume de material removido é menor. Além disso, o aumento da rotação faz com que o ruído gerado seja maior.

Figura 94- Gráfico da emissão sonora em função da broca e do avanço



Fonte: Autoria própria

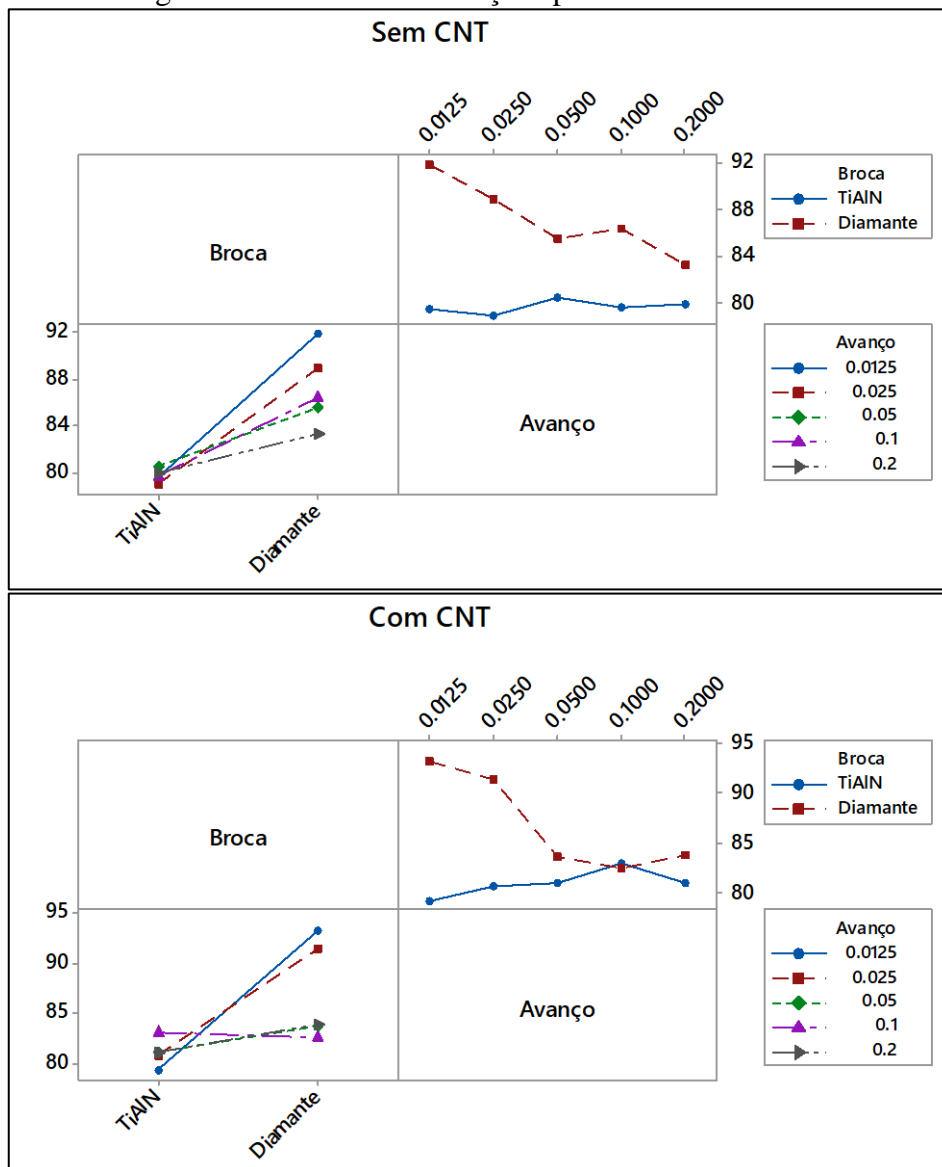
Figura 95- Gráfico da emissão sonora em função da broca e da rotação



Fonte: Autoria própria

Com relação às interações, a que se destaca é a broca*avanço, a qual apresentou uma contribuição de 7% para os sem CNT e de 23,5% para os com CNT. Comparando o teste de Tukey como o gráfico das interações (Figura 96) observa-se os mesmos blocos de interação. Em geral, nota-se uma diferença de comportamento dos materiais frente aos parâmetros de corte empregados nesse estudo, o que corrobora para a hipótese que a adição de CNT pode vir a modificar a resposta do material ao corte.

Figura 96- Gráfico de interações para a emissão sonora



Fonte: Autoria própria

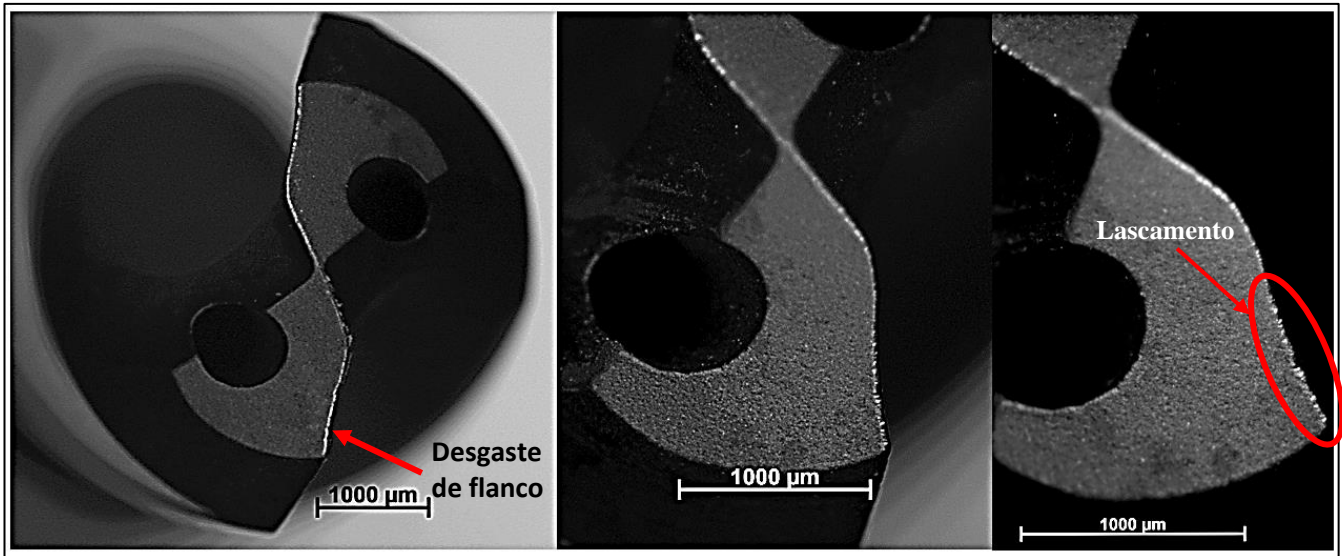
5.3.8 Desgaste e avaria das ferramentas de corte

Nas Figuras 97 e 98 são apresentados os desgastes e avarias ocorridos nas brocas utilizadas. Nota-se que as brocas revestidas com diamante apresentaram pequenos lascamentos e desgaste de flanco e as brocas revestidas com TiAlN apresentaram desgaste de flanco. Na Tabela 4 são apresentados os valores de $VB_{médio}$, na qual é possível verificar que as brocas diamantadas apresentaram menor desgaste de flanco que as de TiAlN

Tabela 4 - Valores de $VB_{m\u00e9dio}$ obtidos nos processos de fura\u00e7\u00e3o com diferentes brocas

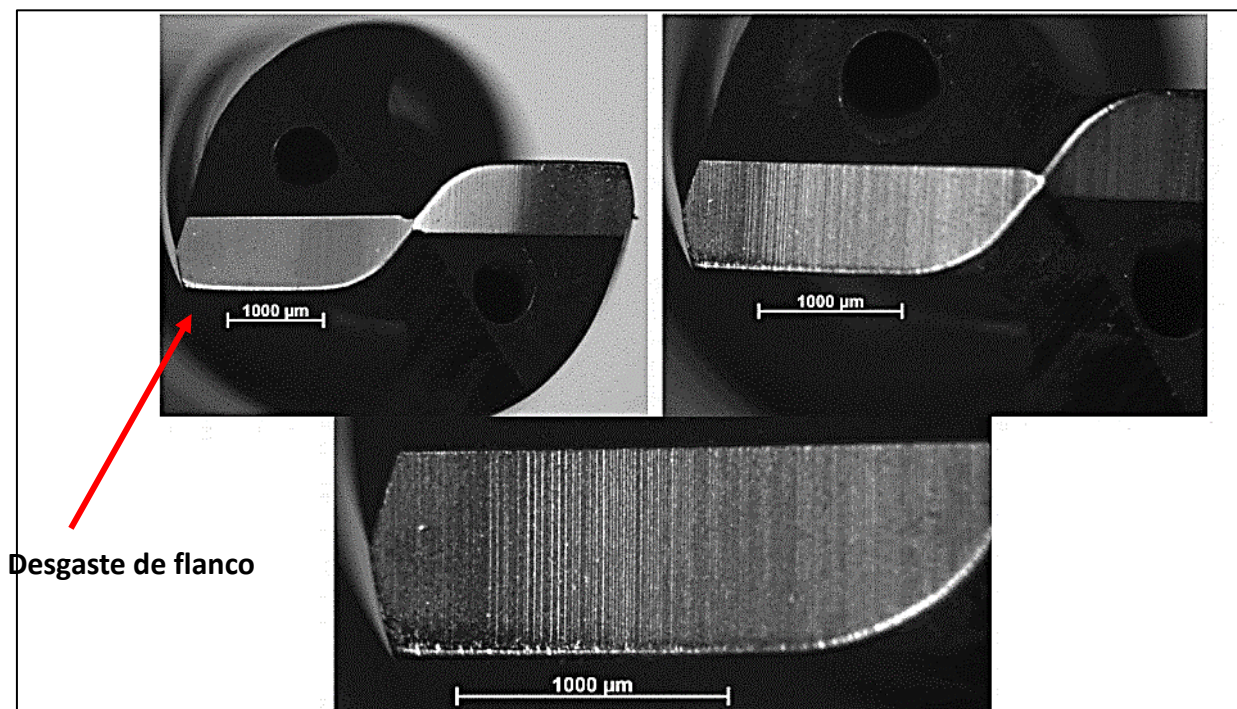
	Suporte 1		Suporte 2	
	Sem CNT	Com CNT	Sem CNT	Com CNT
TiAlN	33,13 μm	43,90 μm	34,8 μm	41,60 μm
Diamante	25,50 μm	26,24 μm	30,12 μm	39,10 μm

Figura 97- Desgaste e avaria ocorrida nas brocas com revestimento de diamante



Fonte: Autoria pr\u00f3pria

Figura 98- Desgaste e avaria ocorrida nas brocas com revestimento de TiAlN



Fonte: Autoria pr\u00f3pria

Comparando-se os resultados observa-se que para um mesmo número de furos as brocas de TiAlN sofreram maior desgaste de flanco que as diamantadas. Se analisada a vibração do sistema, observa-se que os valores entre as brocas são próximos, o que não sugere que a vibração tenha sido responsável pela diferença de desempenho entre as brocas.

Entretanto, as brocas diamantadas apresentaram pequenos lascamentos, o que pode ter sido de corrente da vibração, principalmente quando utilizado o suporte 2, visto que o revestimento de diamante é um material que necessita de alta estabilidade, pois apesar de ser o material mais duro que existe, é extremamente frágil.

Se comprarmos as demais variáveis respostas com o desgaste de ferramenta, temos que a broca que menos desgastou foi a que gerou menor força de avanço. Fato este muito positivo, pois a força de avanço é afetada pelo desgaste da ferramenta.

Outra variável resposta que é afetada pelo desgaste é a potência, entretendo nesse caso a broca de TiAlN foi a que propiciou menor potência. Isso pode estar relacionado a geometria da broca utilizada e não necessariamente ao desgaste.

5.3.9 Aspecto dos furos

- **Entrada da broca no material**

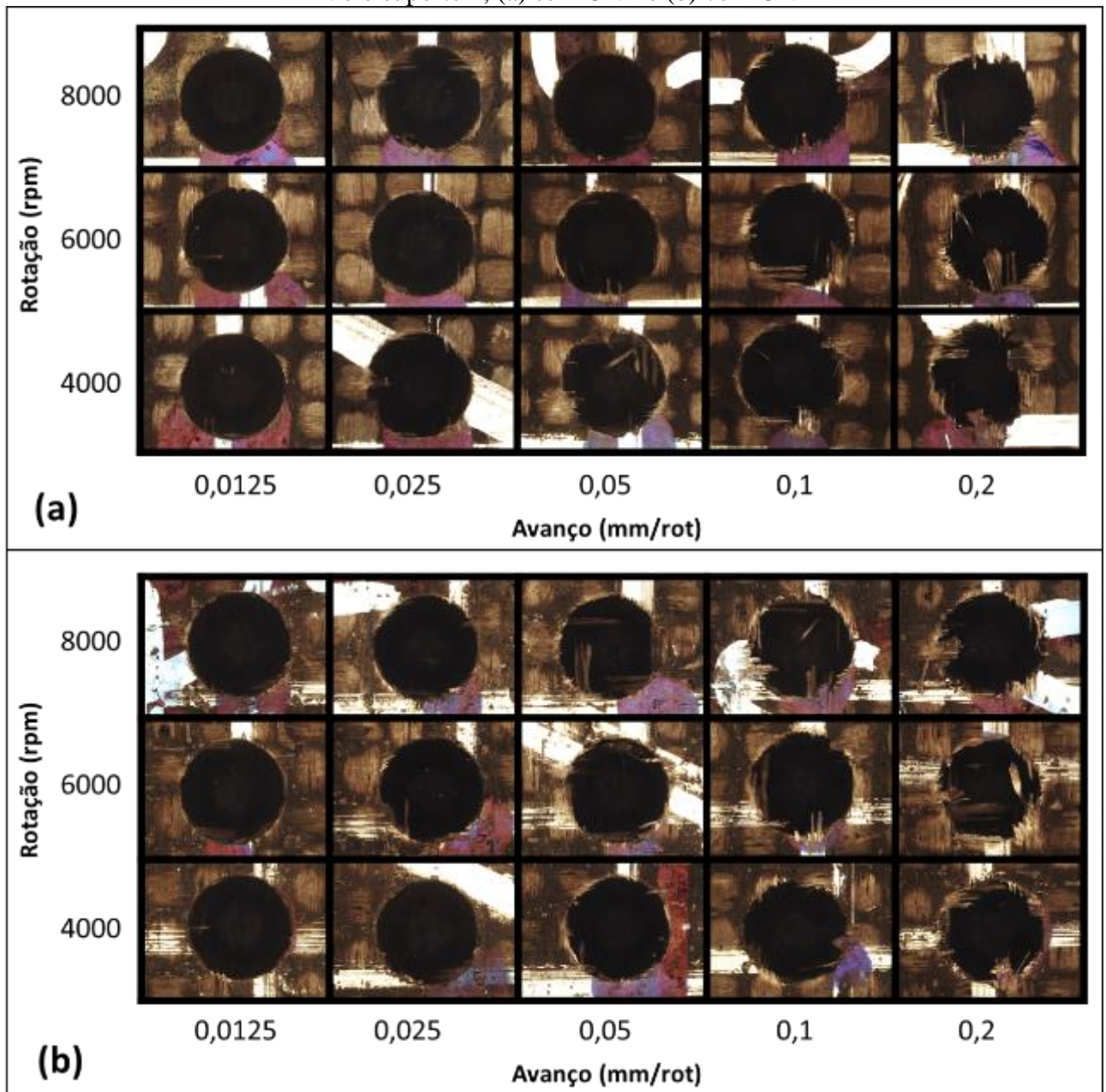
Da Figura 99 a 102 são apresentadas as imagens dos danos causado pela entrada da broca nos laminados. As figuras são separadas por broca e suporte.

Verifica-se que a utilização do suporte 1 gerou furos de melhor qualidade, ou seja, menor quantidade de fibras não cortadas (FNC). Isso provavelmente ocorreu em função da vibração mais elevada no suporte 2. As FNC nada mais são que resíduos de fibras interior do furo, devido à ação de corte deficiente, e a sua presença é algo indesejável, visto que afetam negativamente o encaixe do parafuso/rebite durante a montagem de componentes (FERREIRA BATISTA et al., 2020; SANDVIK COROMANT, 2010).

Comparando-se os avanços empregados, observa-se que independente do material, broca ou suporte, os avanços de 0,1 e 0,2mm/rot foram os que geram maior quantidade de FNC. Já o avanço de 0,0125mm/rot aparenta ser o melhor.

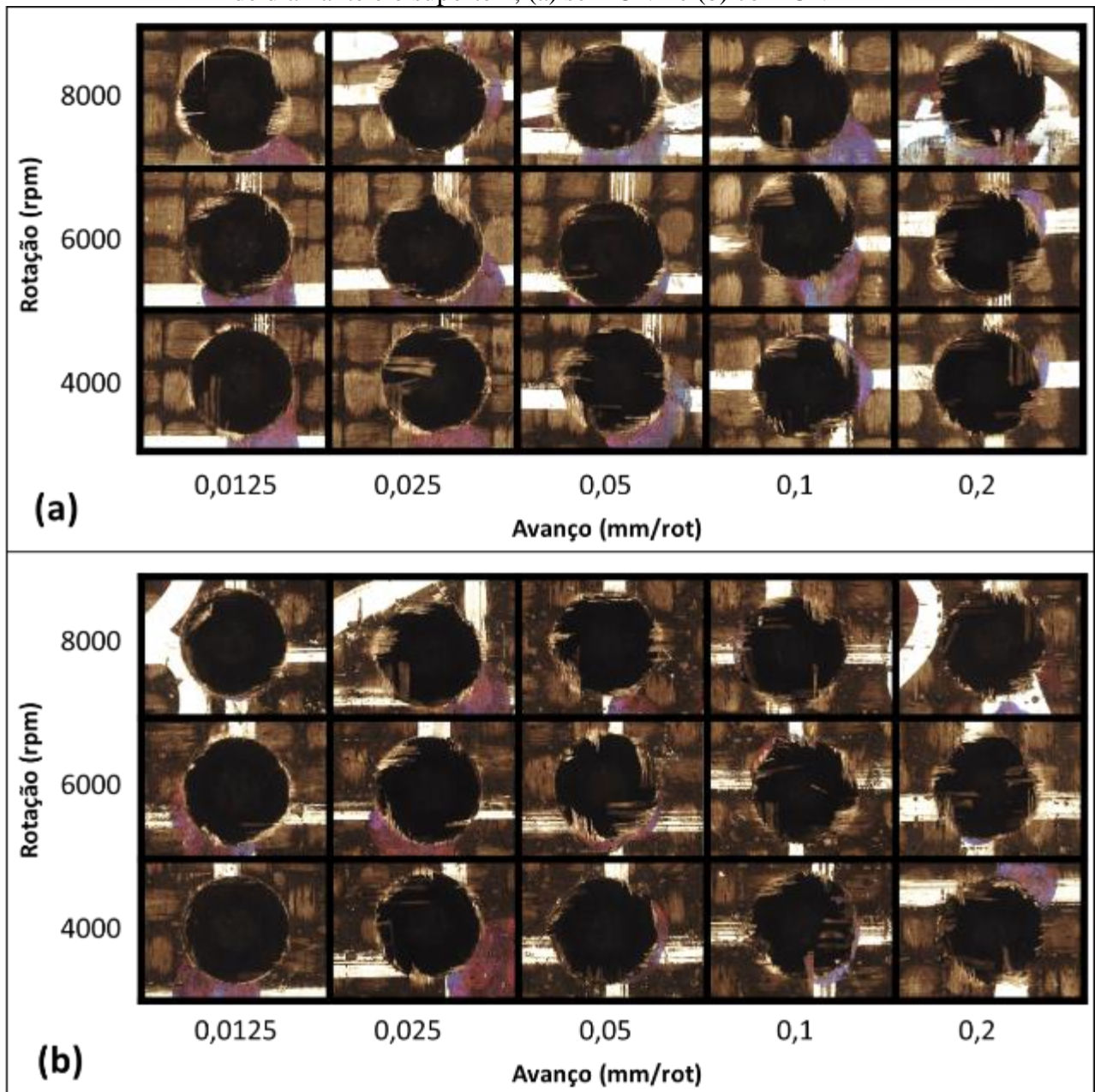
Ao comparar os materiais estudados, não se observa grande diferenças entre os laminados. De modo geral, nota-se que o avanço e o suporte foram os fatores que mais se mostraram influentes na entrada da broca, para a qualidade visual.

Figura 99 – Aspecto da entrada dos furos em função dos parâmetros de corte, utilizando broca de TiAlN e o suporte 1, (a) sem CNT e (b) com CNT



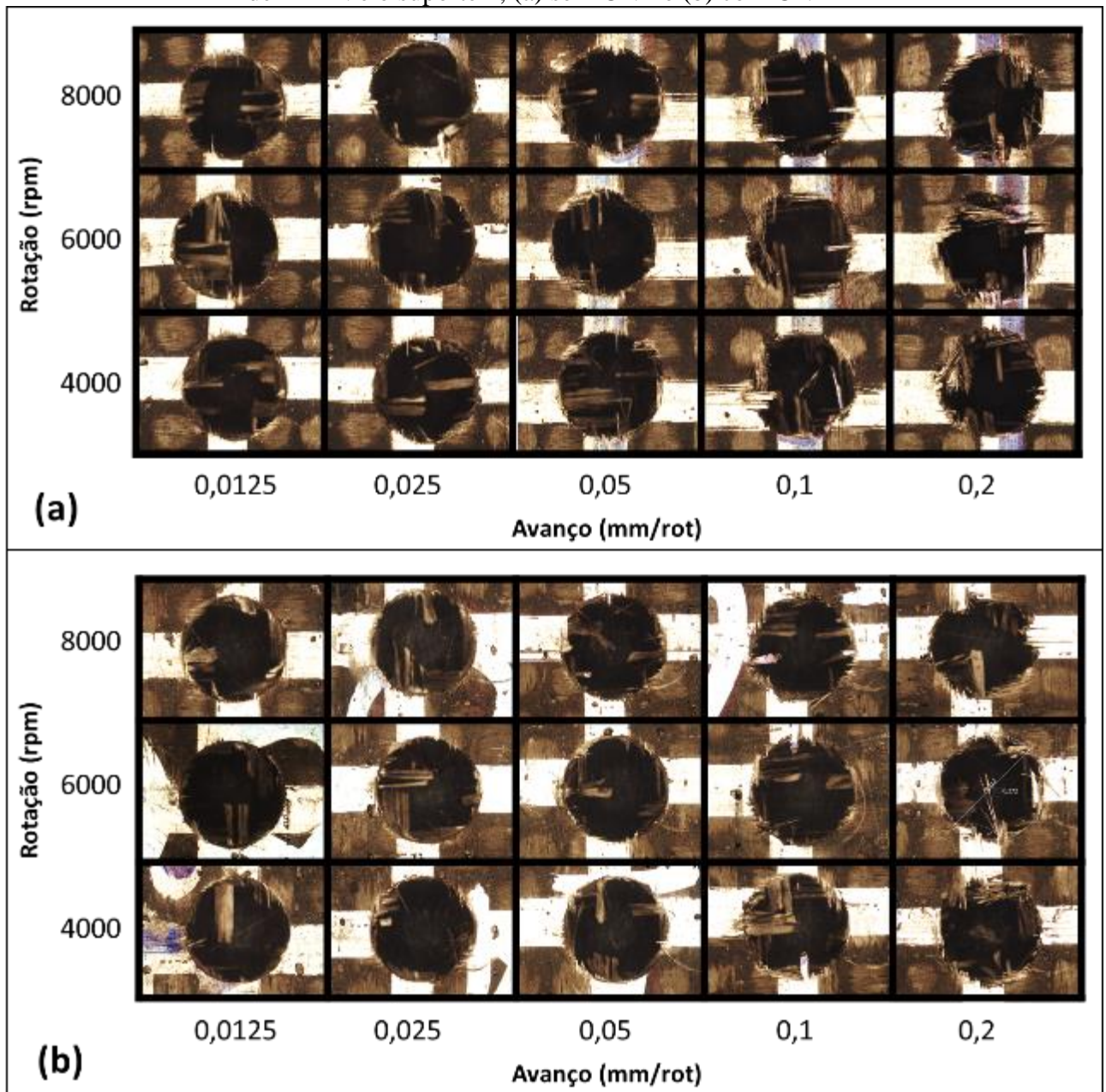
Fonte: Autoria própria

Figura 100 – Aspecto da entrada dos furos em função dos parâmetros de corte, utilizando broca de diamante e o suporte 1, (a) sem CNT e (b) com CNT



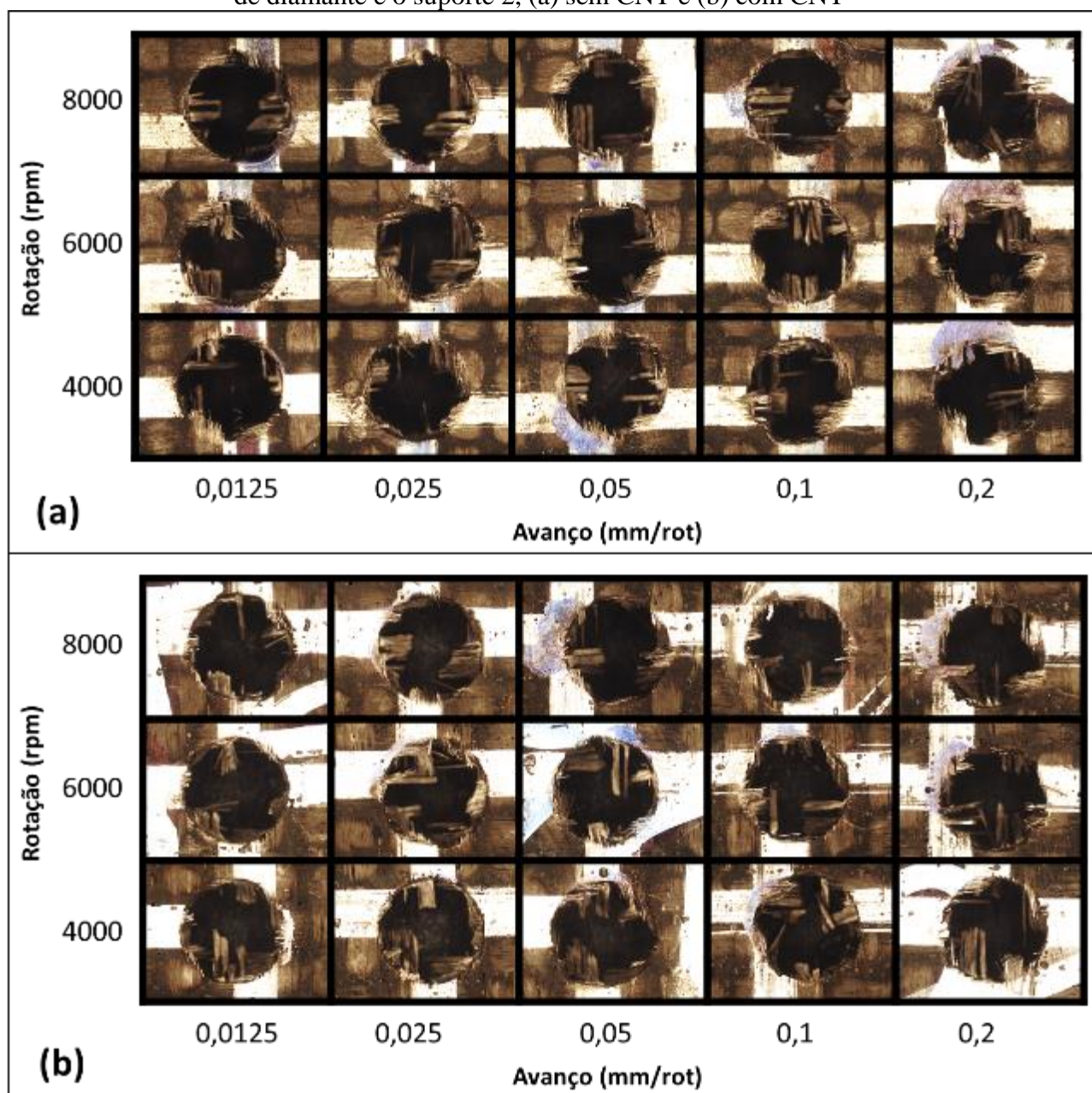
Fonte: Autoria própria

Figura 101 – Aspecto da entrada dos furos em função dos parâmetros de corte, utilizando broca de TiAlN e o suporte 2, (a) sem CNT e (b) com CNT



Fonte: Autoria própria

Figura 102 – Aspecto da entrada dos furos em função dos parâmetros de corte, utilizando broca de diamante e o suporte 2, (a) sem CNT e (b) com CNT



Fonte: Autoria própria

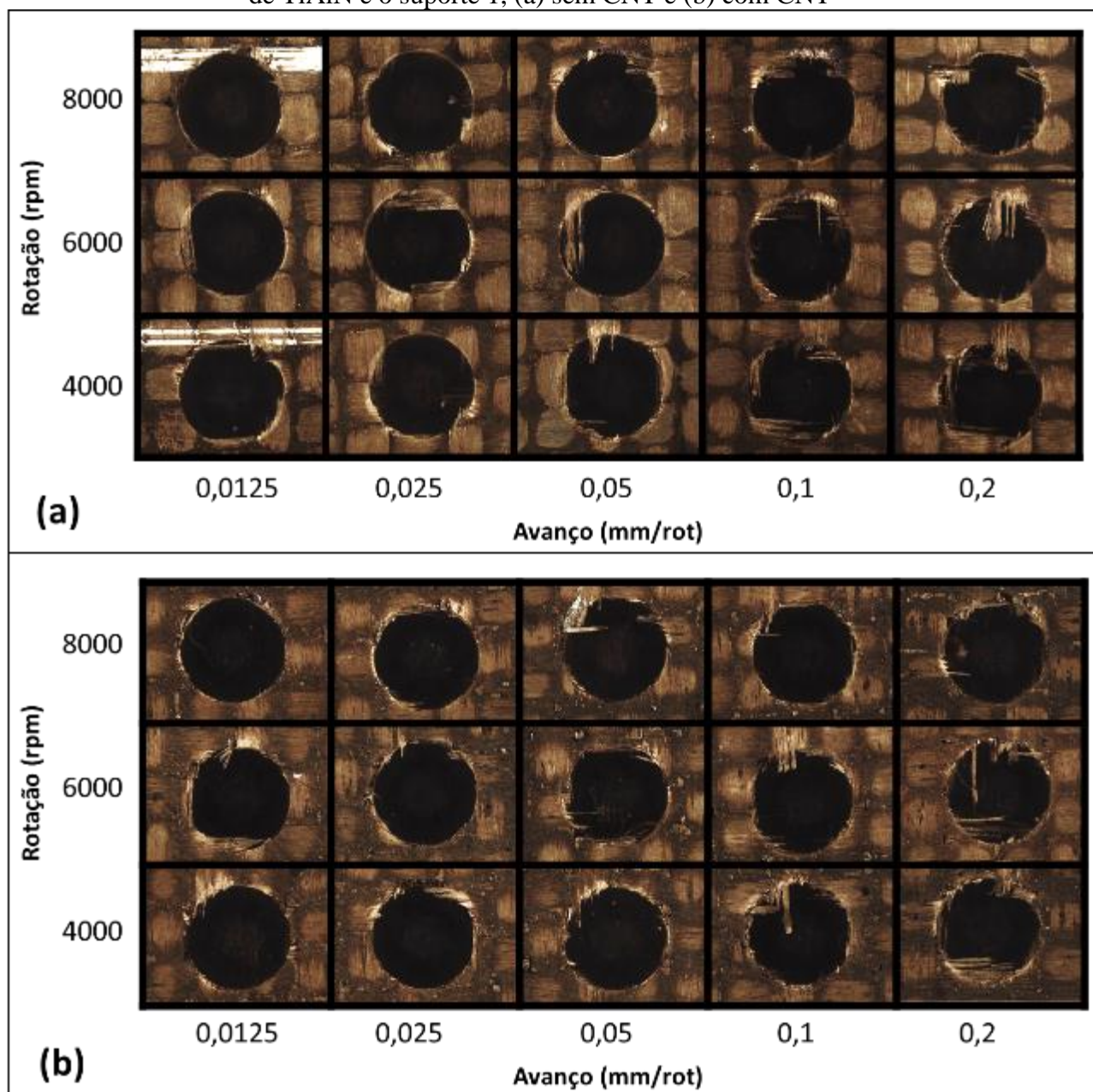
- **Saída da broca no material**

Da Figura 103 a 106 são apresentadas as imagens dos danos causados pela saída da broca nos laminados, separadas por brocas e suportes utilizados.

Assim como para a entrada, o suporte 2 gerou uma grande quantidade de FNC. Provavelmente a vibração causada pelo suporte 2 está relacionada com o resultado obtido novamente.

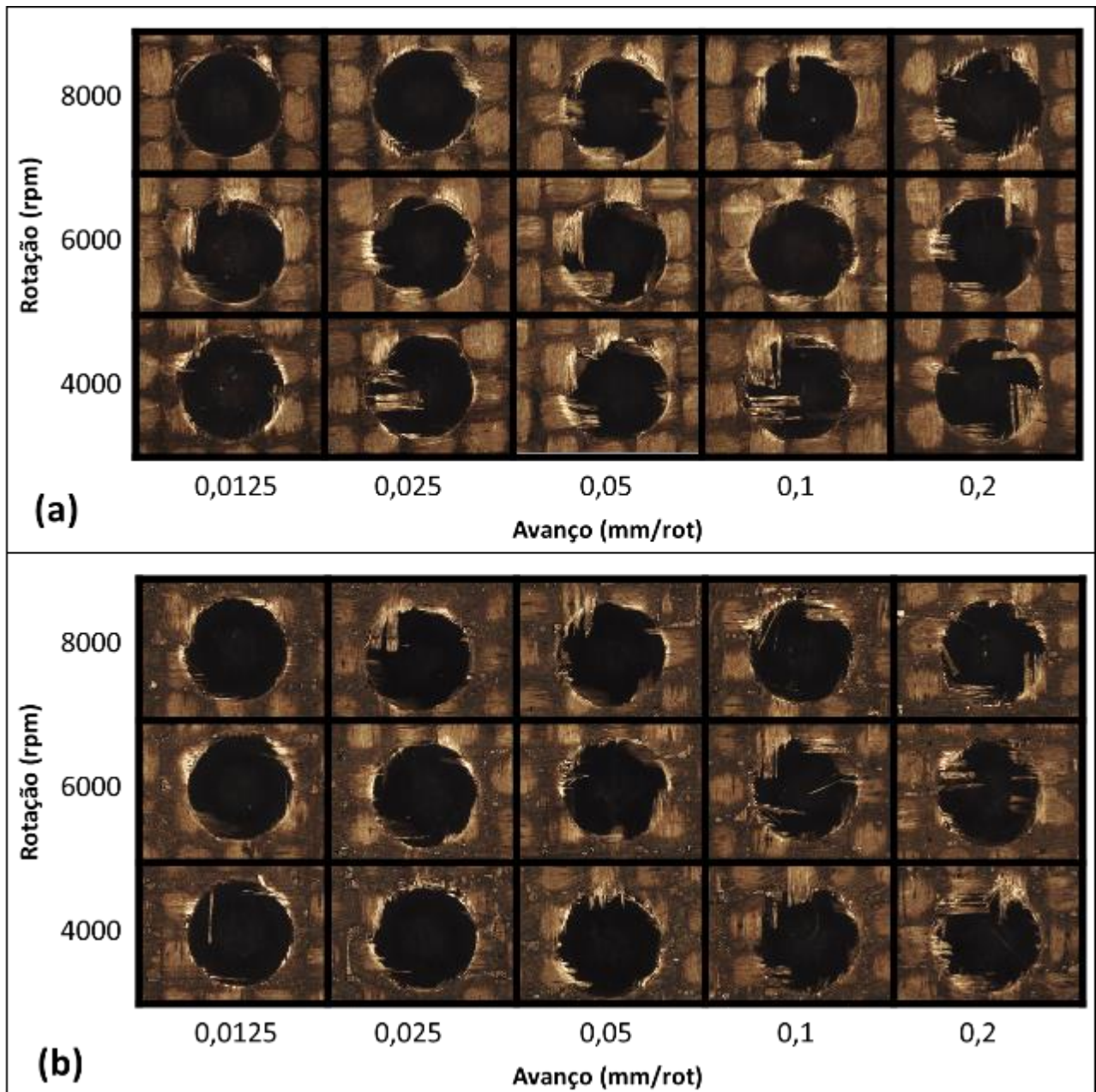
Observa-se que quase todos os furos possuem FNC, mesmo em baixos avanços. Além disso, diferente da entrada, nota-se que para a saída a rotação se mostra mais influente, sendo que a rotação 8000 rpm aparenta ter gerado furos melhores.

Figura 103 – Aspecto da entrada dos furos em função dos parâmetros de corte, utilizando broca de TiAlN e o suporte 1, (a) sem CNT e (b) com CNT



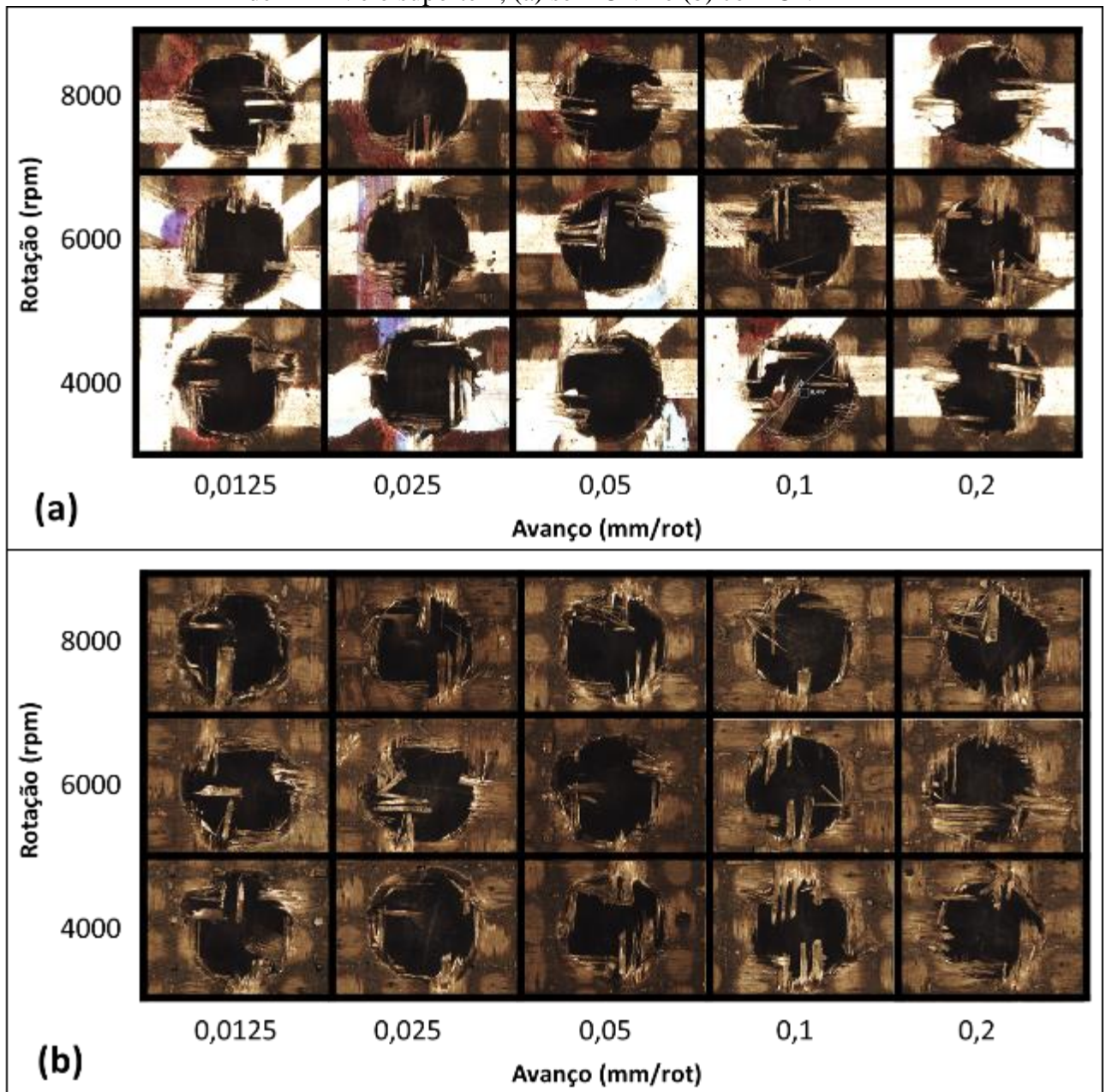
Fonte: Autoria própria

Figura 104 – Aspecto da entrada dos furos em função dos parâmetros de corte, utilizando broca de diamante e o suporte 1, (a) sem CNT e (b) com CNT



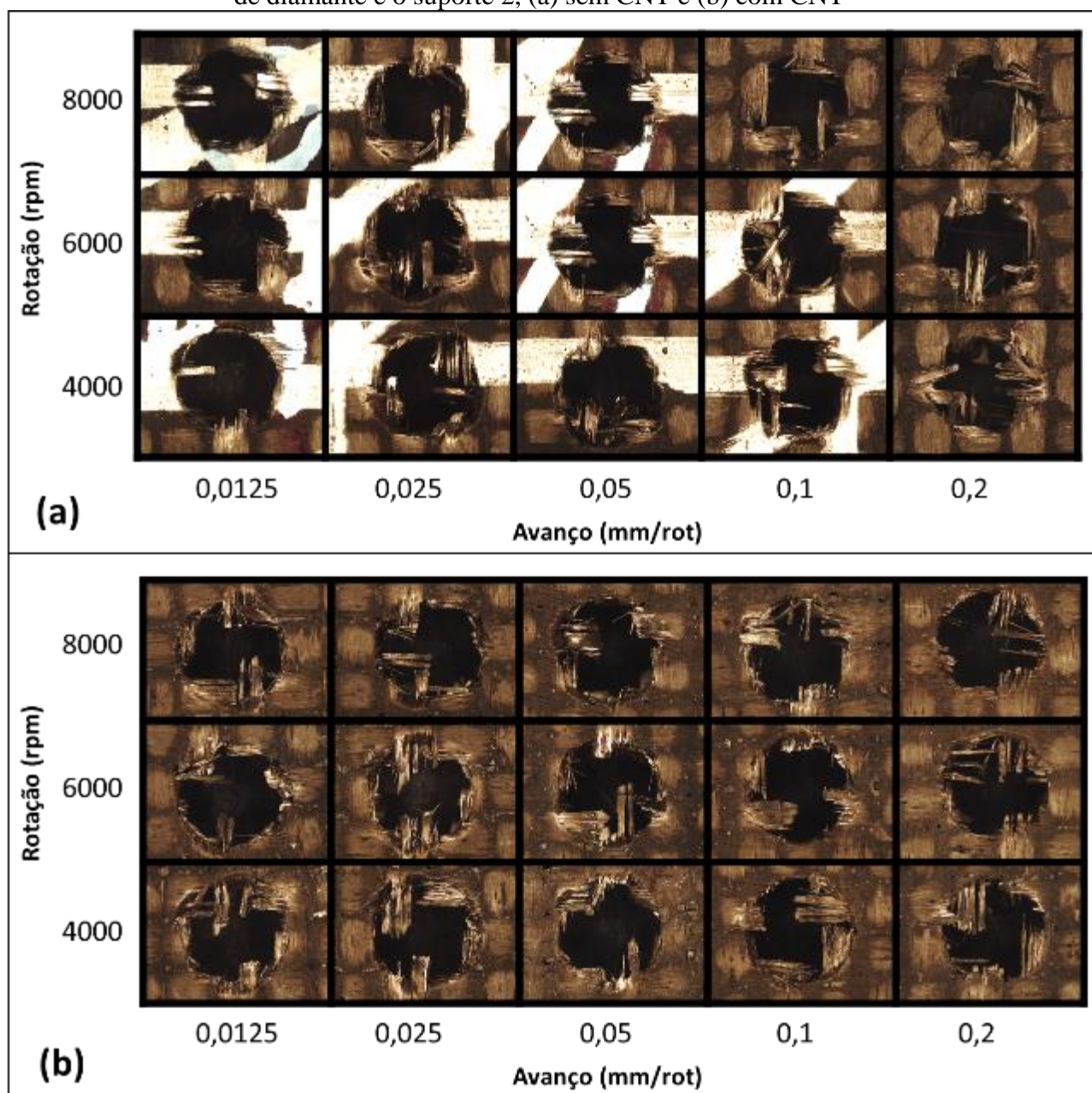
Fonte: Autoria própria

Figura 105 – Aspecto da entrada dos furos em função dos parâmetros de corte, utilizando broca de TiAlN e o suporte 2, (a) sem CNT e (b) com CNT



Fonte: Autoria própria

Figura 106 – Aspecto da entrada dos furos em função dos parâmetros de corte, utilizando broca de diamante e o suporte 2, (a) sem CNT e (b) com CNT



Fonte: Autoria própria

Comparando-se a qualidade dos furos, observa-se que na entrada da broca houve uma menor quantidade de FNC e que os furos realizados com broca de diamante apresentaram mais FNC.

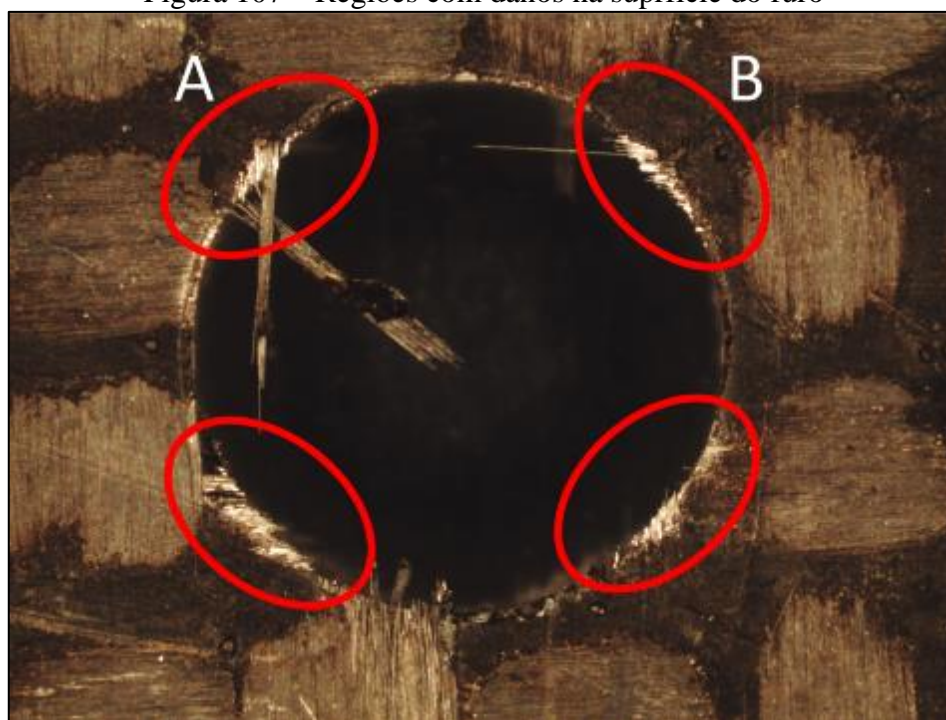
Nota-se também que na maioria dos casos, os laminados com CNT apresentaram mais FNC, que os sem CNT. Isso pode não estar relacionado somente com os parâmetros de corte ou com as brocas utilizadas, mas também com a “qualidade” dos laminados utilizados.

Essa hipótese surgiu baseado em testes com outros compósitos estruturais poliméricos, de matrizes termoplásticas ou termorrígidas. Quando foram empregadas brocas sem revestimento, o

que em teoria é prejudicial a qualidade dos furos, obteve-se furos de melhor qualidade que os obtidos nos laminados deste estudo. Essa conclusão se deve à quantidade de fibras no interior dos furos, pois segundo a empresa Sandvik Coromant® (2010) cita que o ideal é nenhuma FNC.

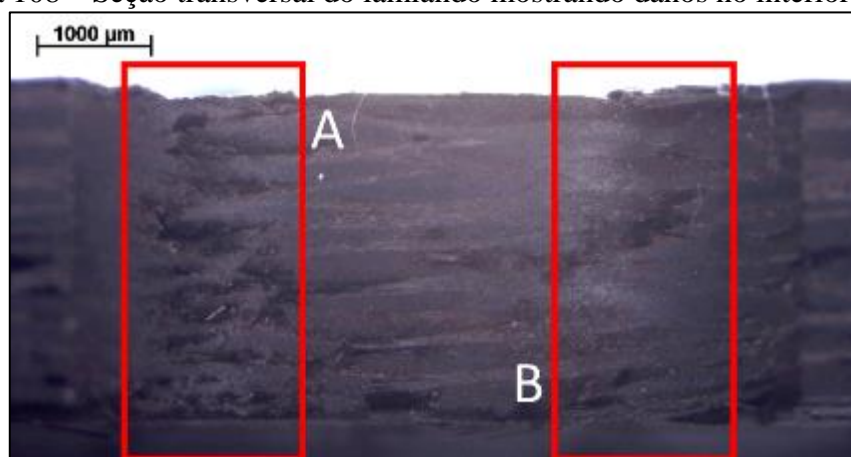
Verifica-se também, que em muitos furos, existem regiões específicas em que sempre ocorre danos (Figura 107). Comparando essas regiões com os danos encontrados no interior dos furos, dos testes preliminares (Figura 108), nota-se que o mesmo ocorre na parede do furo.

Figura 107 – Regiões com danos na superfície do furo



Fonte: Autoria própria

Figura 108 – Seção transversal do lamiando mostrando danos no interior do furo



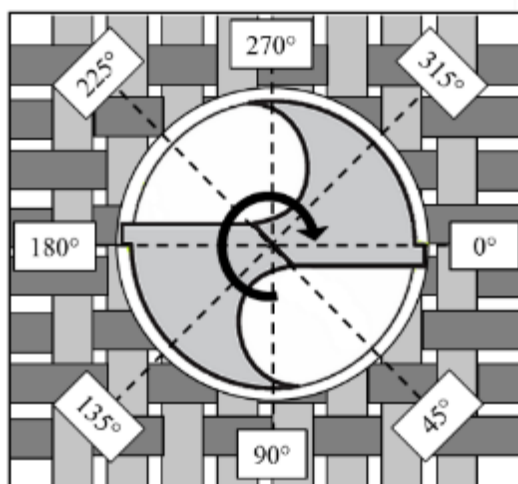
Fonte: Autoria própria

A localização do dano pode estar relacionada com a orientação e ângulo de corte das fibras, pois apesar de não ser um tema tão estudado, pesquisas mostram que algumas características do compósito, como a orientação das fibras, tipo de matriz utilizada e ângulo de corte das fibras, influenciam na qualidade dos furos realizados nos compósitos.

De acordo com Khashaba (2004), Shyha (2010) e Eneyew e Ramulu (2014) dependendo da orientação das fibras (Figura 109) há um maior esforço durante o corte. Eneyew e Ramulu (2014) observaram em seu estudo que haviam regiões em que a rugosidade da parede do furo era sempre maior (135° e 315°), e ao comparar esses resultados com a força de avanço e com uma micrografia do interior do furo, verificaram que nessas regiões ocorria um maior arrancamento de fibras e que eram pontos onde a força de avanço tinha seu maior pico.

Sendo assim, concluíram que a resistência do material às forças de corte varia com o ângulo relativo entre a direção do corte e a orientação da fibra. Mesma conclusão que outros pesquisadores chegaram (CALZADA et al., 2012; PANCHAGNULA; PALANIYANDI, 2018; WANG; RAMULU; AROLA, 1995). Sendo que para um material bidirecional mais duas regiões sofreriam esses danos, 45° e 225° .

Figura 109 – Efeito da orientação da fibra na furação de compósitos com fibras contínuas



Fonte: Autoria própria

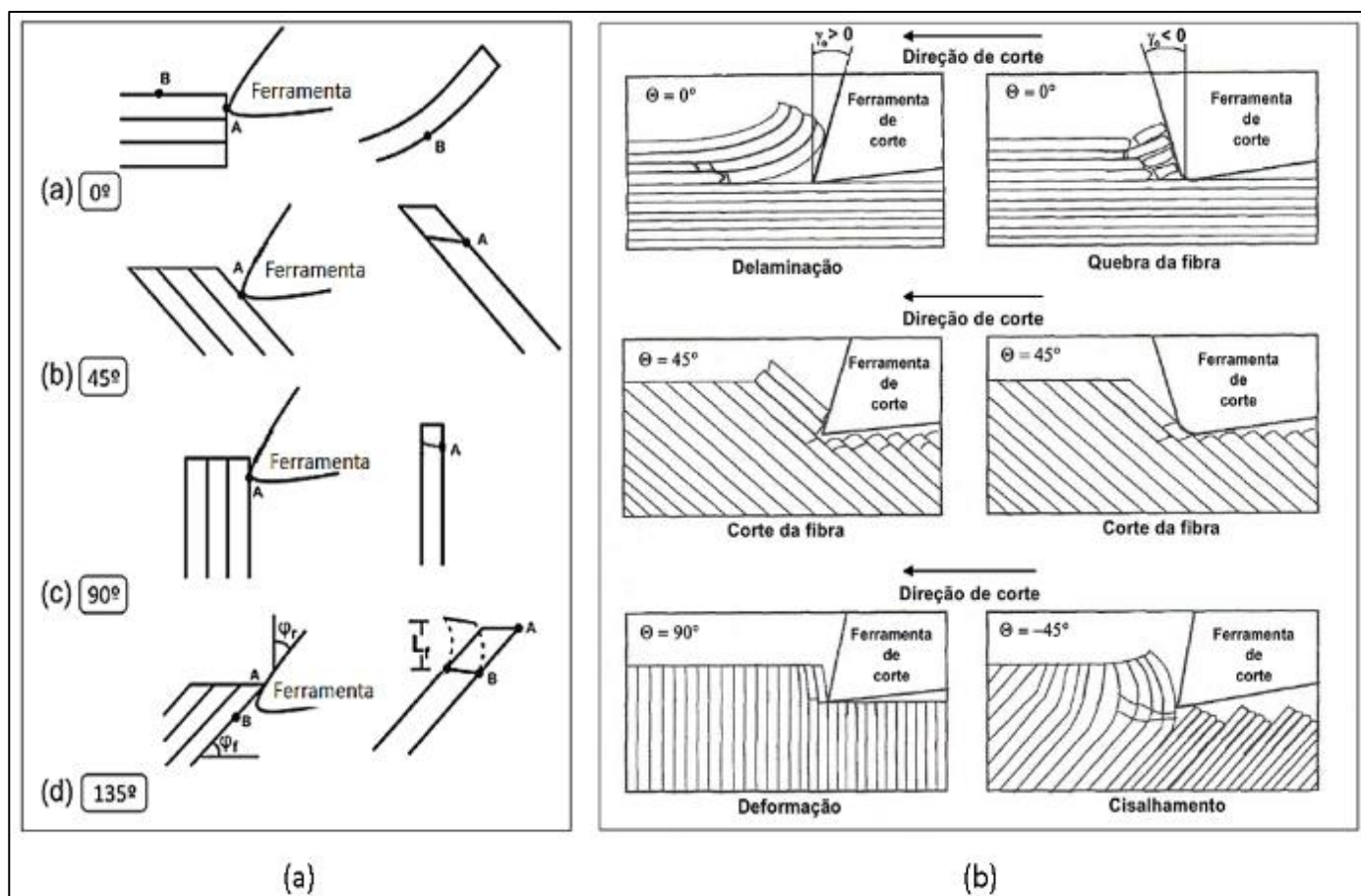
Devida a importância do ângulo de corte da fibra, que nada mais é que o ângulo entre a orientação da fibra e a direção da velocidade de corte, pesquisas foram realizadas tentando compreender como que esse ângulo afetariam a qualidade do furo. Através dessas pesquisas, constatou-se que a orientação da fibra em relação a ferramenta de corte influencia na qualidade do furo. Fato este que corrobora com a hipótese de que as regiões de dano recorrente (Figura 107) estão relacionadas angulação das fibras.

E isso ocorre porque, quando analisado os mecanismos de falha ocorridos durante a furação de compósitos, observa-se que a face de inclinação da ferramenta primeiro entra em contato com a fibra no ponto A, entretanto a falha ocorre devido à curva que se forma no ponto B, abaixo da superfície do corte (Figura 110).

Sendo que para Wang, Ramulu e Arola (1995), a 0° os mecanismos de formação de cavacos são compostos pelos carregamento e fratura Modo I (ao longo da interface fibra/matriz), pelo carregamento no Modo II (por meio do avanço da ferramenta) e também pela fratura perpendicular à direção da fibra sob cargas de flexão. Quando a orientação das fibras entre 15° e 75° , os mecanismos de formação do cavaco podem incluir fratura por cisalhamento, o qual é induzido por compressão ao longo do eixo da fibra, combinada com cisalhamento interfacial ao longo da direção da fibra durante a formação do cavaco.

Já para as orientações maiores que 75° , os mecanismos de formação de cavaco são principalmente compostos de fratura induzida por compressão perpendicular às fibras e fratura de cisalhamento interlaminar junto com a interface fibra/matriz.

Figura 110- Ilustração do mecanismo de falha em função do ângulo de inclinações das fibras

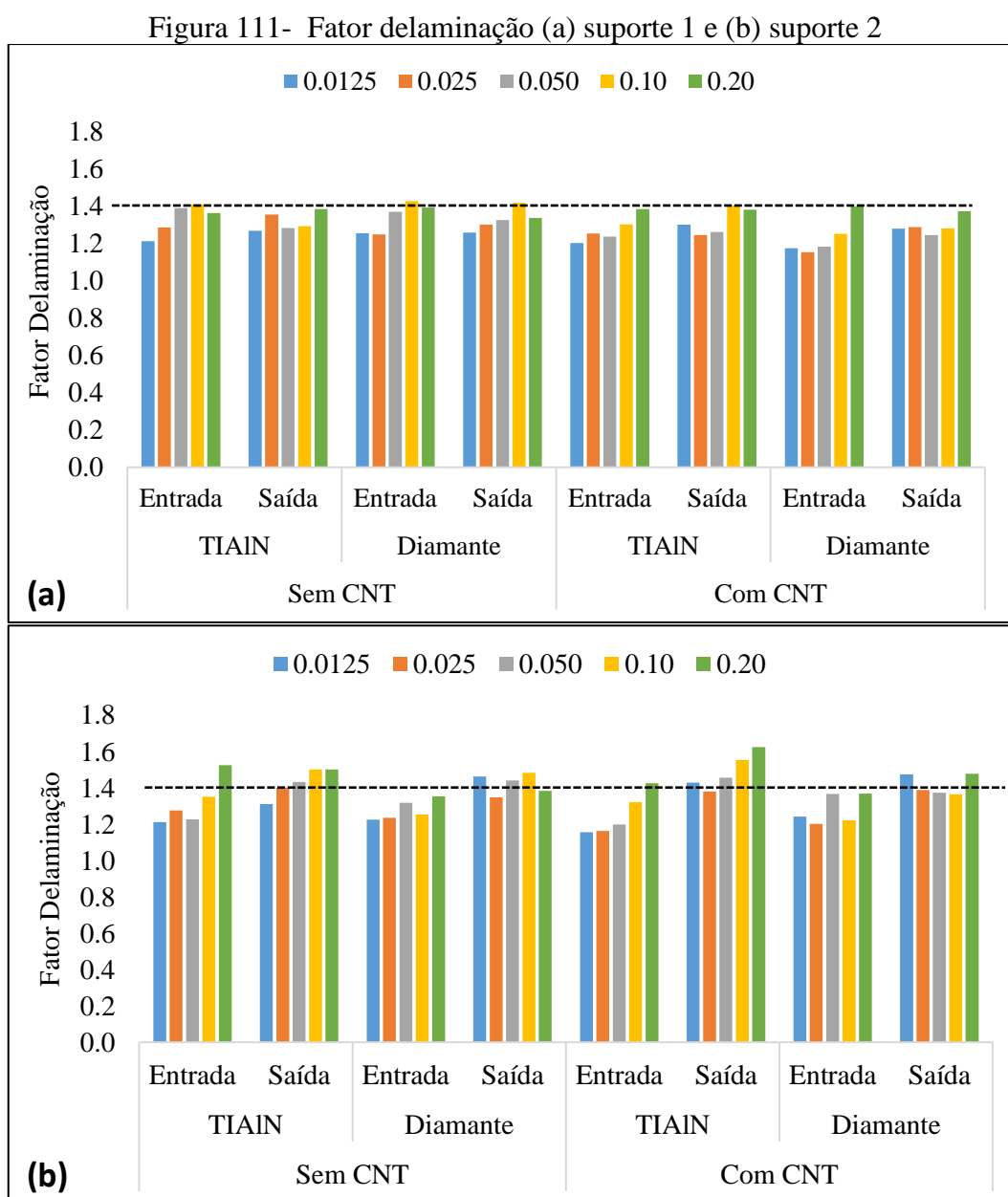


Fonte: Adaptado de Calzada et al. (2012) e (b) Wang, Ramulu e Arola (1995)

5.3.10 Fator delaminação

Para o fator delaminação verificou-se que as médias foram de 1,31 e 1,36 para os suportes 1 e 2 respectivamente, entretanto, apesar das médias serem próximas observa-se que no suporte 2 há uma maior quantidade de valores acima de 1,4.

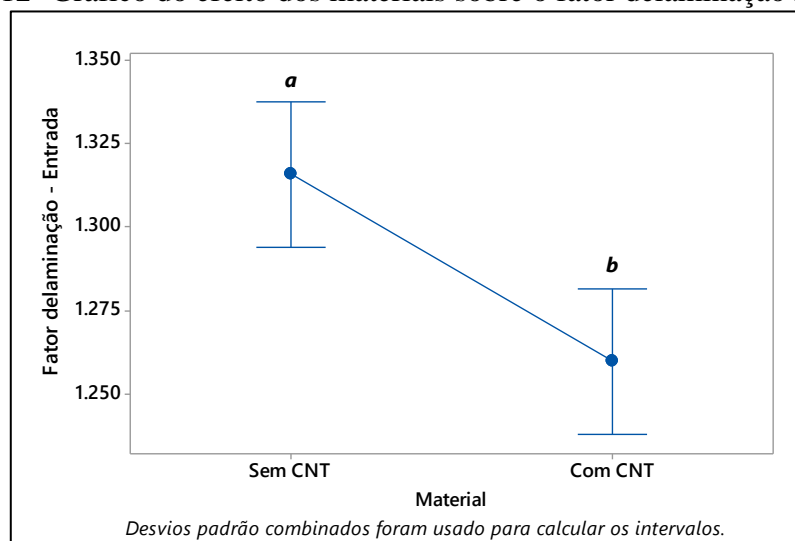
Quando comparada a delaminação na entrada e na saída, verifica-se que para o suporte 2 a delaminação foi menor na entrada; já no caso do suporte 1 dependerá o avanço utilizado, sendo que em geral, o avanço de 0,0125 mm/rot foi o que gerou menor delaminação (Figura 111).



Fonte: Autoria própria

Ao analisar os efeitos dos materiais estudados sobre o fator delaminação (Figura 112), constatou-se que para a entrada da broca houve uma diferença estatística entre os materiais, sendo que a adição de CNT fez com que houvesse uma redução da delaminação causada pelo processo de furação. Isso ocorre porque a adição de nanotubos aos compósitos aumenta a resistência interlaminar (GARCIA; WARDLE; JOHN HART, 2008; WICKS; DE VILLORIA; WARDLE, 2010).

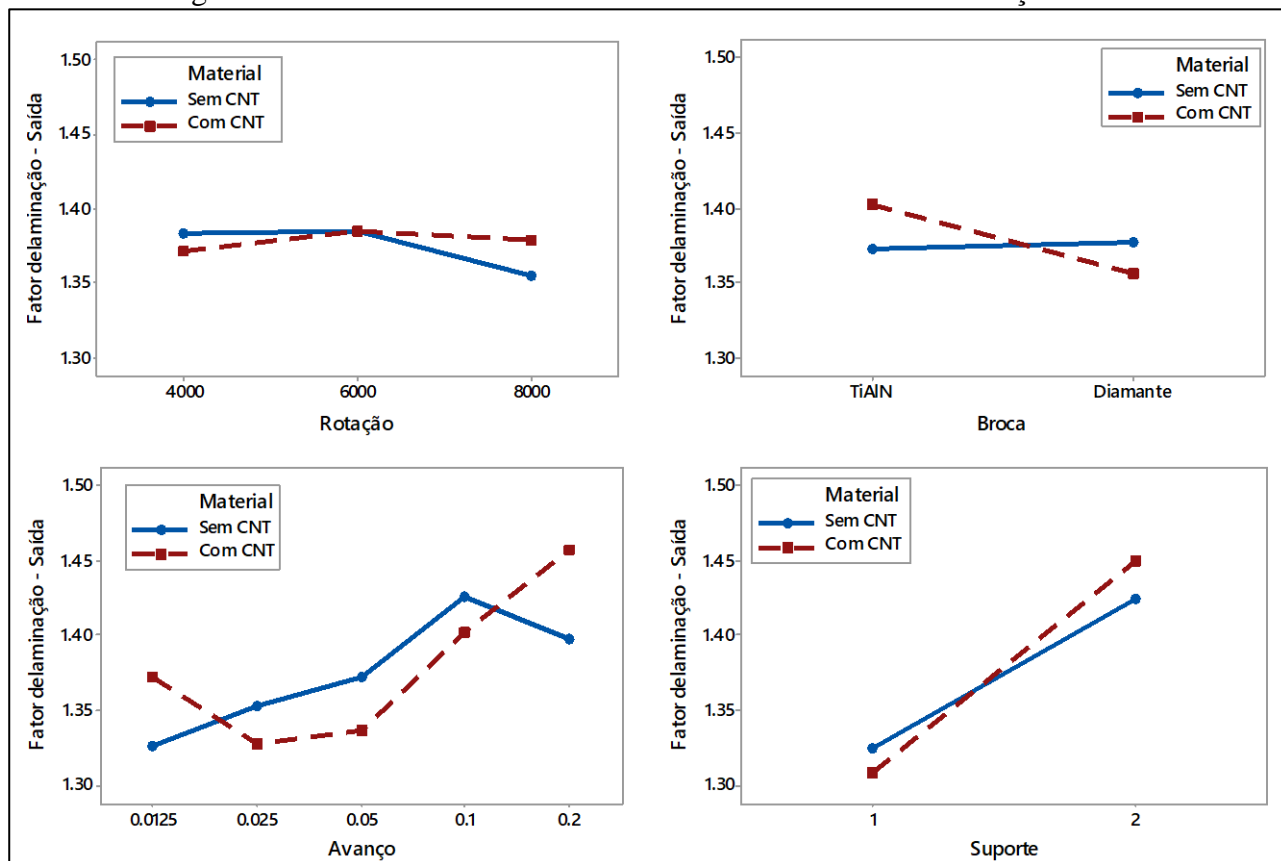
Figura 112- Gráfico do efeito dos materiais sobre o fator delaminação na entrada



Fonte: Autoria própria

Já para os efeitos dos materiais estudados sobre o fator delaminação na saída da broca, constatou-se que o tipo de material não influencia no resultado final, entretanto verificou-se que as respostas obtidas, em função de cada fator principal, foram diferentes (Figura 113).

Figura 113- Gráfico do efeito dos materiais sobre o fator delaminação na saída



Fonte: Autoria própria

Por meio da análise estatística para o fator delaminação (Tabelas 24 a 27 - Apêndice A), constatou-se que, para ambos os materiais, na entrada o avanço foi o fator principal de maior influência e na saída foi o fator suporte.

O fator avanço ter sido o de maior contribuição na entrada da broca era algo esperado por dois motivos. Primeiramente pelo fato da força de avanço ter aumentado com o aumento do avanço, o que ocasiona o aumento da delaminação, e em segundo lugar, porque foi possível observar pela análise do aspecto visual dos furos (Item 5.3.9) uma piora na qualidade a medida que se aumentou o avanço.

Já o fato do fator suporte ser o de maior contribuição na saída também era esperado, visto que pela análise do aspecto visual dos furos, há uma maior quantidade de dano nos furos em função do tipo de suporte utilizado. Sendo que isso deve estar atrelado a maior vibração do sistema quando empregado o suporte 2.

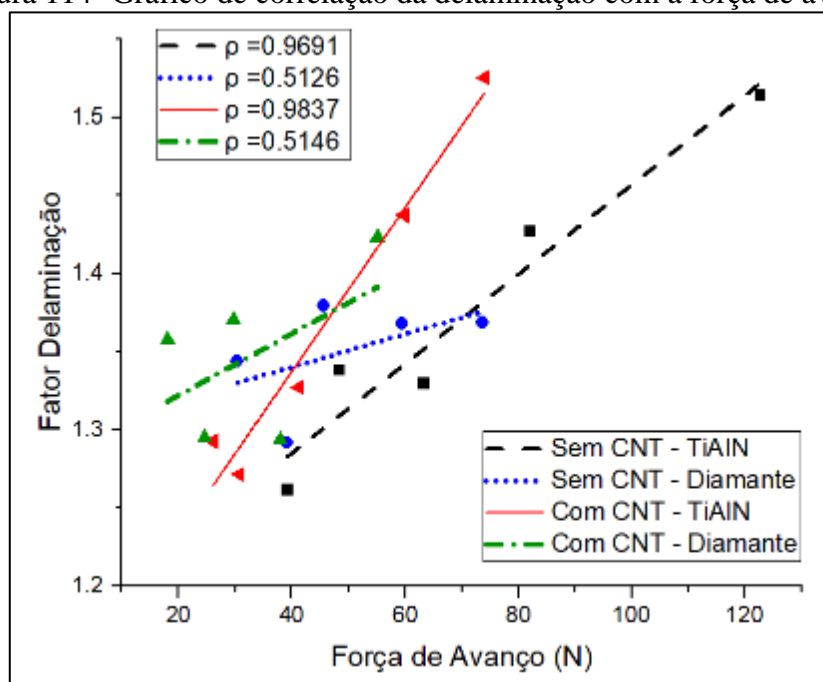
Por meio de gráfico de correlação do fator delaminação com a força de avanço (Figura 114), verifica-se que as brocas diamantadas tendem a gerar menor delaminação, assim como os laminados com CNT, visto que a angulação da reta demonstra que, para um mesmo valor de força de avanço, o fator delaminação é maior para os materiais sem adição de CNT.

Por meio da correlação de Pearson, verifica-se que em todos os casos analisados a correlação é positiva, entretanto, a correlação é mais forte para as brocas de TiAlN, ou seja, nesses casos a chave para reduzir a delaminação durante a furacão está na redução da força de avanço.

A diferença de resultados entre as brocas está relacionada ao conjunto geometria e revestimento. Com relação ao revestimento, pesquisas demonstraram que recobrimentos de diamante geram menor força de avanço que outros recobrimentos (ARUL et al., 2006a; FARAZ; BIERMANN; WEINERT, 2009; FARIA et al., 2008; FERNÁNDEZ-PÉREZ et al., 2021; MURPHY; BYRNE; GILCHRIST, 2002; WANG et al., 2013).

Já em relação a geometria, apesar de vários trabalhos recomendarem o uso da broca helicoidal, por ser um padrão industrial e fornecem menor força de avanço em baixos avanços, à medida que o avanço aumenta a força de avanço gerada por essa geometria tende a ter um aumento mais intenso em relação a outros perfis geométricos, consequentemente, aumentando a delaminação (AAMIR et al., 2019; HOCHENG; TSAO, 2005, 2006).

Figura 114- Gráfico de correlação da delaminação com a força de avanço

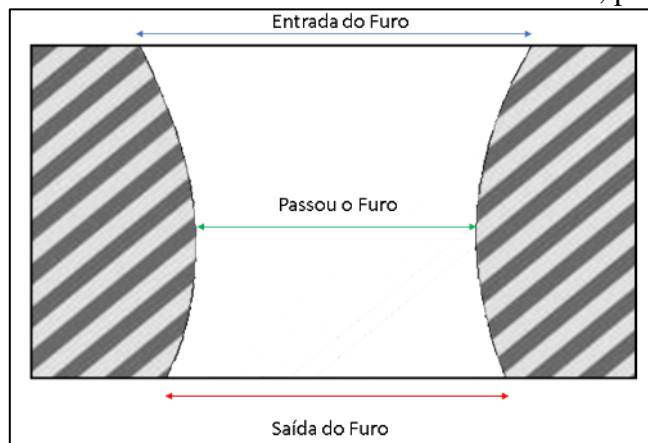


Fonte: Autoria própria

5.3.11 Erro de dimensão

Em estudos preliminares, foi constatado que o furo usinado em compósitos de resina furfurílica/ CNT/ fibra de carbono possuía um perfil ampulheta (Figura 115), no qual o diâmetro da entrada da broca é maior que o da saída da broca, e que o diâmetro do centro do furo é menor que o das extremidades (DAVID-MÜZEL et al., 2018).

Figura 115- Perfil do furo com base nos diâmetros da entrada, passante e da saída



Fonte: David- Muzel et al. (2018)

Por esse motivo as análises do presente estudo foram realizadas na entrada e na saída dos furos, a fim de verificar se as brocas e os parâmetros escolhidos causariam o mesmo efeito, visto que no estudo preliminar, foi utilizado broca de metal duro sem revestimento, com 6.54mm de diâmetro.

Por meio da análise gráfica (Figura 116) verifica-se que na maioria dos casos o diâmetro da entrada foi maior que o da saída, sendo que isso ocorreu principalmente nos laminados com CNT, o que pode estar relacionado a mudança no coeficiente de expansão térmica linear, devido a adição de CNT na matriz polimérica.

A diferença de diâmetro ocorre devido à expansão térmica linear dos materiais, principalmente da matriz polimérica, fazendo assim com que a dimensão final dos furos usinados seja maior ou menor do que o esperado (DAVID-MÜZEL et al., 2020; DAVID MÜZEL; MOLINA; ALVES, 2018).

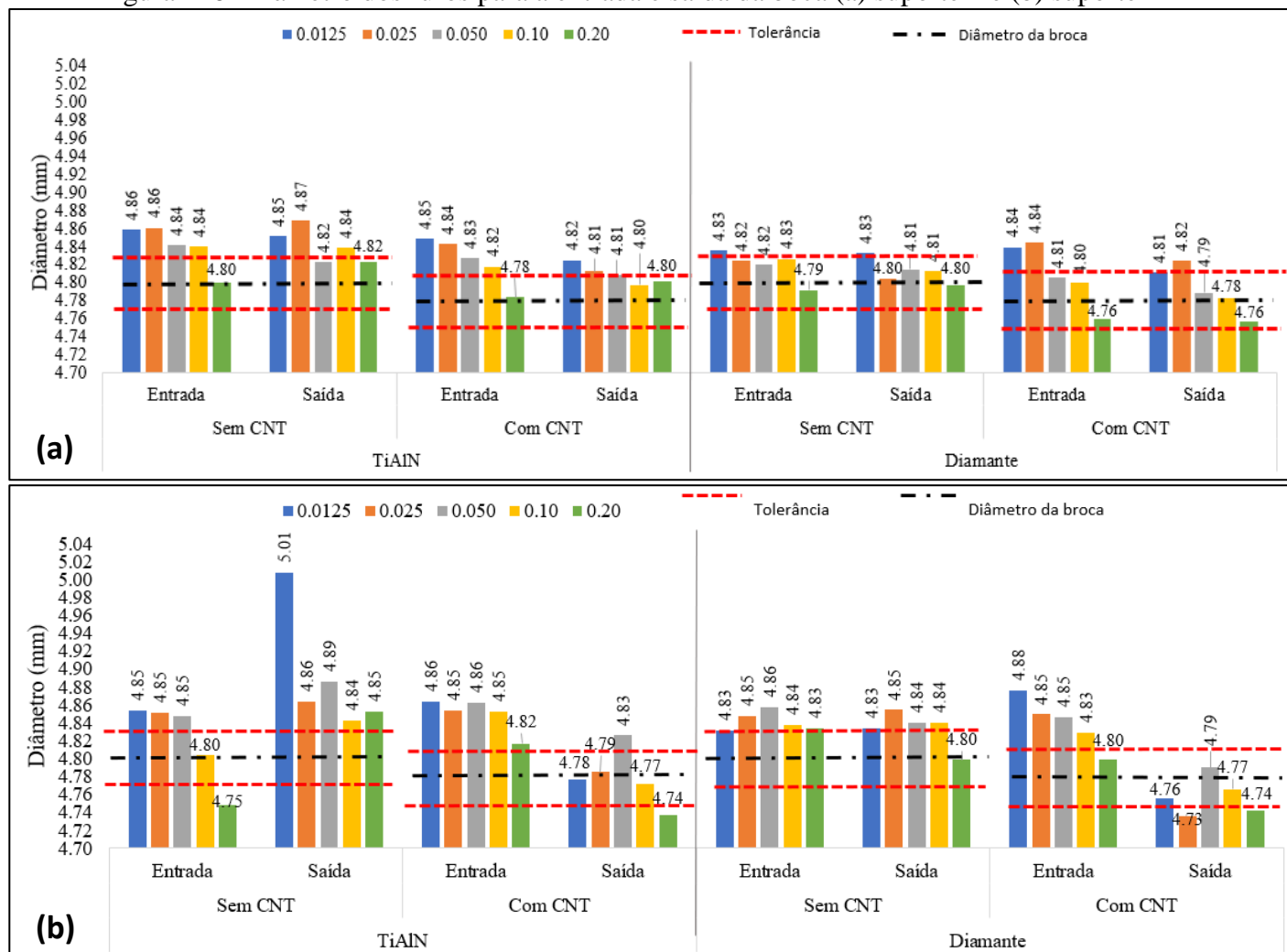
Os estudos mostraram que o aumento da temperatura na região de corte resulta em uma dilatação da matriz polimérica, sendo assim, após a retirada da broca do laminado, o polímero ainda aquecido contrai preenchendo parcialmente o furo realizado (DAVID MÜZEL; MOLINA; ALVES, 2018; KRISHNARAJ et al., 2012; SHYHA et al., 2010, 2011; XU et al., 2019c). Portanto, há a hipótese de que os nanotubos de carbono funcionalizados propiciem essa maior dilatação do material.

Com relação a diferença entre os diâmetros na entrada e na saída, isso está relacionado a variação da temperatura durante o processo, sendo que no início ela é menor que no final, ou seja, há uma maior dilatação da matriz polimérica na saída da broca do que na entrada.

Além disso, nota-se que a maioria dos furos ficou acima do diâmetro da broca (linha preta), sendo esse valor de 4,8mm e 4,78mm para a broca de TiAlN e diamantada respectivamente. Nota-

se também que o avanço de 0,2mm/rot foi o que gerou menores diâmetros, fato este que deve estar relacionado ao aumento da temperatura em função do elevado avanço.

Figura 116- Diâmetro dos furos para a entrada e saída da boca (a) suporte 1 e (b) suporte 2



Fonte: Autoria própria

De acordo com Brinksmeier, Janssen (2002), as tolerâncias dimensionais e geométricas, principalmente no setor aeronáutico, são fatores extremamente importantes e não podem variar mais do que de 30µm para juntas mecânicas. Para verificar se os furos obtidos atendem a esse requisito foram traçadas as linhas vermelhas, tendo como base a linha do diâmetro nominal das brocas, para delimitar a região na qual os furos seriam aceitos. Entretanto vale ressaltar que a variação de 30µm seria no todo, sendo assim, para esse estudo serão considerados 30µm para cima ou para baixo da linha do diâmetro nominal e não a somatória das duas regiões.

Considerando as linhas de tolerância, observa-se que a maioria dos furos não está dentro da tolerância exigida, sendo que isso ocorreu, na grande maioria, para os laminados sem a adição de

CNT. Em geral, os melhores avanços foram os de 0.05, 0.1 e 0.2 mm/rot, visto que esses proporcionaram a maior quantidade de furos dentro da tolerância exigida.

Para facilitar a compreensão, do quão distante do diâmetro nominal o furo ficou, foi plotado um gráfico de porcentagem do erro (Figura 117), no qual é possível verificar se os furos usinados tiveram uma variação de dimensão positiva ou negativa, sendo que, no caso de valores positivos significa que o furo ficou com um diâmetro maior do que o nominal e se for negativo o furo usinado ficou menor.

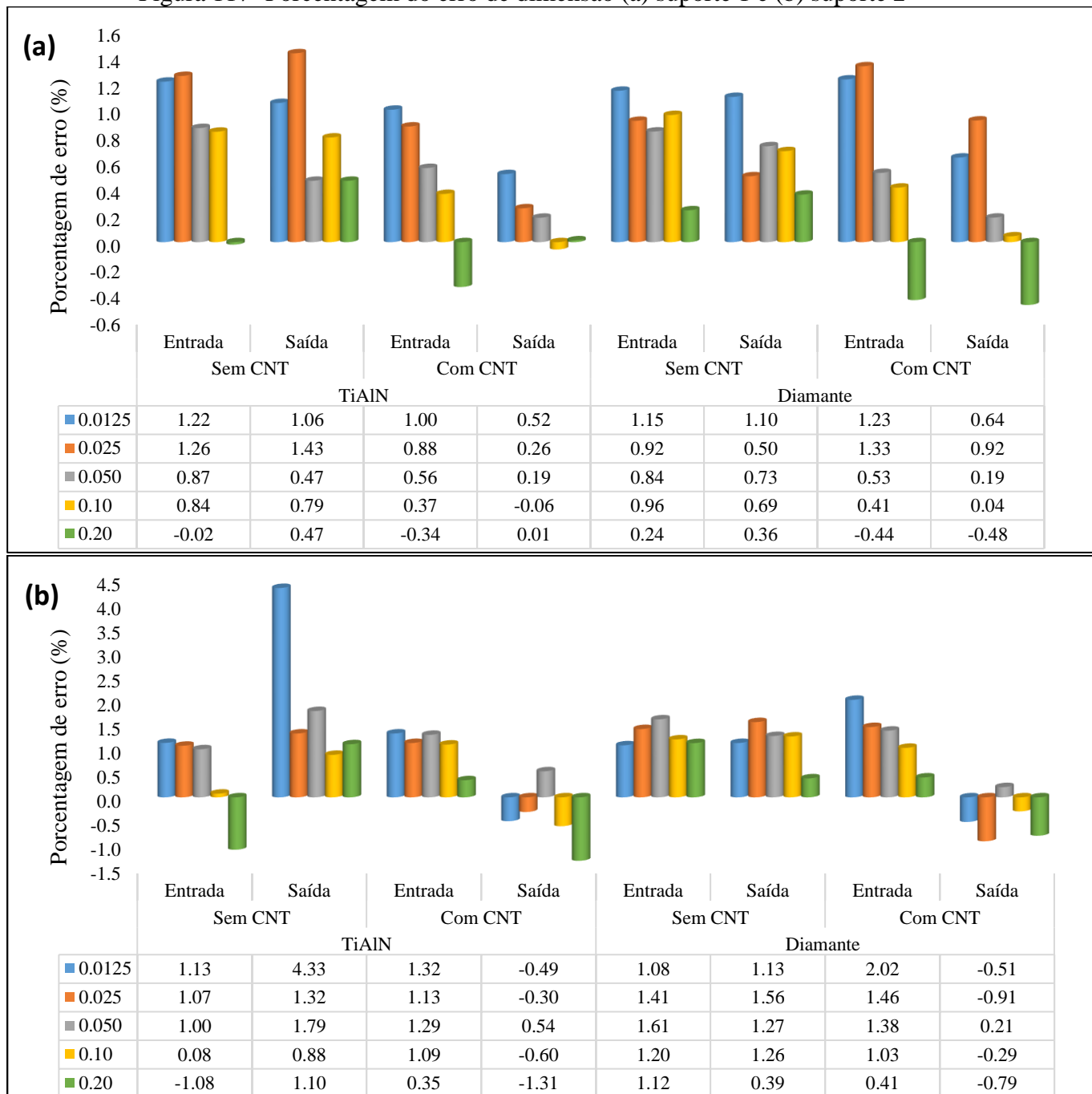
Por meio da análise gráfica observa-se que a maioria dos furos tiveram um erro positivo e que em geral, as menores variações foram obtidas para os avanços de 0,1 e 0,2 mm/rot. Comparando os materiais, verifica-se que os furos usinados nos laminados sem adição de CNT possuem um erro dimensional maior que nos laminados com CNT. Sendo que para a entrada o tipo de material não influencia nos resultados, mas na saída sim onde o com CNT é menor que sem CNT.

De acordo com Shyha et al. (2009) o erro dimensional de compósitos poliméricos reforçados com fibras contínuas é próximo a 2,7%. Ao analisar os resultados obtidos constata-se que as médias dos maiores erros são de 1,7% e 1,17% para os laminados sem CNT e com CNT, respectivamente. O que demonstra que além dos valores obtidos estarem abaixo do esperado, a adição de CNT pode ajudar a reduzir o erro dimensional, ou seja, a expansão e contração da resina aquecida durante o processo de usinagem são menores quando há adição de CNT na matriz polimérica.

Ao comparar os furos na saída e na entrada, verifica-se que na maioria dos casos os valores obtidos na saída estão dentro da tolerância exigida, entretanto é necessário que o furo no todo tenha atingido diâmetros dentro da tolerância, sendo assim, foi plotado um gráfico das médias entre as entradas e saídas (Figura 118).

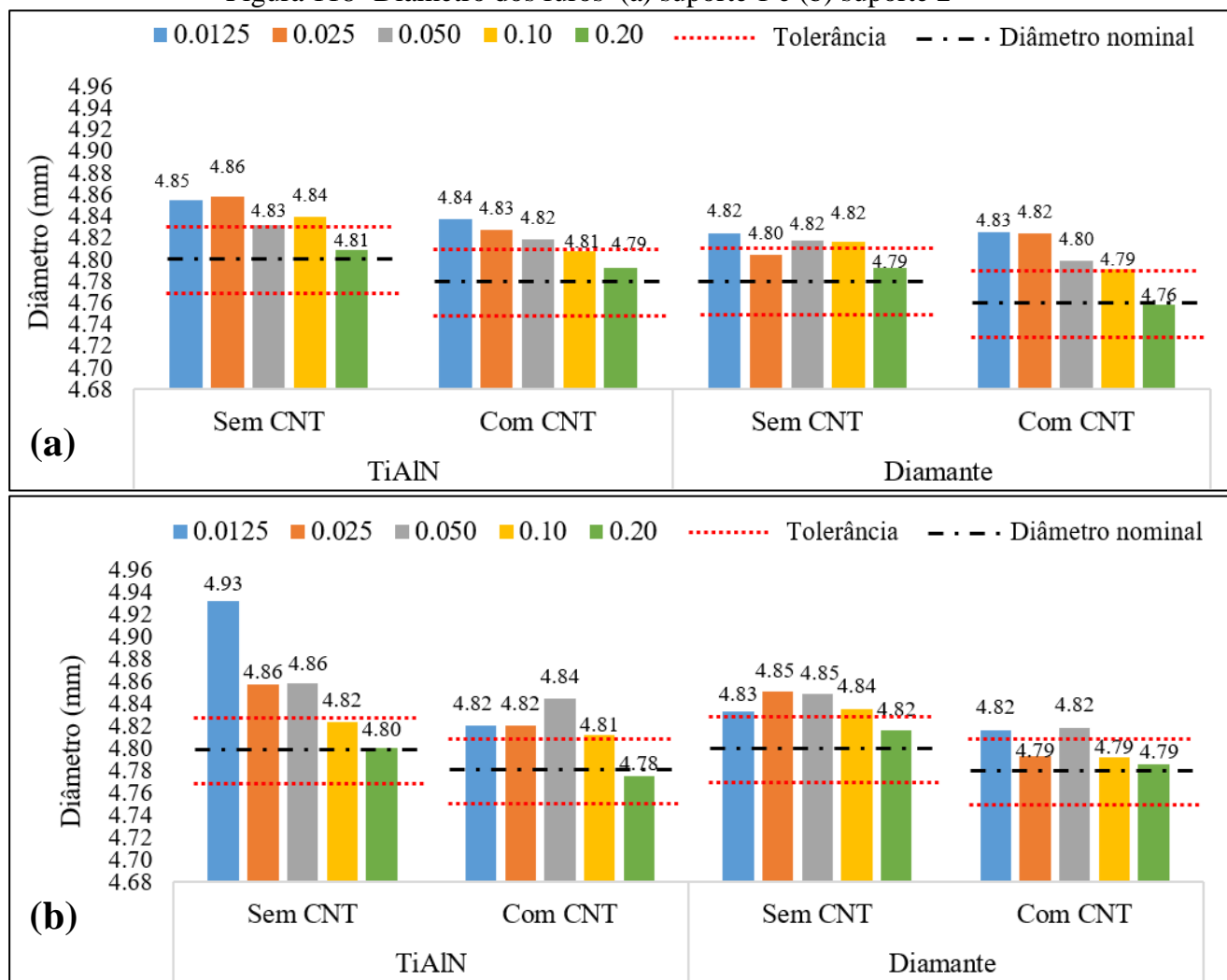
Analisando os avanços utilizados e os furos que estão dentro das especificações, constata-se que para o avanço de 0,02mm/rot todos os furos estão dentro da faixa de tolerância. Já o avanço de 0,1mm/rot gerou furos dentro da tolerância para os materiais com CNT. E que o avanço de 0,0125mm/rot gerou os piores erros de dimensão.

Figura 117- Porcentagem do erro de dimensão (a) suporte 1 e (b) suporte 2



Fonte: Autoria própria

Figura 118- Diâmetro dos furos (a) suporte 1 e (b) suporte 2



Fonte: Autoria própria

5.3.12 Erro de Circularidade

A circularidade é uma tolerância radial bidimensional, que descreve o quão próxima uma peça, de seção transversal diametral, está de um círculo verdadeiro, sendo essa uma das formas de controlar a qualidade dos furos. Quanto menor for o valor da circularidade, mais perto de um círculo verdadeiro o furo usinado está (GIASIN; AYVAR-SOBERANIS, 2017).

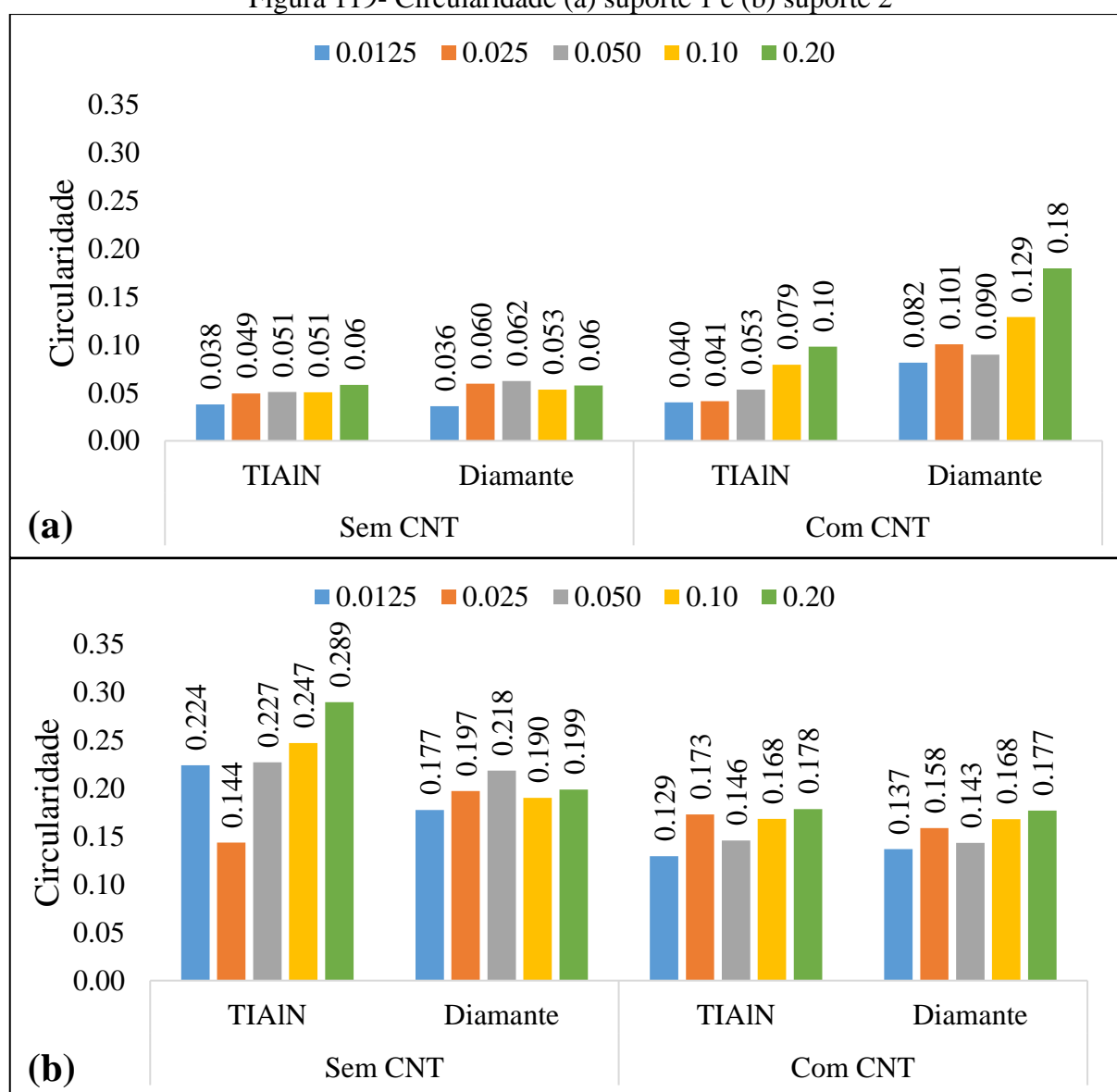
O erro de circularidade é afetado por diversos fatores como os parâmetros de corte, desgaste e material da ferramenta. Por meio da análise gráfica (Figura 119), verifica-se que o suporte e o avanço demonstram ter influência no resultado final, sendo que quando utilizado o suporte 2 a circularidade foi maior que no suporte 1.

Além disso, nota-se que para a ferramenta de TiAlN, no suporte 1, à medida que se aumenta o avanço a circularidade também aumentou. Assim como entre os materiais, sendo que no suporte

2, os laminados sem CNT tiveram maiores circularidades e no suporte 1 os furos nos laminados sem CNT tiveram menor circularidade.

Quando comparado com a literatura verificou-se algo semelhante ao ocorrido, sendo que a influência do avanço irá depender de outros fatores, como geometria e material das ferramentas e do compósito que está sendo usinado (CAMPOS RUBIO et al., 2013; GOWDA et al., 2015; KRISHNARAJ et al., 2012; SHUNMUGESH; KAVAN, 2017; ZITOUNE; KRISHNARAJ; COLLOMBET, 2010).

Figura 119- Circularidade (a) suporte 1 e (b) suporte 2



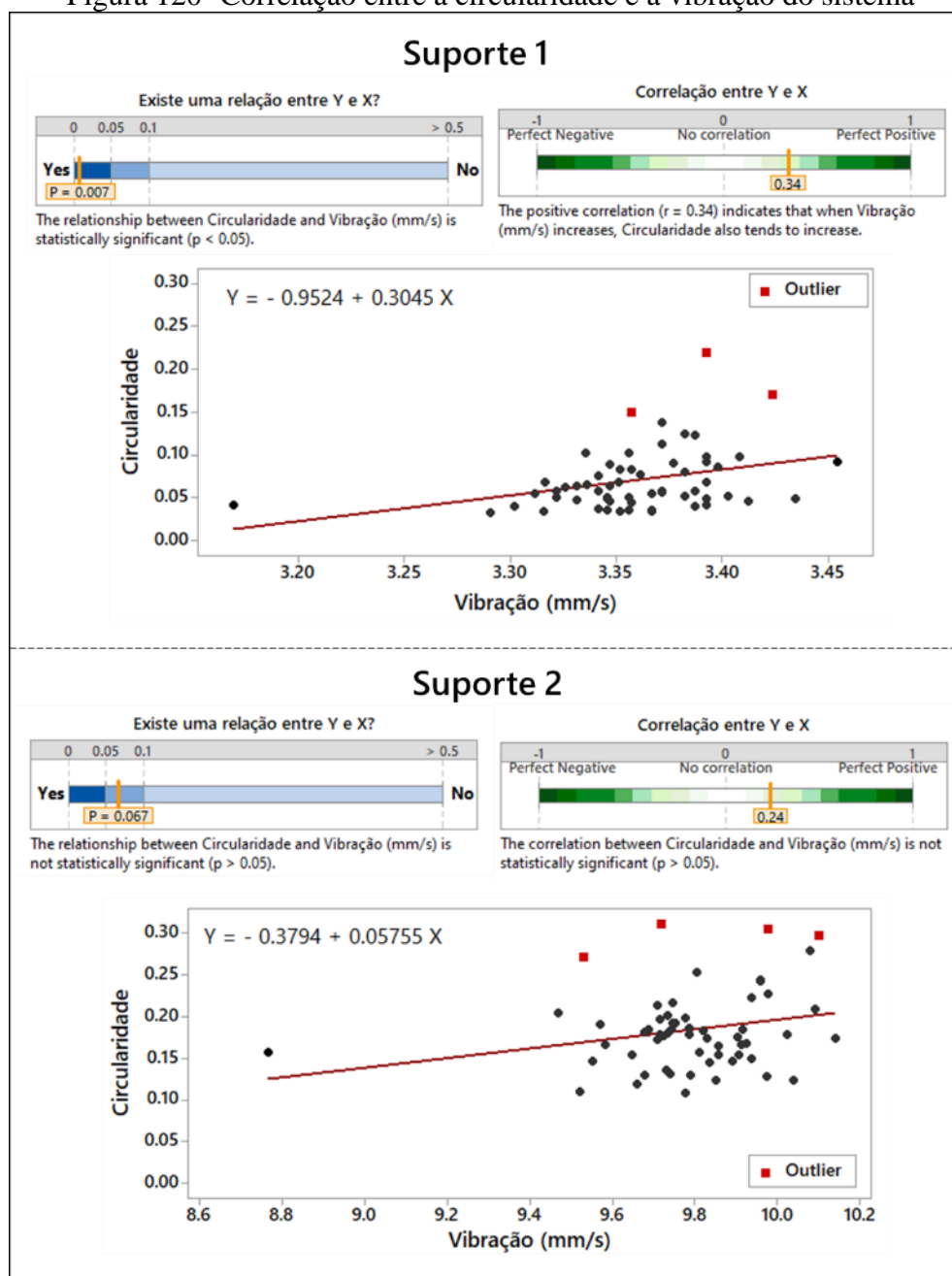
Fonte: Autoria própria

Giasin et al. (2017) citam que o aumento da rotação causa maiores vibrações, devido a uma baixa estabilidade da ferramenta de corte, o que acarreta em um aumento da circularidade.

Entretanto outras pesquisas mostram um padrão de diminuição do erro de circularidade a medida que se aumenta a rotação (CAMPOS RUBIO et al., 2013; GOWDA et al., 2015; KRISHNARAJ et al., 2012; ZITOUNE; KRISHNARAJ; COLLOMBET, 2010).

De maneira geral, no presente estudo a rotação não se mostrou significativa para nenhum dos materiais. Porém ao fazer uma correlação com a vibração (Figura 120), constata-se que para o suporte 1 há uma relação positiva entre circularidade e a vibração, ou seja, ambas sobem ou descem juntas. Entretanto para o suporte 2 não houve correlação.

Figura 120- Correlação entre a circularidade e a vibração do sistema



Fonte: Autoria própria

De acordo com Ponnuvel, Moorthy e Hariharan (2015) o material da ferramenta de corte também influencia no erro de circularidade, pois a temperatura na região do corte irá depender do material da broca utilizada, a qual afeta o coeficiente de expansão térmica linear do material, causando assim as distorções no furo. Para algumas combinações é possível observar a diferença de resultado entre as bocas utilizadas, porém dependerá do suporte e avanço empregados.

5.3.13 Considerações gerais referentes ao estudo da furação

De forma geral, observou-se que a adição de CNT fez com que houvesse diferença entre os valores obtidos dependendo da variável resposta analisada, sendo elas o consumo de potência, pressão específica de corte, fator delaminação e nos erros de dimensão e de circularidade. Em geral os materiais com adição de CNT obtiveram resultados melhores em todas essas análises.

Comparando todas as respostas obtidas no presente estudo, e com base na literatura, foi realizada uma análise de otimização dos parâmetros utilizando somente os dados obtidos para o suporte 2, visto que segundo a literatura a força de avanço é um dos fatores que mais influência na delaminação, e somente com o suporte 2 foi possível coletar esses dados.

Na Tabela 5 são apresentados os resultados da otimização das variáveis resposta referente a qualidade do furo para os laminados sem CNT, para esse conjunto isolado, verificou-se que a broca diamantada, rotação de 4000rpm e avanço de 0,025mm/rot seria o ideal, visto que assim obtêm-se a maior minimização possível dos danos e erros.

Tabela 5 - Otimização para a qualidade dos furos para os laminados sem CNT

	Valor mínimo	Valor máximo	Valor ajustado
Força de Avanço (N)	28,21	132,34	42,62
Erro de Dimensão (%)	0,0	6,10	0,633
Diâmetro (mm)	4,769	5,091	4,8033
Circularidade	0,088	0,574	0,1773
Fator Delaminação - Saída	1,162	1,744	1,361
Fator Delaminação - Entrada	1,123	1,701	1,2427

Entretanto quando considerada as outras respostas referentes ao processo de usinagem, a melhor combinação de parâmetros seria a broca de diamante, rotação de 8000rpm e avanço de 0,2mm/rot. Nesse caso, comparando com o ajuste para as respostas relacionadas a qualidade do furo, observa-se uma elevação dos valores ajustado (Tabela 6), sendo assim, caso não seja necessário a minimização das respostas do processo de usinagem, o ideal seria se utilizar avanços

e rotações mais baixas, visto que, vibração, torque, potência e k_s não se mostraram influentes na qualidade do furo.

Tabela 6-Valores para uma otimização geral para os laminados sem CNT

	Valor mínimo	Valor máximo	Valor ajustado
Força de Avanço (N)	28,207	132,3	71,2
Erro de Dimensão	0,0	6,1	0,667
Diâmetro	4,769	5,1	4,8123
Circularidade	0,088	0,6	0,1843
Fator Delaminação - Saída	1,162	1,7	1,3417
Fator Delaminação - Entrada	1,123	1,7	1,3907
k_s (N/mm²)	765,84	33365,9	771
Torque (N.cm)	90,19	103,3	96,89
Vibração (mm/s)	9,019	10,3	9,69
Potência (W)	367,94	503,1	369,04

Já para os laminados com adição de CNT, os resultados da otimização para as respostas referentes a qualidade do furo (Tabela 7) foram broca de TiAlN, rotação de 4000rpm e avanço de 0,0125mm/rot. Assim como para os laminados sem CNT, quando considerado as variáveis respostas referentes ao processo de usinagem (Tabela 8) há um aumento dos valores ajustados, sendo que a nova combinação seria broca de diamante, rotação de 8000rpm e avanço de 0,1mm/rot.

Tabela 7- Otimização para a qualidade dos furos para os laminados com CNT

	Valor mínimo	Valor máximo	Valor ajustado
Força de Avanço (N)	21,58	128,54	37,75
Erro de Dimensão	0,0	4,2	0,4
Diâmetro (mm)	4,71	5,002	4,8183
Circularidade	0,089	0,346	0,111
Fator Delaminação - Saída	1,141	1,895	1,469
Fator Delaminação - Entrada	0,058	1,745	0,750

Tabela 8-Valores para uma otimização geral para os laminados com CNT

	Valor mínimo	Valor máximo	Valor ajustado
Força de Avanço (N)	21,583	128,5	55,64
Erro de Dimensão	0,00	4,2	0,467
Diâmetro	4,71	5,0	4,782
Circularidade	0,089	0,3	0,181
Fator Delaminação - Saída	1,141	1,9	1,398
Fator Delaminação - Entrada	0,058	1,7	1,192
k_s (N/mm²)	762,784	31525,7	1843
Torque (N.cm)	91,563	103,8	97,34
Vibração (mm/s)	9156	10,4	9,734
Potência (W)	368,08	485,3	441,06

De forma geral, verifica-se que os valores mais baixos de rotação e avanço são indicados para minimizar os danos ocorridos nos furos. Já quando considerados as respostas do processo de usinagem deve-se utilizar rotação de 8000 rpm, broca de diamante e altos avanços.

Para verificar se o aprimoramento dos laminados afetaria a qualidade dos furos, foram realizados alguns testes com os materiais processados com bolsa de vácuo + molde metálico. Para tal foram utilizadas as condições de usinagem que se mostram mais críticas, levando em consideração o diâmetro, circularidade e quantidade de fibras não cortadas, dos furos realizados nos compósitos sem CNT e empregado o suporte 2.

Na Tabela 9 são apresentados os resultados de qualidade dos furos para os materiais aprimorado e o utilizado nesse estudo (normal). Para os testes no material aprimorado foi utilizado broca de TiAlN, rotação de 8000rpm e avanços de 0,0125 e 0,2mm/rot. Vale ressaltar que no caso do fator delaminação foi analisado somente a saída da broca, visto que é onde se observou maior severidade nos danos, e nas demais respostas, foi considera a média dos valores de entrada e saída.

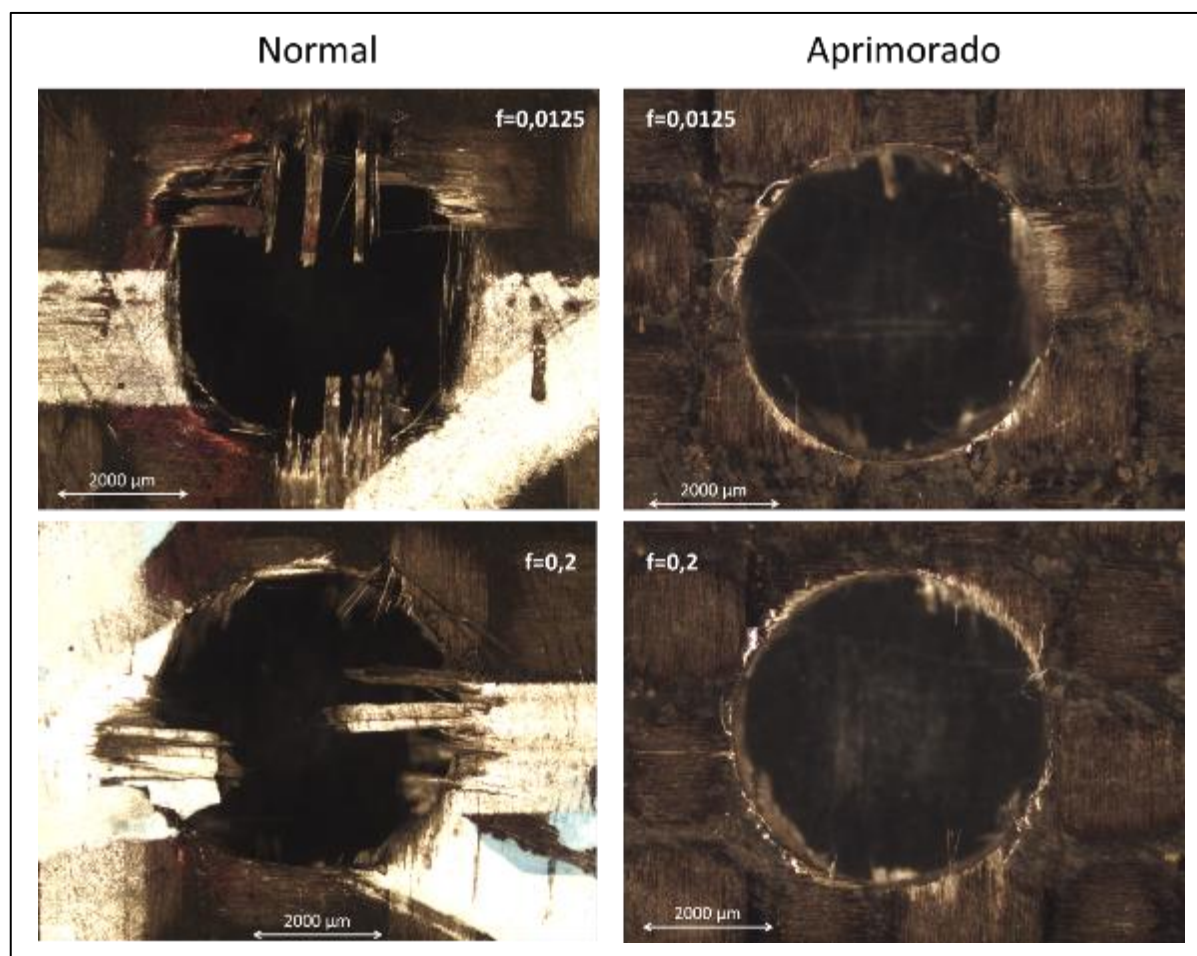
Comparando os valores obtidos, nota-se que os para os laminados aprimorados os resultados foram menores que os do laminado normal. Isso indica que a melhoria do processamento do laminado pode impactar diretamente na qualidade dos furos.

Tabela 9 – Resultados da qualidade do furo para os laminado processado com bolsa de vácuo + molde metálico

Avanço (mm/rot)	Material	Diâmetro (mm)	% erro diametral	Fator delaminação	Circularidade
0,0125	Normal	4,93	2,73	1,31	0,22
	Aprimorado	4,86	1,31	1,18	0,04
0,2	Normal	4,80	1,09	1,50	0,29
	Aprimorado	4,85	1,04	1,33	0,05

Na Figura 121 é apresentada a comparação da saída dos furos, para o laminado normal e aprimorado. Pode -se verificar que houve uma redução considerável da quantidade de fibras não cortadas (FNC), bem como no dano causado à superfície do laminado, devido ao arrancamento de parte da fibra, assim como, as delaminações causadas pela saída da broca do laminado, que força para baixo as FNC e com isso gera as delaminações na superfície do laminado.

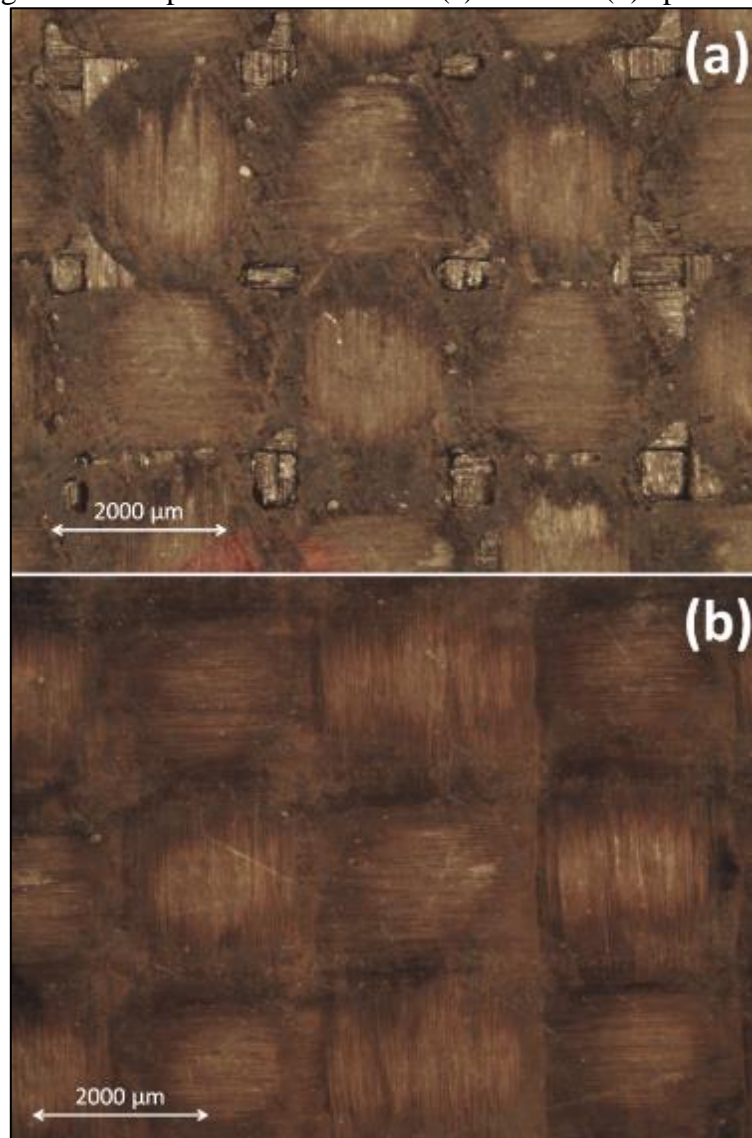
Figura 121- Comparação do aspecto dos furos



Fonte: Autoria própria

A diferença entre os danos ocorridos está ligada a forma de processamento dos laminados, visto que a utilização de *prepreg* e o conjunto bolsa de vácuo + molde metálico possibilitou não só a redução dos vazios e aumento da resistência mecânica, mas também uma melhor distribuição da resina nas fibras, e isso fez com que houvesse a diminuição de regiões sem resina (Figura 122), o que acarretou em uma menor movimentação das fibras e assim houve um melhor corte das fibras.

Figura 122- Superfície dos laminados (a) normal e (b) aprimorado



Fonte: Autoria própria

6 CONCLUSÃO

Com relação aos compósitos produzidos, observou-se a necessidade de se aperfeiçoar o processamento dos mesmos, sendo que os teste iniciais de aperfeiçoamento demonstram que a utilização de bolsa de vácuo e a produção de *prepreg* diminuiu a porosidade do laminado e aumentou a resistência ao cisalhamento.

Com relação ao estudo da furação, constatou-se que a adição de CNT influenciou significativamente em algumas das variáveis resposta, sendo elas o consumo de potência, pressão específica de corte, fator delaminação e nos erros geométricos (dimensão e circularidade). Onde os resultados obtidos para esse laminado foram menores, em comparação com os laminados sem CNT.

Analisando os parâmetros de usinagem utilizados, verificou-se que o mais influente foi o avanço, sendo que para o consumo de potência, pressão específica de corte e erro de dimensão o aumento do avanço fez com que as respostas diminuíssem. Já no caso da força de avanço, aspecto dos furos (quando utilizado o suporte 1) e fator delaminação (na entrada da broca) o aumento do avanço fez com que os resultados aumentassem.

Segundo s resultados obtidos na comparação da qualidade dos furos entre os materiais utilizados nesse estudo e os produzidos durante o estudo de aprimoramento do mesmo, a qualidade do laminado produzido influencia na qualidade do furo usinado, sendo que quase todos os valores obtidos foram menores que as obtidos nos laminados utilizados no presente estudo.

7 TRABALHOS FUTUROS

Com base nos resultados obtidos, sugere-se como trabalhos futuros:

- Estudo da influência da porosidade na qualidade dos furos.
- Maiores estudos da relação do consumo de potência na qualidade dos furos.
- Estudo da influência do tipo de suporte na qualidade dos furos.
- Relação entre o número de furos realizados e o desgaste das brocas

REFERÊNCIAS

- AAMIR, M.; TOLOUEI-RAD, M.; GIASIN, K.; NOSRATI, A. Recent advances in drilling of carbon fiber–reinforced polymers for aerospace applications: a review. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, United Kingdom, v. 105, n. 5–6, p. 2289–2308, 2019. DOI: 10.1007/s00170-019-04348-z.
- ABDALLA, M.; DEAN, D.; ROBINSON, P.; NYAIRO, E. Cure behavior of epoxy/MWCNT nanocomposites: The effect of nanotube surface modification. **Polymer**, United Kingdom, v. 49, n. 15, p. 3310–3317, 2008. DOI: 10.1016/j.polymer.2008.05.016.
- ABDUL NASIR, A. A.; AZMI, A. I.; LIH, T. C.; SHUAIB, N. A. Experimental study towards determination of critical feed for minimization of delamination damage in drilling flax natural fibre composites. **Procedia CIRP**, Netherlands, v. 77, n. Hpc, p. 191–194, 2018. DOI: 10.1016/j.procir.2018.08.283. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.procir.2018.08.283>.
- ABHISHEK; DATTA, S.; MAHAPATRA, S. S. Optimization of thrust, torque, entry, and exist delamination factor during drilling of CFRP composites. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, United Kingdom, v. 76, n. 1–4, p. 401–416, 2014. DOI: 10.1007/s00170-014-6199-3.
- ABISH, J.; SAMAL, P.; NARENTER, M. S.; KANNAN, C.; BALAN, A. S. S. Assessment of drilling-induced damage in CFRP under chilled air environment. **Materials and Manufacturing Processes**, United States, v. 33, n. 12, p. 1361–1368, 2018. DOI: 10.1080/10426914.2017.1415452. Disponível em: <https://doi.org/10.1080/10426914.2017.1415452>.
- ABRÃO, A. M.; FARIA, P. E.; CAMPOS RUBIO, J. C.; REIS, P.; DAVIM, J. P. Drilling of fiber reinforced plastics: A review. **Journal of Materials Processing Technology**, Netherlands, v. 186, n. 1–3, p. 1–7, 2007. DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2006.11.146. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S092401360601137X>.
- ABRÃO, A. M.; RUBIO, J. C. Campos; 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**, United Kingdom, v. 29, n. 2, p. 508–513, 2008. DOI: 10.1016/j.matdes.2007.01.016. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0261306907000313>.
- ABRATE, S.; WALTON, D. A. Machining of composite materials. Part I: Traditional methods. **Composites Manufacturing**, United Kingdom, v. 3, n. 2, p. 75–83, 1992. DOI: 10.1016/0956-7143(92)90119-F.
- AIRBUS. **Composites: Airbus continues to shape the future**. 2017. Disponível em: <https://www.airbus.com/newsroom/news/en/2017/08/composites--airbus-continues-to-shape-the-future.html>. Acesso em: 5 ago. 2018.
- ALMEIDA, L. E. N. **Obtenção e caracterização de compósitos ablativos de matrizes fenólica e fenólica modificada com epoxi, com reforço de fibra de carbono picada**. 2007. Dissertação (Mestrado em Ciências). Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos, 2007.
- ALSAEED, T.; YOUSIF, B. F. Machinability of glass/date palm fibre epoxy composites. **International Journal of Machining and Machinability of Materials**, Australia, v. 16, n. 2, p. 129–150, 2014. DOI: 10.1504/IJMMM.2014.064685.
- AMBHORE, N.; KAMBLE, D.; CHINCHANIKAR, S.; WAYAL, V. Tool condition monitoring system: A review. **Materials Today: Proceedings**, Netherlands, v. 2, n. 4–5, p. 3419–3428, 2015.

DOI: 10.1016/j.matpr.2015.07.317. Disponível em:
<http://dx.doi.org/10.1016/j.matpr.2015.07.317>.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM C830**: Standard Test Methods for Apparent Porosity, Liquid Absorption, Apparent Specific Gravity, and Bulk Density of Refractory Shapes by Vacuum. West Conshohocken, 2016

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D2344**: Standard Test Method for Short-Beam Strength of Polymer Matrix Composite Materials and Their Laminates. West Conshohocken, 2016.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D7028**: Standard Test Method for Glass Transition Temperature (DMA Tg) of Polymer Matrix Composites by Dynamic Mechanical Analysis (DMA). West Conshohocken, 2015.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM E2550**: Standard Test Method for Thermal Stability by Thermogravimetry. West Conshohocken, 2017.

AMEUR, M.; HABAK, M.; KENANE, M.; AOUICI, H.; CHEIKH, M. Machinability analysis of dry drilling of carbon/epoxy composites: cases of exit delamination and cylindricity error. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, United Kingdom, v. 88, n. 9–12, p. 2557–2571, 2017. DOI: 10.1007/s00170-016-8967-8.

ANAND, G.; ALAGUMURTHI, N.; PALANIKUMAR, K.; VENKATESHWARAN, N.; ELANSEZHAIN, R. Influence of drilling process parameters on hybrid vinyl ester composite. **Materials and Manufacturing Processes**, United States, v. 33, n. 12, p. 1299–1305, 2018. DOI: 10.1080/10426914.2018.1453161. Disponível em: <https://doi.org/10.1080/10426914.2018.1453161>.

ANARGHYA, A.; HARSHITH, D. N.; RAO, N.; NAYAK, N. S.; GURUMURTHY, B. M.; ABHISHEK, V. N.; PATIL, I. G. S. Thrust and torque force analysis in the drilling of aramid fibre-reinforced composite laminates using RSM and MLPNN-GA. **Heliyon**, United Kingdom, v. 4, n. 7, p. e00703, 2018. DOI: 10.1016/j.heliyon.2018.e00703. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2018.e00703>.

ANCELOTTI JUNIOR, A. C. **Efeitos da porosidade na resistencia ao cisalhamento e nas propriedades dinamicas de compositos de fibra de carbono/resina epoxi**. 2006. Dissertação (Mestrado em Ciências) em Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos, 2006.

ANDREUCCI, R. **Ensaio por ultrassom: Aspectos básicos**. Associação Brasileira de Ensaio Não Destrutivos e Inspeção – Abendi, 2014. Disponível em: [http://www.abendi.org.br/abendi/Upload/file/US_maio-2014\(1\).pdf%3E](http://www.abendi.org.br/abendi/Upload/file/US_maio-2014(1).pdf%3E).

ANNU, A.; BHATTACHARYA, B.; SINGH, P. K.; SHUKLA, P. K.; RHEE, H. W. Carbon nanotube using spray pyrolysis: Recent scenario. **Journal of Alloys and Compounds**, Switzerland, v. 691, p. 970–982, 2017. DOI: 10.1016/j.jallcom.2016.08.246. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jallcom.2016.08.246>.

AQEL, A.; EL-NOUR, K. M. M. A.; AMMAR, R. A. A.; AL-WARTHAN, A. Carbon nanotubes, science and technology part (I) structure, synthesis and characterisation. **Arabian Journal of Chemistry**, Netherlands, v. 5, n. 1, p. 1–23, 2012. DOI: 10.1016/j.arabjc.2010.08.022. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.arabjc.2010.08.022>.

ARUL, S.; VIJAYARAGHAVAN, L.; MALHOTRA, S. K. Online monitoring of acoustic emission for quality control in drilling of polymeric composites. **Journal of Materials Processing Technology**, Netherlands, v. 185, n. 1–3, p. 184–190, 2007. DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2006.03.114.

ARUL, S.; VIJAYARAGHAVAN, L.; MALHOTRA, S. K.; KRISHNAMURTHY, R. Influence of tool material on dynamics of drilling of GFRP composites. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, United Kingdom, v. 29, n. 7–8, p. 655–662, 2006. a. DOI: 10.1007/s00170-005-2581-5.

ARUL, S.; VIJAYARAGHAVAN, L.; MALHOTRA, S. K.; KRISHNAMURTHY, R. The effect of vibratory drilling on hole quality in polymeric composites. **International Journal of Machine Tools and Manufacture**, United Kingdom, v. 46, n. 3–4, p. 252–259, 2006. b. DOI: 10.1016/j.ijmachtools.2005.05.023.

ASHIR, M.; NOCKE, A.; BULAVINOV, A.; PINCHUK, R.; CHERIF, C. Influence of defined amount of voids on the mechanical properties of carbon fiber-reinforced plastics. **Polymer Composites**, United States, v. 40, n. S2, p. E1049–E1056, 2019. DOI: 10.1002/pc.24820.

ASHRAFI, B. et al. Enhancement of mechanical performance of epoxy/carbon fiber laminate composites using single-walled carbon nanotubes. **Composites Science and Technology**, United Kingdom, v. 71, n. 13, p. 1569–1578, 2011. DOI: 10.1016/j.compscitech.2011.06.015.

AVEEN, K. P.; LONDE, N. V.; AMIN, G. G.; SALIM SHAIKH, I. A review on the effects of input parameters & filler composition on delamination during machining of FRP composites. **Materials Today: Proceedings**, Netherlands, 2021. DOI: 10.1016/j.matpr.2021.02.264. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.02.264>.

AYATOLLAHI, M. R.; SHADLOU, S.; SHOKRIEH, M. M.; CHITSAZZADEH, M. Effect of multi-walled carbon nanotube aspect ratio on mechanical and electrical properties of epoxy-based nanocomposites. **Polymer Testing**, United Kingdom, v. 30, n. 5, p. 548–556, 2011. DOI: 10.1016/j.polymertesting.2011.04.008. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.polymertesting.2011.04.008>.

BAKER, A; DUTTON, S; KELLY, D. **Composite Materials for Aircraft Structures**. Virginia: American Institute of Aeronautics and Astronautics, Inc., 2004.

BAL, S. Experimental study of mechanical and electrical properties of carbon nanofiber/epoxy composites. **Materials & Design**, United Kingdom, v. 31, n. 5, p. 2406–2413, 2010. DOI: 10.1016/j.matdes.2009.11.058. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.matdes.2009.11.058>.

BAPTISTA, E. A.; COPPINI, N. L. Maximizando o Lucro: Otimizando Processos de Usinagem. *In: 21º ENCONTRO NACIONAL DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO 2001*, Salvador. **Anais [...]**. Salvador: Enegep, 2001. p. 225–232.

BASMACI, G.; YORUK, A. S.; KOKLU, U.; MORKAVUK, S. Impact of cryogenic condition and drill diameter on drilling performance of CFRP. **Applied Sciences**, Switzerland, v. 7, n. 7, 2017. DOI: 10.3390/app7070667.

BATISTA, M.; RODRIGUES, A.; BASSO, I.; BRANDÃO DE OLIVEIRA, F.; TOTI, F. A. Method for Assessing Hole Damages in Composite Materials. *In: 9º CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA DE FABRICAÇÃO 2017*, Joinville. **Anais [...]**. Joinville: ABCM, 2017. p. 8. DOI: 10.26678/ABCM.COBEP2017.COF2017-0521. Disponível em: <http://abcm.org.br/anais-de-eventos/COF2017/0521>.

BAYRAKTAR, S.; TURGUT, Y. Investigation of the cutting forces and surface roughness in milling carbon-fiber-reinforced polymer composite material. **Materiali in Tehnologije**, Slovenia, v. 50, n. 4, p. 591–600, 2016. DOI: 10.17222/mit.2015.199.

BERTHELOT, J. M. **Composite Materials: Mechanical Behavior and Structural Analysis**. 1. ed. New York: Springer Science & Business Media, 1999.

BEZERRA, E. B.; FRANÇA, D. C.; MORAIS, D. D. S.; ARAÚJO, E. M.; ROSA, M. F.; OLIVEIRA, A. D. Estudo das propriedades mecânicas e termomecânicas de compósitos de Poli (ϵ -caprolactona)/ Nanolínter. **Revista Eletrônica de Materiais e Processos**, Brasil, v. 10, n. 1, p. 16–20, 2015.

BOEING. **787 DREAMLINER BY DESIGN: Advanced Composite Use**. 2018. Disponível em: <https://www.boeing.com/commercial/787/by-design/#/advanced-composite-use>. Acesso em: 10 maio. 2018.

BONHIN, E. P.; DAVID-MÜZEL, S.; ALVES, M. C. S.; BOTELHO, E. C.; RIBEIRO, M. V. A review of mechanical drilling on fiber metal laminates. **Journal of Composite Materials**, United States, v. 55, n. 6, p. 843–869, 2021. DOI: 10.1177/0021998320957743. Disponível em: <http://journals.sagepub.com/doi/10.1177/0021998320957743>.

BONNET, C.; POULACHON, G.; RECH, J.; GIRARD, Y.; COSTES, J. P. CFRP drilling: Fundamental study of local feed force and consequences on hole exit damage. **International Journal of Machine Tools and Manufacture**, United Kingdom, v. 94, p. 57–64, 2015. DOI: 10.1016/j.ijmachtools.2015.04.006. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2015.04.006>.

BORGES, S. G. **Síntese e Caracterização de Resinas Fenólicas Líquidas do Tipo Novolaca Aplicáveis no Processo de Pultrusão**. 2004. Dissertação (Mestrado em Engenharia). Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2004.

BORK, C. B. S. **Otimização de Variáveis de Processo para a Furação do Aço Inoxidável Austenítico 14541**. 1995. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica). Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 1995

BOTELHO, E. C. **Processamento E Caracterização De Compósitos De Resina Fenólica Com Nanotubos De Carbono Com Aplicações Aeroespaciais**. 2011. Livre Docência (Livre-Docência em Processamento de Compósitos na área de Engenharia de Materiais). Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2011.

BRINKSMEIER, E.; JANSSEN, R. Drilling of multi-layer composite materials consisting of carbon fiber reinforced plastics (CFRP), titanium and aluminum alloys. **CIRP Annals - Manufacturing Technology**, Switzerland, v. 51, n. 1, p. 87–90, 2002. DOI: 10.1016/S0007-8506(07)61472-3.

BYRNE, G.; DORNFELD, D.; INASAKI, I.; KETTELER, G.; KÖNIG, W.; TETI, R. Tool Condition Monitoring (TCM) - The Status of Research and Industrial Application. **CIRP Annals - Manufacturing Technology**, Switzerland, v. 44, n. 2, p. 541–567, 1995. DOI: 10.1016/S0007-8506(07)60503-4.

CAGGIANO, A.; NELE, L. Comparison of drilled hole quality evaluation in CFRP/CFRP stacks using optical and ultrasonic non-destructive inspection. **Machining Science and Technology**, United States, v. 22, n. 5, p. 865–880, 2018. DOI: 10.1080/10910344.2018.1466330. Disponível em: <https://doi.org/10.1080/10910344.2018.1466330>.

CALLISTER JUNIOR, W. D.; RETHWISCH, D. G. **Materials Science and Engineering: An Introduction**. 8. ed. São Paulo: LTC, 2013.

CALZADA, K. A.; KAPOOR, S. G.; DEVOR, R. E.; SAMUEL, J.; SRIVASTAVA, A. K. Modeling and interpretation of fiber orientation-based failure mechanisms in machining of carbon fiber-reinforced polymer composites. **Journal of Manufacturing Processes**, United States, v. 14, n. 2, p. 141–149, 2012. DOI: 10.1016/j.jmapro.2011.09.005. Disponível em:

<http://dx.doi.org/10.1016/j.jmapro.2011.09.005>.

CAMPOS-RUBIO, J. C.; ABRÃO, A. M.; FARIA, P. E.; CORREIA, A. E.; DAVIM, J. P. Effects of high speed in the drilling of glass fibre reinforced plastic: Evaluation of the delamination factor. **International Journal of Machine Tools and Manufacture**, United Kingdom, v. 48, n. 6, p. 715–720, 2008. DOI: 10.1016/j.ijmachtools.2007.10.015.

CAMPOS RUBIO, J. C.; SILVA, L. J.; LEITE, W. O.; PANZERA, T. H.; FILHO, S. L. M. R.; DAVIM, J. P. Investigations on the drilling process of unreinforced and reinforced polyamides using Taguchi method. **Composites Part B: Engineering**, United Kingdom, v. 55, p. 338–344, 2013. DOI: 10.1016/j.compositesb.2013.06.042. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.compositesb.2013.06.042>.

CAPELLO, E. Workpiece damping and its effect on delamination damage in drilling thin composite laminates. **Journal of Materials Processing Technology**, Netherlands, v. 148, n. 2, p. 186–195, 2004. DOI: 10.1016/S0924-0136(03)00812-4.

CARBALLEIRA, P. **Mechanical and electrical properties of carbon nanofiber–ceramic nanoparticle–polymer composites**. 2010. Thyses (PhD. Fachbereich für Maschinenbau). Technische Universität Kaiserslautern, Kaiserslautern, 2010.

CHE, D.; SAXENA, I.; HAN, P.; GUO, P.; EHMANN, K. F. Machining of Carbon Fiber Reinforced Plastics/Polymers: A Literature Review. **Journal of Manufacturing Science and Engineering**, United States, v. 136, n. 3, p. 034001, 2014. DOI: 10.1115/1.4026526. Disponível em: <http://manufacturingscience.asmedigitalcollection.asme.org/article.aspx?doi=10.1115/1.4026526>

CHEAPTUBES. **COOH Functionalized Multi Walled Carbon Nanotubes 8-15nm**. 2019. Disponível em: <https://www.cheaptubes.com/product/cooh-functionalized-multi-walled-carbon-nanotubes-8-15nm/>. Acesso em: 3 out. 2019.

CHEN, B. Y.; TAY, T. E.; BAIZ, P. M.; PINHO, S. T. Numerical analysis of size effects on open-hole tensile composite laminates. **Composites Part A: Applied Science and Manufacturing**, United Kingdom, v. 47, n. 1, p. 52–62, 2013. DOI: 10.1016/j.compositesa.2012.12.001. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.compositesa.2012.12.001>.

CHEN, H.; RUAN, H.; LU, X.; FU, J.; LANGRISH, T.; LU, X. Efficient catalytic transfer hydrogenation of furfural to furfuryl alcohol in near-critical isopropanol over Cu / MgO-Al₂O₃ catalyst. **Molecular Catalysis**, Netherlands, v. 445, p. 94–101, 2018. DOI: 10.1016/j.mcat.2017.11.011. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.mcat.2017.11.011>.

CHEN, Q.; GUAN, Z.; LI, Z.; JI, Z.; ZHUO, Y. Experimental investigation on impact performances of GLARE laminates. **Chinese Journal of Aeronautics**, China, v. 28, n. 6, p. 1784–1792, 2015. DOI: 10.1016/j.cja.2015.07.002. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.cja.2015.07.002>.

CHEN, W. C. Some experimental investigations in the drilling of carbon fiber-reinforced plastic (CFRP) composite laminates. **International Journal of Machine Tools and Manufacture**, United Kingdom, v. 37, n. 8, p. 1097–1108, 1997. DOI: 10.1016/S0890-6955(96)00095-8.

CHITA, R. J. S. **Estudo da delaminação em compósitos**. 2012. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica). Universidade do Porto, Porto, 2012.

CHUNG, D. D. L. **Composite Materials**. 2. ed. London: Springer London, 2010. DOI: 10.1007/978-1-84882-831-5.

COMPOSITE EVOLUTION. Bioresin prepreg meets fire safety standard. **Reinforced Plastics**,

United Kingdom, v. 63, n. 3, p. 106, 2019. DOI: 10.1016/j.repl.2019.04.006.

CONCEIÇÃO JR, P. O. **Sinais de vibração no monitoramento do processo de retificação plana de cerâmicas avançadas**. 2016. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica). Universidade Estadual Paulista, Bauru, 2016.

CONEJO, L. S. **Processamento e caracterização de compósitos multifuncionais de resina furfurílica/CNT/fibra de carbono**. 2019. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica). Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2019.

COSTA, M. L. **Efeito do conteúdo de vazios nas propriedades mecânicas de compósitos avançados carbono/epóxi e carbono/bismaleimida**. 2002. Tese (Doutorado em Engenharia Aeronáutica e Mecânica). Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos, 2002.

CUI, J.; TAN, J.; CUI, X.; ZHU, Y.; DENG, T. **Conversion of Xylose to Furfuryl Alcohol and 2-Methylfuran in a Continuous Fixed-Bed Reactor**. Germany. v. 9 DOI: 10.1002/cssc.201600116.

DALLAS, D, B. **Tool and Manufacturing Engineers Handbook**. 3. ed. Dearborn: Society of Manufacturing Engineers, 1976.

DAMIÃO, A.; DONDEO, F.; FREIRE, S. D.; NASCIMENTO, F.; OISHI, S.; BOTELHO, E. C. Carbono vítreo para aplicação em dispositivos ópticos aeroespaciais. *In: 6º BRAZILIAN CONFERENCE ON MANUFACTURING ENGINEERING 2011, Caxias do Sul. Anais [...]*. Caxias do Sul: 6º COBEF, 2011.

DANON, B; MARCOTULLIO, G; DE JONG, W. Mechanistic and kinetic aspects of pentose dehydration towards furfural in aqueous media employing homogeneous catalysis. **Green Chemistry**, United Kingdom, v. 16, n. 1, p. 39–54, 2014. DOI: 10.1039/C3GC41351A. Disponível em: <http://xlink.rsc.org/?DOI=C3GC41351A>.

DAVID-MÜZEL, S.; BONHIN, E. P.; BOTELHO, E. C.; ALVES, M. C. S. Análise do erro dimensional dos furos em laminado de resina furfurílica /CNT/ fibra de carbono. *In: 2º WORKSHOP DA PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA E ENGENHARIA DE PRODUÇÃO 2018, Guaratinguetá. Anais [...]*. Guaratinguetá p. 2.

DAVID-MÜZEL, S.; BONHIN, E. P.; RIBEIRO, M. V; BOTELHO, E. C.; ALVES, M. C. S. Furfuryl resin/CNT/carbon fiber drilling, using carbide drill coated with Balinit-Helica. **Materials and Manufacturing Processes**, United States, v. 35, n. 10, p. 1096–1103, 2020. DOI: 10.1080/10426914.2020.1765252. Disponível em: <https://doi.org/10.1080/10426914.2020.1765252>.

DAVID MÜZEL, S.; BONHIN, E. P.; GUIMARÃES, N. M.; GUIDI, E. S. Application of the Finite Element Method in the Analysis of Composite Materials: A Review. **Polymers**, Switzerland, v. 12, n. 4, p. 818, 2020. DOI: 10.3390/polym12040818. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2073-4360/12/4/818>.

DAVID MÜZEL, S.; MOLINA, J. ..; ALVES, M. C. .. **Estudo da Usinagem de Compósitos Poliméricos: O Desempenho do Compósito Plástico Madeira e da Madeira Plástica submetidos aos processos de fresamento e furação**. 1. ed. Beau Bassin: Novas Edições Acadêmicas, 2018.

DAVIM, J. P. (ORG.). **Machining of Metal Matrix Composites**. London: Springer, 2012.

DAVIM, J. P. (ORG.). **Machinability of Fibre-Reinforced Plastics**. 1. ed. Deutsche: De Gruyter, 2015.

DAVIM, J. P.; REIS, P. Study of delamination in drilling carbon fiber reinforced plastics (CFRP)

using design experiments. **Composite Structures**, United Kingdom, v. 59, n. 4, p. 481–487, 2003. a. DOI: 10.1016/S0263-8223(02)00257-X.

DAVIM, J. P.; REIS, P. Drilling carbon fiber reinforced plastics manufactured by autoclave—experimental and statistical study. **Materials & Design**, United Kingdom, v. 24, n. 5, p. 315–324, 2003. b. DOI: 10.1016/S0261-3069(03)00062-1. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0261306903000621>.

DAVIM, J. P.; REIS, P.; ANTÓNIO, C. C. Experimental study of drilling glass fiber reinforced plastics (GFRP) manufactured by hand lay-up. **Composites Science and Technology**, United Kingdom, v. 64, n. 2, p. 289–297, 2004. DOI: 10.1016/S0266-3538(03)00253-7.

DAVIM, J.; RUBIO, J. C.; ABRÃO, A. M. A novel approach based on digital image analysis to evaluate the delamination factor after drilling composite laminates. **Composites Science and Technology**, United Kingdom, v. 67, n. 9, p. 1939–1945, 2007. DOI: 10.1016/j.compscitech.2006.10.009.

DE VOLDER, M. F. L.; TAWFICK, S. H.; BAUGHMAN, R. H.; HART, A. J. Carbon Nanotubes: Present and Future Commercial Applications. **Science**, United States, v. 339, n. 6119, p. 535–539, 2013. DOI: 10.1126/science.1222453. Disponível em: <http://www.sciencemag.org/lookup/doi/10.1126/science.1222453>.

DE VOS, P.; STÅHL, J. E. **Tool deterioration: Best Practices**. 1. ed. Fagersta: Seco Tools AB, 2014.

DEKA, H.; MISRA, M.; MOHANTY, A. Renewable resource based “all green composites” from kenaf biofiber and poly(furfuryl alcohol) bioresin. **Industrial Crops and Products**, Netherlands, v. 41, n. 1, p. 94–101, 2013. DOI: 10.1016/j.indcrop.2012.03.037. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.indcrop.2012.03.037>.

DEKA, H.; MOHANTY, A.; MISRA, M. Renewable-Resource-Based Green Blends from Poly(furfuryl alcohol) Bioresin and Lignin. **Macromolecular Materials and Engineering**, Germany, v. 299, n. 5, p. 552–559, 2014. DOI: 10.1002/mame.201300221. Disponível em: <http://doi.wiley.com/10.1002/mame.201300221>.

DÍAZ-ÁLVAREZ, J.; OLMEDO, A.; SANTIUSTE, C.; MIGUÉLEZ, M. H. Theoretical estimation of thermal effects in drilling of woven carbon fiber composite. **Materials**, Switzerland, v. 7, n. 6, p. 4442–4454, 2014. DOI: 10.3390/ma7064442.

DÍEZ-PASCUAL, A. M.; NAFFAKH, M.; MARCO, C.; ELLIS, G.; GÓMEZ-FATOU, M. A. High-performance nanocomposites based on polyetherketones. **Progress in Materials Science**, United Kingdom, v. 57, n. 7, p. 1106–1190, 2012. DOI: 10.1016/j.pmatsci.2012.03.003. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0079642512000266>.

DINIZ, A. E.; MARCONDE, F. C.; COPPINI, N. L. **Tecnologia de Usinagem dos Materiais**. 8. ed. São Paulo: Artliber, 2013.

DOGRUSADIK, A.; KENTLI, A. Comparative assessment of support plates' influences on delamination damage in micro-drilling of CFRP laminates. **Composite Structures**, United Kingdom, v. 173, p. 156–167, 2017. DOI: 10.1016/j.compstruct.2017.04.031. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.compstruct.2017.04.031>.

DOMÍNGUEZ, J. C.; GRIVEL, J. C.; MADSEN, B. Study on the non-isothermal curing kinetics of a polyfurfuryl alcohol bioresin by DSC using different amounts of catalyst. **Thermochimica Acta**, Netherlands, v. 529, p. 29–35, 2012. DOI: 10.1016/j.tca.2011.11.018. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.tca.2011.11.018>.

DOMÍNGUEZ, J. C.; MADSEN, B. Chemorheological study of a polyfurfuryl alcohol resin system-Pre-gel curing stage. **Industrial Crops and Products**, Netherlands, v. 52, p. 321–328, 2014. DOI: 10.1016/j.indcrop.2013.11.006. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.indcrop.2013.11.006>.

DONG, F.; ZHU, Y.; ZHENG, H.; ZHU, Y. **Cr-free Cu-catalysts for the selective hydrogenation of biomass-derived furfural to 2-methylfuran : The synergistic effect of metal and acid sites**. Netherlands: Elsevier B.V., 2015. v. 398 DOI: 10.1016/j.molcata.2014.12.001. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.molcata.2014.12.001>.

DOWNEY, J.; O'LEARY, P.; RAGHAVENDRA, R. Comparison and analysis of audible sound energy emissions during single point machining of HSTS with PVD TiCN cutter insert across full tool life. **Wear**, Switzerland, v. 313, n. 1–2, p. 53–62, 2014. DOI: 10.1016/j.wear.2014.02.004. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.wear.2014.02.004>.

DU, D.; HU, Y.; LI, H.; LIU, C.; TAO, J. Open-hole tensile progressive damage and failure prediction of carbon fiber-reinforced PEEK-titanium laminates. **Composites Part B: Engineering**, United Kingdom, v. 91, n. February, p. 65–74, 2016. DOI: 10.1016/j.compositesb.2015.12.049. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.compositesb.2015.12.049>.

DURAND, L. P. (ORG.). **Composite Materials Research Progress**. 1. ed. New York: Nova Science Publishers, Inc., 2008.

DURÃO, L. M. P.; MAGALHÃES, A. G.; MARQUES, A. T.; TAVARES, J. M. R. S. Effect of Drilling Parameters on Composites Plates Damage. In: INTERNATIONAL CONFERENCE OF HIGH SPEED INDUSTRIAL MANUFACTURING PROCESSES 2007, Senlis. **Anais [...]**. Senlis p. 1–8.

DURÃO, M. P.; GONÇALVES, D. J. S.; TAVARES, J. M. R. S.; ALBUQUERQUE, ViH C.; AGUIAR VIEIRA, A.; TORRES MARQUES, A. Drilling tool geometry evaluation for reinforced composite laminates. **Composite Structures**, United Kingdom, v. 92, n. 7, p. 1545–1550, 2010. DOI: 10.1016/j.compstruct.2009.10.035. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.compstruct.2009.10.035>.

EBERHARDT, G. G. Avaliação da usinabilidade e qualidade dos furos na usinagem de compósitos à base de resina epóxi com carga de pó de ferro. 2009. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica). Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis 2009

EDWARDS, EIR; OISHI, S. S.; BOTELHO, E. C. Analysis of chemical polymerization between functionalized MWCNT and poly (furfuryl alcohol) composite. **Polimeros: Ciência e Tecnologia**, Brasil, v. 5169, n. 1, p. 15–22, 2018.

EL-SONBATY, I.; KHASHABA, U. A.; MACHALY, T. Factors affecting the machinability of GFR/epoxy composites. **Composite Structures**, United Kingdom, v. 63, n. 3–4, p. 329–338, 2004. DOI: 10.1016/S0263-8223(03)00181-8.

ELBESTAWI, M. A.; DUMITRESCU, M.; NG, E. Tool Condition Monitoring in Machining. In: WANG, Lihui; GAO, Robert X. (org.). **Condition Monitoring and Control for Intelligent Manufacturing**. 1. ed. London: Springer, 2006. p. 55–82. DOI: 10.1007/1-84628-269-1_3.

ENEYEW, E. D.; RAMULU, M. Experimental study of surface quality and damage when drilling unidirectional CFRP composites. **Journal of Materials Research and Technology**, Brazil, v. 3, n. 4, p. 354–362, 2014. DOI: 10.1016/j.jmrt.2014.10.003. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jmrt.2014.10.003>.

ÉPOCA NEGÓCIOS. **Cápsula espacial Orion adota novos materiais**. 2015. Disponível em:

<https://epocanegocios.globo.com/Caminhos-para-o-futuro/Transportes/noticia/2015/01/capsula-espacial-orion-adota-novos-materiais.html>. Acesso em: 5 ago. 2018.

FANG, E.; LUA, J.; LIU, L.; STUEBNER, M.; SWINDEMAN, M.; IARVE, E. **A 3D Discrete Damage Modeling Methodology for Abaqus for Fatigue Damage Evaluation in Bolted Composite Joints** 2012 SIMULIA Community Conference, United States, 2012.

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**, United Kingdom, v. 49, n. 15, p. 1185–1196, 2009. DOI: 10.1016/j.ijmachtools.2009.08.002. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2009.08.002>.

FARIA, P. E.; CAMPOS, R. F.; ABRO, A. M.; GODOY, G. C. D.; DAVIM, J. P. Thrust force and wear assessment when drilling glass fiber-reinforced polymeric composite. **Journal of Composite Materials**, United States, v. 42, n. 14, p. 1401–1414, 2008. DOI: 10.1177/0021998308090456.

FEDERAL AVIATION ADMINISTRATION. **Aviation Maintenance Technician Handbook - Airframe**. 1. ed. United States: U.S. Department of Transportation, 2012. v. 1 Disponível em: https://www.faa.gov/regulations_policies/handbooks_manuals/aircraft/.

FEITO, N.; ÁLVAREZ, J. Díaz; CANTERO, J. L.; MIGUÉLEZ, M. H. Influence of Special Tool Geometry in Drilling Woven CFRPs Materials. **Procedia Engineering**, United Kingdom, v. 132, n. December 2015, p. 632–638, 2015. DOI: 10.1016/j.proeng.2015.12.541. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.proeng.2015.12.541>.

FEITO, N.; DIAZ-ÁLVAREZ, A.; CANTERO, J. L.; RODRÍGUEZ-MILLÁN, M.; MIGUÉLEZ, H. Experimental analysis of special tool geometries when drilling woven and multidirectional CFRPs. **Journal of Reinforced Plastics and Composites**, United States, v. 35, n. 1, p. 33–55, 2016. DOI: 10.1177/0731684415612931.

FEITO, N.; DÍAZ-ÁLVAREZ, J.; DÍAZ-ÁLVAREZ, A.; CANTERO, J. L.; MIGUÉLEZ, M. H. Experimental analysis of the influence of drill point angle and wear on the drilling of woven CFRPs. **Materials**, Switzerland, v. 7, n. 6, 2014. a. DOI: 10.3390/ma7064258.

FEITO, N.; DÍAZ-ÁLVAREZ, J.; LÓPEZ-PUENTE, J.; MIGUELEZ, M. H. Experimental and numerical analysis of step drill bit performance when drilling woven CFRPs. **Composite Structures**, United Kingdom, v. 184, n. August 2017, p. 1147–1155, 2018. DOI: 10.1016/j.compstruct.2017.10.061. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.compstruct.2017.10.061>.

FEITO, N.; LÓPEZ-PUENTE, J.; SANTIUSTE, C.; MIGUÉLEZ, M. H. Numerical prediction of delamination in CFRP drilling. **Composite Structures**, United Kingdom, v. 108, n. 1, 2014. b. DOI: 10.1016/j.compstruct.2013.10.014.

FEITO, N.; MILANI, A. S.; MUÑOZ-SÁNCHEZ, A. Drilling optimization of woven CFRP laminates under different tool wear conditions: a multi-objective design of experiments approach. **Structural and Multidisciplinary Optimization**, Germany, v. 53, n. 2, p. 239–251, 2016. DOI: 10.1007/s00158-015-1324-y.

FENNELL, C.; SHIVPURI, R.; BLODGETT, O. W.; MILLER, D. K.; KALPAKJIAN, S.; SADEGH, A. M.; PERKINS, R. W.; OSBORN, C. Manufacturing Processes. In: AVELLONE, Eugene A.; BAUMEISTER III, Theodore.; SADEGH, Ali M. (org.). **Marks' Standard Handbook for Mechanical Engineers**. 10. ed. [s.l.] : McGraw-Hill Companies, Inc., 1996. p. 84. Disponível em: <http://books.google.com/books?id=S89SAAAAMAAJ&pgis=1>.

FERNADES, J. **Acústica e Ruidos**. Bauru, Apostila. Departamento de Engenharia Mecânica – Unesp/Campus de Bauru, 2005. Disponível em: <http://wwwwp.feb.unesp.br/jcandido/acustica/apostila.htm>.

FERNÁNDEZ-PÉREZ, J.; CANTERO, J. L.; DÍAZ-ÁLVAREZ, J.; MIGUÉLEZ, M. H. Influence of cutting parameters on tool wear and hole quality in composite aerospace components drilling. **Composite Structures**, United Kingdom, v. 178, p. 157–161, 2017. DOI: 10.1016/j.compstruct.2017.06.043. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.compstruct.2017.06.043>.

FERNÁNDEZ-PÉREZ, J.; DÍAZ-ÁLVAREZ, J.; MIGUÉLEZ, M. H.; CANTERO, J. L. Combined analysis of wear mechanisms and delamination in CFRP drilling. **Composite Structures**, United Kingdom, v. 255, n. August 2020, 2021. DOI: 10.1016/j.compstruct.2020.112774.

FERRARI, P. E.; REZENDE, M. C. Carbono polimérico: processamento e aplicação. **Polímeros**, Brasil, v. 8, n. 4, p. 22–30, 1998. DOI: 10.1590/S0104-14281998000400005.

FERREIRA BATISTA, M.; BASSO, I.; DE ASSIS TOTI, F.; ROGER RODRIGUES, A.; RICARDO TARPANI, J. Cryogenic drilling of carbon fibre reinforced thermoplastic and thermoset polymers. **Composite Structures**, United Kingdom, v. 251, n. November 2019, p. 112625, 2020. DOI: 10.1016/j.compstruct.2020.112625. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2020.112625>.

FINK, J. K. **Reactive Polymers: Fundamentals and Applications**. 3. ed. Norwich: Elsevier, 2013. DOI: 10.1016/C2012-0-02516-1. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/C20120025161>.

FRANKE, V. Drilling of long fiber reinforced thermoplastics - Influence of the cutting edge on the machining results. **CIRP Annals - Manufacturing Technology**, Switzerland, v. 60, n. 1, p. 65–68, 2011. DOI: 10.1016/j.cirp.2011.03.078.

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**, United Kingdom, v. 135, n. August, p. 24–37, 2018. DOI: 10.1016/j.ijmachtools.2018.08.002. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2018.08.002>.

FULAJTÁROVA, K.; SOTÁK, T.; HRONEC, M.; VÁVRA, I.; DOBROČKA, E.; OMASTOVÁ, M. **Aqueous phase hydrogenation of furfural to furfuryl alcohol over Pd–Cu catalysts**. Netherlands. v. 502 DOI: 10.1016/j.apcata.2015.05.031. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0926860X15300090>.

GAITONDE, V. N.; KARNIK, S. R.; CAMPOS RUBIO, J.; CORREIA, A. E.; ABRÃO, A. M.; DAVIM, J. Analysis of parametric influence on delamination in high-speed drilling of carbon fiber reinforced plastic composites. **Journal of Materials Processing Technology**, Netherlands, v. 203, n. 1–3, p. 431–438, 2008. DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2007.10.050.

GANDINI, A. Furans as offspring of sugars and polysaccharides and progenitors of a family of remarkable polymers: a review of recent progress. **Polymer Chemistry**, United Kingdom, v. 1, n. 3, p. 245–251, 2010. DOI: 10.1039/B9PY00233B. Disponível em: <http://xlink.rsc.org/?DOI=B9PY00233B>.

GANDINI, A.; BELGACEM, Mohamed Naceur. Furans in polymer chemistry. **Progress in Polymer Science**, United Kingdom, v. 22, n. 6, p. 1203–1379, 1997. DOI: 10.1016/S0079-6700(97)00004-X. Disponível em:

<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S007967009700004X>.

GARA, S.; M'HAMED, S.; TSOUMAREV, O. Temperature measurement and machining damage in slotting of multidirectional CFRP laminate. **Machining Science and Technology**, United States, v. 22, n. 2, p. 320–337, 2018. DOI: 10.1080/10910344.2017.1365892. Disponível em: <https://doi.org/10.1080/10910344.2017.1365892>.

GARCIA, E. J.; WARDLE, B. L.; JOHN HART, A. Joining prepreg composite interfaces with aligned carbon nanotubes. **Composites Part A: Applied Science and Manufacturing**, United Kingdom, v. 39, n. 6, p. 1065–1070, 2008. DOI: 10.1016/j.compositesa.2008.03.011.

GAUGEL, S.; SRIPATHY, P.; HAEGER, A.; MEINHARD, D.; BERNTHALER, T.; LISSEK, F.; KAUFELD, M.; KNOBLAUCH, V.; SCHNEIDER, G. A comparative study on tool wear and laminate damage in drilling of carbon-fiber reinforced polymers (CFRP). **Composite Structures**, United Kingdom, v. 155, p. 173–183, 2016. DOI: 10.1016/j.compstruct.2016.08.004. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.compstruct.2016.08.004>.

GAY, D. **Composite Materials: Design and Applications**. 3. ed. Florida: CRC Press, 2014.

GAY, D.; HOA, S. V.; TSAI, S. W. **Composite Materials: Design and Applications**. 4. ed. Bosa Roca: CRC Press, 2003.

GEIER, N.; SZALAY, T. Optimisation of process parameters for the orbital and conventional drilling of uni-directional carbon fibre-reinforced polymers (UD-CFRP). **Measurement**, Netherlands, v. 110, p. 319–334, 2017. DOI: 10.1016/j.measurement.2017.07.007. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0263224117304414>.

GEMI, L.; MORKAVUK, S.; KÖKLÜ, U.; GEMI, D. S. An experimental study on the effects of various drill types on drilling performance of GFRP composite pipes and damage formation. **Composites Part B: Engineering**, United Kingdom, v. 172, n. March, p. 186–194, 2019. DOI: 10.1016/j.compositesb.2019.05.023.

GENG, D.; LIU, Y.; SHAO, Z.; LU, Z.; CAI, J.; LI, X.; JIANG, X.; ZHANG, D. Delamination formation, evaluation and suppression during drilling of composite laminates: A review. **Composite Structures**, United Kingdom, v. 216, n. October 2018, p. 168–186, 2019. DOI: 10.1016/j.compstruct.2019.02.099. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2019.02.099>.

GIASIN, K.; AYVAR-SOBERANIS, S. An Investigation of burrs, chip formation, hole size, circularity and delamination during drilling operation of GLARE using ANOVA. **Composite Structures**, United Kingdom, v. 159, p. 745–760, 2017. DOI: 10.1016/j.compstruct.2016.10.015. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.compstruct.2016.10.015>.

GIASIN, K.; AYVAR-SOBERANIS, S.; FRENCH, T.; PHADNIS, V. 3D Finite Element Modelling of Cutting Forces in Drilling Fibre Metal Laminates and Experimental Hole Quality Analysis. **Applied Composite Materials**, Netherlands, v. 24, n. 1, p. 113–137, 2017. DOI: 10.1007/s10443-016-9517-0.

GIASIN, K.; AYVAR-SOBERANIS, S.; HODZIC, A. An experimental study on drilling of unidirectional GLARE fibre metal laminates. **Composite Structures**, United Kingdom, v. 133, p. 794–808, 2015. DOI: 10.1016/j.compstruct.2015.08.007. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.compstruct.2015.08.007>.

GIASIN, K.; GOREY, G.; BYRNE, C.; SINKE, J.; BROUSSEAU, E. Effect of machining parameters and cutting tool coating on hole quality in dry drilling of fibre metal laminates. **Composite Structures**, United Kingdom, v. 212, n. November 2018, p. 159–174, 2019. DOI: 10.1016/j.compstruct.2019.01.023. Disponível em:

<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0263822318334846>.

GIROT, F.; DAU, F.; GUTIÉRREZ-ORRANTIA, M. E. New analytical model for delamination of CFRP during drilling. **Journal of Materials Processing Technology**, Netherlands, v. 240, p. 332–343, 2017. DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2016.10.007. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2016.10.007>.

GOWDA, B. M. U.; RAVINDRA, H. V.; PRAKASH, G. V. N.; NISHANTH, P.; UGRASEN, G. Optimization of Process Parameters in Drilling of Epoxy Si3N4 Composite Material. **Materials Today: Proceedings**, Netherlands, v. 2, n. 4–5, p. 2852–2861, 2015. DOI: 10.1016/j.matpr.2015.07.300. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.matpr.2015.07.300>.

GRAHAM-JONES, J.; SUMMERSCALES, J. (ORG.). **Marine Applications of Advanced Fibre-Reinforced Composites**. Cambridge: Elsevier, 2016. DOI: 10.1016/C2013-0-16504-X. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/C2013016504X>.

GRILO, T. J.; PAULO, R. M. F.; SILVA, C. R. M.; DAVIM, J. P. Experimental delamination analyses of CFRPs using different drill geometries. **Composites Part B: Engineering**, United Kingdom, v. 45, n. 1, p. 1344–1350, 2013. DOI: 10.1016/j.compositesb.2012.07.057.

GROSSE, Y.; LOOMIS, D.; GUYTON, K. Z.; EL GHISSASSI, F.; BOUVARD, V.; BENBRAHIM-TALLAA, L.; MATTOCK, H.; STRAIF, K. Some chemicals that cause tumours of the urinary tract in rodents. **The Lancet Oncology**, Turkey, p. 1003–1004, 2017. DOI: 10.1016/S1470-2045(17)30505-3.

GUADAGNO, L.; DE VIVO, B.; DI BARTOLOMEO, A.; LAMBERTI, P.; SORRENTINO, A.; TUCCI, V.; VERTUCCIO, L.; VITTORIA, V. Effect of functionalization on the thermo-mechanical and electrical behavior of multi-wall carbon nanotube/epoxy composites. **Carbon**, United Kingdom, v. 49, n. 6, p. 1919–1930, 2011. DOI: 10.1016/j.carbon.2011.01.017. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.carbon.2011.01.017>.

GUILLAUMAT, L.; HAMDOUN, Z. Reliability model of drilled composite materials. **Composite Structures**, United Kingdom, v. 74, n. 4, p. 467–474, 2006. DOI: 10.1016/j.compstruct.2005.05.002. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0263822305001297>.

GUTIÉRREZ, J. C. H.; CAMPOS RUBIO, J. C.; FARIA, P. E.; DAVIM, J. P. Usinabilidade de materiais compósitos poliméricos para aplicações automotivas. **Polímeros: Ciência e Tecnologia**, São Carlos, v. 24, n. 6, p. 711–719, 2014. DOI: 10.1590/0104-1428.1582. Disponível em: http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0104-14282014000600012&lng=pt&tlng=pt.

HAEGER, A.; SCHOEN, G.; LISSEK, F.; MEINHARD, D.; KAUFELD, M.; SCHNEIDER, G.; SCHUHMACHER, S.; KNOBLAUCH, V. Non-destructive detection of drilling-induced delamination in CFRP and its effect on mechanical properties. **Procedia Engineering**, United Kingdom, v. 149, n. June, p. 130–142, 2016. DOI: 10.1016/j.proeng.2016.06.647. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.proeng.2016.06.647>.

HALLETT, S. R.; GREEN, B. G.; JIANG, W. G.; WISNOM, M. R. An experimental and numerical investigation into the damage mechanisms in notched composites. **Composites Part A: Applied Science and Manufacturing**, United Kingdom, v. 40, n. 5, p. 613–624, 2009. DOI: 10.1016/j.compositesa.2009.02.021. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.compositesa.2009.02.021>.

HARRIS, P. J. F. **Carbon Nanotubes Science: Synthesis, Structure, Properties and Applications**. UK: Cambridge University Press, 2009.

HE, L.; LI, D.; WANG, K.; SURESH, A. K.; BELLARE, J.; SRIDHAR, T.; WANG, H. Synthesis of silicalite-poly(furfuryl alcohol) composite membranes for oxygen enrichment from air. **Nanoscale Research Letters**, United States, v. 6, n. 1, p. 637, 2011. DOI: 10.1186/1556-276X-6-637. Disponível em: <https://nanoscalereslett.springeropen.com/articles/10.1186/1556-276X-6-637>.

HEIDARY, H.; MEHRPOUYA, M. A. Effect of backup plate in drilling of composite laminates, analytical and experimental approaches. **Thin-Walled Structures**, United Kingdom, v. 136, n. November 2018, p. 323–332, 2019. DOI: 10.1016/j.tws.2018.12.035. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.tws.2018.12.035>.

HEISEL, U.; PFEIFROTH, T. Influence of Point Angle on Drill Hole Quality and Machining Forces When Drilling CFRP. **Procedia CIRP**, Netherlands, v. 1, n. 1, p. 471–476, 2012. DOI: 10.1016/j.procir.2012.04.084. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S2212827112000856>.

HOCHENG, H. (ORG.). **Machining Technology for Composite Materials: Principles and Practic**. Cambridge, United Kingdom: Woodhead Publishing Limited, 2012. DOI: 10.1016/B978-1-84569-385-5.50021-0.

HOCHENG, H.; TSAO, C. C. The path towards delamination-free drilling of composite materials. **Journal of Materials Processing Technology**, Netherlands, v. 167, n. 2–3, p. 251–264, 2005. DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2005.06.039.

HOCHENG, H.; TSAO, C. C. Computerized Tomography and C-Scan for Measuring Drilling-Induced Delamination in Composite Material Using Twist Drill and Core Drill. **Key Engineering Materials**, Switzerland, v. 339, p. 16–20, 2007. DOI: 10.4028/www.scientific.net/KEM.339.16. Disponível em: <https://www.scientific.net/KEM.339.16>.

HOCHENG, H.; TSAO, C. C.; CHEN, H. T. Utilizing internal icing force to reduce delamination in drilling composite tubes. **Composite Structures**, United Kingdom, v. 139, p. 36–41, 2016. DOI: 10.1016/j.compstruct.2015.11.043. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.compstruct.2015.11.043>.

HOCHENG, H.; TSAO, C. C.; LIU, C. S.; CHEN, H. A. Reducing drilling-induced delamination in composite tube by magnetic colloid back-up. **CIRP Annals - Manufacturing Technology**, Switzerland, v. 63, n. 1, p. 85–88, 2014. DOI: 10.1016/j.cirp.2014.03.070. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.cirp.2014.03.070>.

HOCHENG; TSAO. Effects of special drill bits on drilling-induced delamination of composite materials. **International Journal of Machine Tools and Manufacture**, United Kingdom, v. 46, n. 12–13, p. 1403–1416, 2006. DOI: 10.1016/j.ijmachtools.2005.10.004.

HODGE, S. A.; BAYAZIT, M. K.; COLEMAN, K. S.; SHAFFER, M. S. P. Unweaving the rainbow: a review of the relationship between single-walled carbon nanotube molecular structures and their chemical reactivity. **Chemical Society Reviews**, United Kingdom, v. 41, n. 12, p. 4409, 2012. DOI: 10.1039/c2cs15334c. Disponível em: <http://xlink.rsc.org/?DOI=c2cs15334c>.

HOFMANN, M. A. **Atenuação da energia do sinal ultrassônico na detecção de danos por fissuração no concreto**. 2015. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2015.

HORNYAK, G. L.; DUTTA, J.; TIBBALS, H. F.; RAO, A. **Introduction to Nanoscience**. Bosa Roca: CRC Press, 2008.

HORNYAK, G. L.; MOORE, J. J.; TIBBALS, H. F.; DUTTA, J. **Fundamentals of Nanotechnology**. Bosa Roca: CRC Press, 2009.

- HRECHUK, A; BUSHLYA, V; STÄHL, J. Hole-quality evaluation in drilling fiber-reinforced composites. **Composite Structures**, United Kingdom, v. 204, n. June, p. 378–387, 2018. DOI: 10.1016/j.compstruct.2018.07.105. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2018.07.105>.
- HUANG, W.; LI, H.; ZHU, B.; FENG, Y.; WANG, S.; ZHANG, S. Selective hydrogenation of furfural to furfuryl alcohol over catalysts prepared via sonochemistry. **Ultrasonics Sonochemistry**, Netherlands, v. 14, p. 67–74, 2007. DOI: 10.1016/j.ultsonch.2006.03.002.
- INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 11357-1: Plastics-Differential scanning calorimetry (DSC) — Part 1: General principles**. Switzerland, 2016
- 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**, United States, v. 17, n. 3, p. 380–409, 2013. DOI: 10.1080/10910344.2013.806098.
- ISBILIR, O.; GHASSEMIEH, E. Three-dimensional numerical modelling of drilling of carbon fiber-reinforced plastic composites. **Journal of Composite Materials**, United States, v. 48, n. 10, p. 1209–1219, 2014. DOI: 10.1177/0021998313484947. Disponível em: <http://journals.sagepub.com/doi/10.1177/0021998313484947>.
- ISMAIL, Sikiru Oluwarotimi; DHAKAL, Hom Nath; POPOV, Ivan; BEAUGRAND, Johnny. Comprehensive study on machinability of sustainable and conventional fibre reinforced polymer composites. **Engineering Science and Technology, an International Journal**, Netherlands, v. 19, n. 4, p. 2043–2052, 2016. DOI: 10.1016/j.jestch.2016.07.010. Disponível em: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S2215098616301616>.
- JASINEVICIUS, R. G. **Processos de Usinagem**. São Carlos: EESC USP, 2019.
- JORIO, A.; DRESSELHAUS, G.; DRESSELHAUS, M. S. (ORG.). **Carbon Nanotubes: Advanced Topics in the Synthesis, Structure, Properties and Applications**. Berlin: Springer, 2008.
- JUNG, J. P.; KIM, G. W.; LEE, K. Y. Critical thrust force at delamination propagation during drilling of angle-ply laminates. **Composite Structures**, United Kingdom, v. 68, n. 4, p. 391–397, 2005. DOI: 10.1016/j.compstruct.2004.04.004.
- KALPAKJIAN, S. Machining Processes and Machine Tools. In: AVELLONE, E. A.; BAUMEISTER III, T.; SADEGH, A. M. (org.). **Marks' Standard Handbook for Mechanical Engineers**. 11. ed. Ohio: McGraw-Hill Companies, Inc., 2007. p. 50–76. Disponível em: http://mosafavi.iut.ac.ir/sites/mosafavi.iut.ac.ir/files/files_course/machining_processes_1.pdf.
- KALPAKJIAN, S.; SCHMID, S. R. **Manufacturing Engineering and Technology**. 6. ed. Upper Saddle River: Pearson, 2009.
- KARNIK, S. R.; GAITONDE, V. N.; CAMPOS RUBIO, J.; CORREIA, A. E.; ABRÃO, A. M.; DAVIM, J. P. Delamination analysis in high speed drilling of carbon fiber reinforced plastics (CFRP) using artificial neural network model. **Materials & Design**, United Kingdom, v. 29, n. 9, p. 1768–1776, 2008. DOI: 10.1016/j.matdes.2008.03.014. Disponível em: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0261306908000575>.
- KATSOLIS, C.; KANDOLA, B. K.; MYLER, P.; KANDARE, E. Post-fire flexural performance of epoxy-nanocomposite matrix glass fibre composites containing conventional flame retardants. **Composites Part A: Applied Science and Manufacturing**, United Kingdom, v. 43, n. 8, p. 1389–1399, 2012. DOI: 10.1016/j.compositesa.2012.03.009. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.compositesa.2012.03.009>.

- KAW, A. K. **Mechanics of Composite Materials**. 2. ed. Boca Raton: Taylor & Francis, 2006.
- KENAMETAL. **Calculadoras de engenharia**. 2020. Disponível em: <https://www.kenametal.com/pt/pt/resources/engineering-calculators/holemaking-calculators/torque--thrust--and-power.html>. Acesso em: 17 out. 2021.
- KHASHABA, U. A. Delamination in drilling GFR-thermoset composites. **Composite Structures**, United Kingdom, v. 63, n. 3–4, p. 313–327, 2004. DOI: 10.1016/S0263-8223(03)00180-6.
- KHASHABA, U. A. Drilling of polymer matrix composites: A review. **Journal of Composite Materials**, United States, v. 47, n. 15, p. 1817–1832, 2013. DOI: 10.1177/0021998312451609.
- 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**, United Kingdom, v. 41, n. 9, p. 1130–1137, 2010. a. DOI: 10.1016/j.compositesa.2010.04.011. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.compositesa.2009.11.006>.
- KHASHABA, U. A.; EL-SONBATY, I. A.; SELMY, A. I.; MEGAHED, A. A. Machinability analysis in drilling woven GFR/epoxy composites: Part II - Effect of drill wear. **Composites Part A: Applied Science and Manufacturing**, United Kingdom, v. 41, n. 9, p. 1130–1137, 2010. b. DOI: 10.1016/j.compositesa.2010.04.011. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.compositesa.2010.04.011>.
- KILICKAP, E. Optimization of cutting parameters on delamination based on Taguchi method during drilling of GFRP composite. **Expert Systems with Applications**, United Kingdom, v. 37, n. 8, p. 6116–6122, 2010. DOI: 10.1016/j.eswa.2010.02.023. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.eswa.2010.02.023>.
- KIM, D.; RAMULU, M. Drilling process optimization for graphite/bismaleimide-titanium alloy stacks. **Composite Structures**, United Kingdom, v. 63, n. 1, p. 101–114, 2004. DOI: 10.1016/S0263-8223(03)00137-5.
- KLOCKE, F. **Manufacturing Processes 1: Cutting**. 1. ed. Berlin: Springer Berlin Heidelberg, 2011. Disponível em: http://books.google.com/books?id=Kcdbs_dwLFUC&pgis=1.
- KNOP, A.; PILATO, L. A. **Phenolic Resins: Chemistry, Application and Performance- Future Directions**. Berlin: Springer-Verlag, 1985.
- KOO, J. H. **Polymer Nanocomposites: Processing, Characterization and Applications**. 1. ed. Ohio: McGraw-Hill Professional Pub, 2006. DOI: 10.1036/0071458212.
- KRAUSE, B.; MENDE, M.; PÖTSCHKE, P.; PETZOLD, G. Dispersability and particle size distribution of CNTs in an aqueous surfactant dispersion as a function of ultrasonic treatment time. **Carbon**, United Kingdom, v. 48, n. 10, p. 2746–2754, 2010. DOI: 10.1016/j.carbon.2010.04.002.
- KRISHNAMOORTHY, A.; LILLY MERCY, J.; VINEETH, K. S. M.; SALUGU, Manoj Kumar. Delamination Analysis of Carbon Fiber Reinforced Plastic (CFRP) Composite plates by Thermo graphic technique. **Materials Today: Proceedings**, Netherlands, v. 2, n. 4–5, p. 3132–3139, 2015. DOI: 10.1016/j.matpr.2015.07.101. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.matpr.2015.07.101>.
- KRISHNARAJ, V.; PRABUKARTHI, A.; RAMANATHAN, A.; ELANGHOVAN, N.; KUMAR, M. S.; ZITOUNE, R.; DAVIM, J. P. Optimization of machining parameters at high speed drilling of carbon fiber reinforced plastic (CFRP) laminates. **Composites Part B: Engineering**, United Kingdom, v. 43, n. 4, p. 1791–1799, 2012. DOI: 10.1016/j.compositesb.2012.01.007. Disponível em:

<http://dx.doi.org/10.1016/j.compositesb.2012.01.007>.

KRISHNARAJ, Vijayan; ZITOUNE, Redouane; DAVIM, João Paulo. **Drilling of polymer-matrix composites**. Heidelberg: Springer, 2013.

KUMAR, D.; SING, 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**, Netherlands, v. 4, n. 8, p. 7618–7627, 2017. DOI: 10.1016/j.matpr.2017.07.095.

KUMAR, J. R.; MALHOTRA, S. K.; KRISHNAMURTHY, R. Effect of microwave treatment on WC inserts for drilling of GFRP composites. **Machining Science and Technology**, United States, v. 9, n. 2, p. 263–269, 2005. DOI: 10.1081/MST-200059197.

KUMAR, P. S. S. R.; ALEXIS, S. J. Synthesized Carbon Nanotubes and Their Applications. *In: Carbon-Based Nanofillers and Their Rubber Nanocomposites*. 1. ed. United States: Elsevier, 2018. p. 109–122. DOI: 10.1016/B978-0-12-813248-7.00004-3. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/B9780128132487000043>.

KUO, C.; WANG, C.; KO, S. Wear behaviour of CVD diamond-coated tools in the drilling of woven CFRP composites. **Wear**, Switzerland, v. 398–399, p. 1–12, 2018. DOI: 10.1016/j.wear.2017.11.015. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0043164816302782>.

LAGEL, M. C.; HAI, L.; PIZZI, A.; BASSO, M. C.; DELMOTTE, L.; ABDALLA, S.; ZAHED, A.; AL-MARZOUKI, F. M. Automotive brake pads made with a bioresin matrix. **Industrial Crops and Products**, Netherlands, v. 85, p. 372–381, 2016. DOI: 10.1016/j.indcrop.2015.12.090. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.indcrop.2015.12.090>.

LATHA, B.; SENTHILKUMAR, V. S.; PALANIKUMAR, K. Modeling and optimization of process parameters for delamination in drilling glass fiber reinforced plastic (GFRP) composites. **Machining Science and Technology**, United States, v. 15, n. 2, p. 172–191, 2011. DOI: 10.1080/10910344.2011.579802.

LAURO, C. H.; BRANDÃO, L. C.; BALDO, D.; REIS, R. A.; DAVIM, J. P. Monitoring and processing signal applied in machining processes - A review. **Measurement**, Netherlands, v. 58, p. 73–86, 2014. DOI: 10.1016/j.measurement.2014.08.035. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.measurement.2014.08.035>.

LAZAR, M. B.; XIROUCHAKIS, P. Experimental analysis of drilling fiber reinforced composites. **International Journal of Machine Tools and Manufacture**, United Kingdom, v. 51, n. 12, p. 937–946, 2011. DOI: 10.1016/j.ijmachtools.2011.08.009. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2011.08.009>.

LEBACH, H. H. **Furfuryl alcohol-phenol aldeixide resinous products and method of making e same**, 2.471.631, 1949.

LEE, J. H.; GE, J. C.; SONG, J. H. Study on burr formation and toolwear in drilling cfrp and its hybrid composites. **Applied Sciences**, Switzerland, v. 11, n. 1, p. 1–14, 2021. DOI: 10.3390/app11010384.

LEE, S. K.; BAI, B. C.; IM, JiS; IN, S. J.; LEE, Y. S. Flame retardant epoxy complex produced by addition of montmorillonite and carbon nanotube. **Journal of Industrial and Engineering Chemistry**, Korea, v. 16, n. 6, p. 891–895, 2010. DOI: 10.1016/j.jiec.2010.09.014. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jiec.2010.09.014>.

LEI, X.; WANG, L.; SHEN, B.; SUN, F.; ZHANG, Z. Comparison of chemical vapor deposition

diamond-, diamond-like carbon- and TiAlN-coated microdrills in graphite machining. **Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture**, United Kingdom, v. 227, n. 9, p. 1299–1309, 2013. DOI: 10.1177/0954405413487898.

LEVY NETO, F.; PARDINI, L. C. **Compósitos Estruturais: Ciência e Tecnologia**. 2. ed. São Paulo: Edgar Blücher, 2016.

LI, H.; QIN, X.; HE, G.; PRICE, M. A.; JIN, Y.; SUN, D. An energy based force prediction method for UD-CFRP orthogonal machining. **Composite Structures**, United Kingdom, v. 159, p. 34–43, 2017. DOI: 10.1016/j.compstruct.2016.09.051. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.compstruct.2016.09.051>.

LI, M.; TIAN, W.; SUN, H. L.; LIU, Z.; ZHANG, L.; LIAO, W. H.; HUA, F. F. The Critical Axial Force Model in Drilling of Carbon Fiber Reinforced Composites under Different Stacking Modes. **IOP Conference Series: Materials Science and Engineering**, United Kingdom, v. 470, n. 1, 2019. a. DOI: 10.1088/1757-899X/470/1/012042.

LI, N.; LI, Y.; ZHOU, J.; HE, Y.; HAO, X. Drilling delamination and thermal damage of carbon nanotube/carbon fiber reinforced epoxy composites processed by microwave curing. **International Journal of Machine Tools and Manufacture**, United Kingdom, v. 97, p. 11–17, 2015. DOI: 10.1016/j.ijmachtools.2015.06.005. Disponível em: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S089069551530050X>.

LI, Y. et al. Theoretical modeling of the temperature dependent tensile strength for particulate-polymer composites. **Composites Science and Technology**, United Kingdom, v. 184, n. October, p. 107881, 2019. b. DOI: 10.1016/j.compscitech.2019.107881. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2019.107881>.

LI, Y.; MAI, Y. W.; YE, L. Sisal fibre and its composites: a review of recent developments. **Composites Science and Technology**, United Kingdom, v. 60, n. 11, p. 2037–2055, 2000. DOI: 10.1016/S0266-3538(00)00101-9. Disponível em: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0266353800001019>.

LISSEK, F.; TEGAS, J.; KAUFELD, M. Damage quantification for the machining of CFRP: An introduction about characteristic values considering shape and orientation of drilling-induced delamination. **Procedia Engineering**, United Kingdom, v. 149, n. June, p. 2–16, 2016. DOI: 10.1016/j.proeng.2016.06.632. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.proeng.2016.06.632>.

LIU, D.; TANG, Y.; CONG, W. L. A review of mechanical drilling for composite laminates. **Composite Structures**, United Kingdom, v. 94, n. 4, p. 1265–1279, 2012. DOI: 10.1016/j.compstruct.2011.11.024. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.compstruct.2011.11.024>.

LIU, D.; XU, H.; ZHANG, C.; YAN, H. Drilling force in high speed drilling Carbon Fibre Reinforced Plastics (CFRP) using half core drill. **Advanced Materials Research**, Switzerland, v. 102–104, p. 729–732, 2010. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMR.102-104.729.

LIU, L.; QI, C.; WU, F.; YU, F.; ZHU, X. The effect of support on multi-hole drilling for glass fiber-reinforced plastic composite materials. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, United Kingdom, v. 93, n. 1–4, p. 953–965, 2017. DOI: 10.1007/s00170-017-0534-4.

LIU, L.; QI, C.; WU, F.; ZHANG, X.; ZHU, X. Analysis of thrust force and delamination in drilling GFRP composites with candle stick drills. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, United Kingdom, v. 95, n. 5–8, p. 2585–2600, 2018. DOI:

10.1007/s00170-017-1369-8.

LOPES, Wi A.; FASCIO, M. Esquema para interpretação de espectros de substâncias orgânicas na região do infravermelho. **Química Nova**, Brasil, v. 27, n. 4, p. 670–673, 2004.

MA, C. C. M.; YN, M. S.; HAN, J. L.; CHANG, C. J.; WU, H. D. Pultruded fibre-reinforced furfuryl alcohol resin composites: 1. Process feasibility study. **Composites Manufacturing**, United Kingdom, v. 6, n. 1, p. 45–52, 1995.

MA, PC C.; MO, SY Y.; TANG, BZ Z.; KIM, JK K. Dispersion, interfacial interaction and re-agglomeration of functionalized carbon nanotubes in epoxy composites. **Carbon**, United Kingdom, v. 48, n. 6, p. 1824–1834, 2010. DOI: 10.1016/j.carbon.2010.01.028. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.carbon.2010.01.028>.

MACHADO, A. R.; ABRAO, A. M.; COELHO, R. T.; SILVA, M. B. **Teoria da usinagem dos materiais**. São Paulo: Blucher, 2009. DOI: 9788521204527. Disponível em: <https://books.google.com/books?id=juiTPgAACAAJ&pgis=1>.

MATADI BOUMBIMBA, R.; FROUSTEY, C.; VIOT, P.; OLIVE, J. M.; LÉONARDI, F.; GERARD, P.; INOUBLI, R. Preparation and mechanical characterisation of laminate composites made of glass fibre/epoxy resin filled with tri bloc copolymers. **Composite Structures**, United Kingdom, v. 116, n. 1, p. 414–422, 2014. DOI: 10.1016/j.compstruct.2014.05.028. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.compstruct.2014.05.028>.

MAYER, F. **Experimentos fatoriais 2k, k>3**. 2017. Disponível em: http://leg.ufpr.br/~fernandomayer/aulas/ce074/fatorial_2-k.html. Acesso em: 10 mar. 2019.

MAZUMDAR, S. K. **Composites Manufacturing Materials, Product and Process Engineering**. Bosa Roca: CRC Press, 2002.

MCCOMBE, G. P.; HALLETT, S. R. An Investigation Into the Damage Development of Open Hole Specimens in Fatigue. *In*: 15^o EUROPEAN CONFERENCE ON COMPOSITE MATERIALS 2012, Italy. **Anais [...]**. Italy: ECCM15, 2012. p. 24–28.

MCCONNELL, V. P. Past is prologue for composite repair. **Reinforced Plastics**, United Kingdom, 2011. Disponível em: <http://www.materialstoday.com/composite-applications/features/past-is-prologue-for-composite-repair/>.

MEN, X. H.; ZHANG, Z. Z.; SONG, H. J.; WANG, K.; JIANG, W. Functionalization of carbon nanotubes to improve the tribological properties of poly(furfuryl alcohol) composite coatings. **Composites Science and Technology**, United Kingdom, v. 68, n. 3–4, p. 1042–1049, 2008. DOI: 10.1016/j.compscitech.2007.07.008.

MKADDEM, A.; DEMIRCI, I.; MANSORI, M. E. A micro–macro combined approach using FEM for modelling of machining of FRP composites: Cutting forces analysis. **Composites Science and Technology**, United Kingdom, v. 68, n. 15–16, p. 3123–3127, 2008. DOI: 10.1016/j.compscitech.2008.07.009. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.compscitech.2008.07.009>.

MOCELLIN, F. **Avaliação Da Usinabilidade Do Ferro Fundido Vermicular Em Ensaio de Furação**. 2002. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica). Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2002.

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**, Netherlands, v. 186, n. 1–3, p. 265–271, 2007. DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2006.12.043.

MOHAN, N. S.; RAMACHANDRA, A.; KULKARNI, S. M. Machining of fiber-reinforced thermoplastics: Influence of feed and drill size on thrust force and torque during drilling. **Journal of Reinforced Plastics and Composites**, United States, v. 24, n. 12, p. 1247–1257, 2005. DOI: 10.1177/0731684405049865.

MONIRUZZAMAN, M.; WINEY, K. I. Polymer Nanocomposites Containing Carbon Nanotubes. **Macromolecules**, United States, v. 39, n. 16, p. 5194–5205, 2006. DOI: 10.1021/ma060733p. Disponível em: <https://pubs.acs.org/doi/10.1021/ma060733p>.

MONTGOMERY, D. **Design and analysis of experiments**. Danvers: John Wiley & Sons, Inc., 2013. v. 5

MONTGOMERY, D. C. **Design and analysis of experiments**. 9. ed. Hoboken: Wiley, 2017.

MONTORO, S. R.; CIOFFI, M. O. H. Determinação da densidade e quantidade de vazios em compósitos NCF/RTM6 processados via RTM. **RETEC**, Brasil, v. 8, n. 2, p. 17–23, 2015.

MOURA, M. F. S. F.; MORAIS, A. B.; MAGALHÃES, A. G. **Materiais Compósitos: Materiais, Fabrico e Comportamento Mecânico**. 1. ed. Porto: Publindústria, 2005.

MOURITZ, A. P. **Introduction to aerospace materials**. 1. ed. Cambridge: Woodhead Publishing Limited, 2012.

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**, United Kingdom, v. 216, n. 2, p. 143–152, 2002. DOI: 10.1243/0954405021519735.

NAGARAJAN, V. A.; SELWIN RAJADURAI, J.; ANNIL KUMAR, T. A digital image analysis to evaluate delamination factor for wind turbine composite laminate blade. **Composites Part B: Engineering**, United Kingdom, v. 43, n. 8, p. 3153–3159, 2012. DOI: 10.1016/j.compositesb.2012.04.013. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.compositesb.2012.04.013>.

NATIONAL AERONAUTICS AND SPACE ADMINISTRATION. **Orion: America's Next Generation Spacecraft**. United States. Disponível em: https://www.nasa.gov/pdf/491544main_orion_book_web.pdf.

NATIONAL AERONAUTICS AND SPACE ADMINISTRATION. **Orion Spacecraft**. 2018. Disponível em: <https://www.nasa.gov/exploration/systems/orion/index.html>. Acesso em: 5 ago. 2018.

NAYAK, D.; BHATNAGAR, N.; MAHAJAN, P. Machining studies of Uni-Directional Glass Fiber Reinforced Plastic (UD-GFRP) composites part 1: Effect of geometrical and process parameters. **Machining Science and Technology**, United States, v. 9, n. 4, p. 481–501, 2005. a. DOI: 10.1080/10910340500398167.

NAYAK, D.; BHATNAGAR, N.; MAHAJAN, P. Machining studies of ud-frp composites part 2: Finite element analysis. **Machining Science and Technology**, United States, v. 9, n. 4, p. 503–528, 2005. b. DOI: 10.1080/10910340500398183.

NOURI, M; FUSSELL, B K.; ZINITI, B L.; LINDER, E. Real-time tool wear monitoring in milling using a cutting condition independent method. **International Journal of Machine Tools and Manufacture**, United Kingdom, v. 89, p. 1–13, 2015. DOI: 10.1016/j.ijmachtools.2014.10.011. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2014.10.011>.

OISHI, S. S. **Síntese, dopagem e caracterização das resinas furfurílica e fenol-furfurílica**

visando a otimização do processamento de carbono vítreo. 2009. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica). Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2009.

OISHI, S. S. **Produção e caracterização de carbono vítreo monolítico a partir das resinas poliariilacetileno e furfurílica.** 2013. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica). Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2013.

OISHI, S S; REZENDE, M C; ORIGO, F D; DAMIÃO, A J; BOTELHO, Edson Cocchieri. Viscosity, pH, and moisture effect in the porosity of poly(furfuryl alcohol). **Journal of Applied Polymer Science**, United States, p. n/a-n/a, 2012. DOI: 10.1002/app.38332. Disponível em: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/app.38332>.

OJO, S. O.; ISMAIL, S. O.; PAGGI, M.; DHAKAL, H. N. A new analytical critical thrust force model for delamination analysis of laminated composites during drilling operation. **Composites Part B: Engineering**, United Kingdom, v. 124, p. 207–217, 2017. DOI: 10.1016/j.compositesb.2017.05.039. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.compositesb.2017.05.039>.

OKARU, Alex O.; LACHENMEIER, Dirk W. Processing Contaminants: Furfuryl Alcohol. *In: Encyclopedia of Food Chemistry*. United States: Elsevier, 2019. p. 543–549. DOI: 10.1016/B978-0-08-100596-5.21825-8. Disponível em: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/B9780081005965218258>.

OSG. **HY-PRO® CARB Drills** USAOSG USA, 2017. Disponível em: http://www.osgtool.com/_branding/books/8002018CA/html5/index.html?&locale=ENG&pn=179.

PAIVA, J. M. F.; FROLLINI, E. Matriz termofixa fenólica em compósitos reforçados com fibras de bagaço de cana-de-açúcar. **Polímeros**, Brasil, v. 9, n. 2, p. 78–87, 2010. DOI: 10.1590/s0104-14281999000200016.

PALANIKUMAR, K. Experimental investigation and optimisation in drilling of GFRP composites. **Measurement**, Netherlands, v. 44, n. 10, p. 2138–2148, 2011. DOI: 10.1016/j.measurement.2011.07.023. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.measurement.2011.07.023>.

PANCHAGNULA, K. K.; KUPPAN, P. Improvement in the mechanical properties of neat GFRPs with multi-walled CNTs. **Journal of Materials Research and Technology**, Brazil, v. 8, n. 1, p. 366–376, 2019. DOI: 10.1016/j.jmrt.2018.02.009. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2018.02.009>.

PANCHAGNULA, K. K.; PALANIYANDI, K. Drilling on fiber reinforced polymer/nanopolymer composite laminates: A review. **Journal of Materials Research and Technology**, Brazil, v. 7, n. 2, p. 180–189, 2018. DOI: 10.1016/j.jmrt.2017.06.003. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jmrt.2017.06.003>.

PARDINI, L. C. Preformas para compósitos estruturais. **Polímeros**, Brasil, v. 10, n. 2, p. 100–109, 2000. DOI: 10.1590/S0104-14282000000200012. Disponível em: http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0104-14282000000200012&lng=pt&nrm=iso&tlng=pt%5Cnhttp://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0104-14282000000200012&lng=pt&tlng=pt.

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**, Switzerland, v. 271, n. 11–12, p. 2826–2835, 2011. DOI: 10.1016/j.wear.2011.05.038. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.wear.2011.05.038>.

- PARK, S. Y.; CHOI, W. J.; CHOI, C. H.; CHOI, H. S. Effect of drilling parameters on hole quality and delamination of hybrid GLARE laminate. **Composite Structures**, United Kingdom, v. 185, n. November 2017, p. 684–698, 2018. DOI: 10.1016/j.compstruct.2017.11.073. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2017.11.073>.
- PATRA, K.; PAL, S. K.; BHATTACHARYYA, K. Application of wavelet packet analysis in drill wear monitoring. **Machining Science and Technology**, United States, v. 11, n. 3, p. 413–432, 2007. DOI: 10.1080/10910340701539908.
- PAWAR, O. A.; GAIKHE, Y. S.; TEWARI, A.; SUNDARAM, R.; JOSHI, S. S. Analysis of hole quality in drilling GLARE fiber metal laminates. **Composite Structures**, United Kingdom, v. 123, p. 350–365, 2015. DOI: 10.1016/j.compstruct.2014.12.056. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.compstruct.2014.12.056>.
- PERVAIZ, S.; KANNAN, S.; HUO, D.; MAMIDALA, R. Ecofriendly inclined drilling of carbon fiber-reinforced polymers (CFRP). **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, United Kingdom, v. 111, n. 7–8, p. 2127–2153, 2020. DOI: 10.1007/s00170-020-06203-y.
- PESCI, P. G. S. **Avaliação do desempenho de compósitos ablativos em sistemas de proteção térmica**. 2017. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica). Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2017.
- PETERS, S. .. (ORG.). **Handbook of Composites**. 2. ed. Cambridge: SPRINGER-SCIENCE+BUSINESS MEDIA, B.V, 1998. DOI: 10.1007/978-1-4615-6389-1. Disponível em: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/0010436170903162>.
- PHADNIS, V. A.; MAKHDUM, F.; ROY, A.; SILBERSCHMIDT, V. V. Drilling in carbon/epoxy composites: Experimental investigations and finite element implementation. **Composites Part A: Applied Science and Manufacturing**, United Kingdom, v. 47, n. 1, 2013. DOI: 10.1016/j.compositesa.2012.11.020.
- PHAPALE, K.; AHIRE, A.; SINGH, R. Experimental characterization and finite element modeling of critical thrust force in CFRP drilling. **Machining Science and Technology**, United, v. 22, n. 2, p. 249–270, 2018. DOI: 10.1080/10910344.2017.1337134. Disponível em: <https://doi.org/10.1080/10910344.2017.1337134>.
- PIQUET, R.; FERRET, B.; LACHAUD, F.; SWIDER, P. Experimental analysis of drilling damage in thin carbon/epoxy plate using special drills. **Composites Part A: Applied Science and Manufacturing**, United Kingdom, v. 31, n. 10, p. 1107–1115, 2000. DOI: 10.1016/S1359-835X(00)00069-5.
- PONNUVEL, S.; MOORTHY, T. V. Investigation on the influence of multi walled carbon nanotubes on delamination in drilling epoxy/glass fabric polymeric nanocomposite. **Procedia Engineering**, United Kingdom, v. 51, p. 735–744, 2013. DOI: 10.1016/j.proeng.2013.01.105.
- PONNUVEL, S.; MOORTHY, T. V. Multi-criteria optimisation in drilling of epoxy/ glass fabric hybrid nanocomposite using grey relational analysis. **Applied Mechanics and Materials**, Switzerland, v. 446–447, p. 172–175, 2014. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMM.446-447.172.
- PONNUVEL, S.; MOORTHY, T. V.; HARIHARAN, P. Influence of multi-walled carbon nanotubes on circularity of drilled holes in epoxy/glass fabric polymeric composite. **International Journal of Applied Engineering Research**, India, v. 10, n. 11, p. 28255–28262, 2015. DOI: 10(11):28255-28262. Disponível em: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-84937918526&partnerID=40&md5=095f1345c581452a86d739df4ff5ce3c>.

PONTAROLLI, M. L. **Compósitos Ablativos Carbono-Fenólicos Aditivados com Nanopartículas de Carbono**. 2006. Dissertação (Mestrado em Ciências). Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos, 2006

PORA, J. Composite Materials in the Airbus A380 - From History to Future. *In: 13^o INTERNATIONAL CONFERENCE ON COMPOSITE MATERIALS 2001, Beijing*. **Anais [...]**. Beijing: ICCM-13, 2001. p. 1–10.

POULACHON, G.; OUTEIRO, J.; RAMIREZ, C.; ANDRÉ, V.; ABRIVARD, G. Hole Surface Topography and Tool Wear in CFRP Drilling. **Procedia CIRP**, Netherlands, v. 45, p. 35–38, 2016. DOI: 10.1016/j.procir.2016.02.348. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.procir.2016.02.348>.

PRAMANIK, A.; LITTLEFAIR, G. Developments in machining of stacked materials made of CFRP and titanium/aluminum alloys. **Machining Science and Technology**, United States, v. 18, n. 4, p. 485–508, 2014. DOI: 10.1080/10910344.2014.955718.

QIU, X.; LI, P.; LI, C.; NIU, Q.; CHEN, A.; OUYANG, P.; KO, T. J. Study on chisel edge drilling behavior and step drill structure on delamination in drilling CFRP. **Composite Structures**, United Kingdom, v. 203, n. September 2017, p. 404–413, 2018. a. DOI: 10.1016/j.compstruct.2018.07.007. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2018.07.007>.

QIU, X.; LI, P.; NIU, Q.; CHEN, A.; OUYANG, P.; LI, C.; KO, T. J. Influence of machining parameters and tool structure on cutting force and hole wall damage in drilling CFRP with stepped drills. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, United Kingdom, v. 97, n. 1–4, p. 857–865, 2018. b. DOI: 10.1007/s00170-018-1981-2.

QUAN, Y.; ZHONG, W. Investigation on drilling-grinding of CFRP. **Frontiers of Mechanical Engineering in China**, China, v. 4, n. 1, p. 60–63, 2009. DOI: 10.1007/s11465-009-0008-y.

QUINLAN, E P. **Thermal and crystallinity profiles in laminates manufactured with automated thermoplastic tow placement process**. 2011. Thesis (PhD. Mechanical Engineering). McGill University, Montreal, 2011.

RAFIQUE, I.; KAUSAR, A.; ANWAR, Z.; MUHAMMAD, B. Exploration of Epoxy Resins, Hardening Systems, and Epoxy/Carbon Nanotube Composite Designed for High Performance Materials: A Review. **Polymer - Plastics Technology and Engineering**, United States, v. 55, n. 3, p. 312–333, 2016. DOI: 10.1080/03602559.2015.1070874.

RAHMAN, ATEEQ; ALI, ILIAS; AL ZAHIRANI, SAEED M.; ELEITHY, RABEH H. A REVIEW OF THE APPLICATIONS OF NANOCARBON POLYMER COMPOSITES. **Nano**, Singapore, v. 06, n. 03, p. 185–203, 2011. DOI: 10.1142/S179329201100255X. Disponível em: <https://www.worldscientific.com/doi/abs/10.1142/S179329201100255X>.

RAHME, P.; LANDON, Y.; LACHAUD, F.; PIQUET, R.; LAGARRIGUE, P. Drilling of thick composite materials using a step gundrill. **Composites Part A: Applied Science and Manufacturing**, United Kingdom, v. 103, p. 304–313, 2017. DOI: 10.1016/j.compositesa.2017.10.016. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2017.10.016>.

RAJ, D.; 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**, United States, v. 31, n. 5, p. 587–592, 2016. DOI: 10.1080/10426914.2015.1004713. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1080/10426914.2015.1004713>.

RAJA, R.; JANNET, S. Experimental investigation of high speed drilling of glass fiber reinforced

plastic (GFRP) composite laminates made up of different polymer matrices. **International Journal of Mechanical and Production Engineering Research and Development**, India, v. 7, n. 6, p. 351–358, 2017. DOI: 10.24247/ijmperdec201739.

RAMESH, M.; PALANIKUMAR, K.; REDDY, K. Hemachandra. Influence of Tool Materials on Thrust Force and Delamination in Drilling Sisal-glass Fiber Reinforced Polymer (S-GFRP) Composites. **Procedia Materials Science**, Netherlands, v. 5, p. 1915–1921, 2014. DOI: 10.1016/j.mspro.2014.07.513.

RAMIREZ, C.; POULACHON, G.; ROSSI, F.; M'SAOUBI, R. Tool wear monitoring and hole surface quality during CFRP drilling. **Procedia CIRP**, Netherlands, v. 13, p. 163–168, 2014. DOI: 10.1016/j.procir.2014.04.028. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.procir.2014.04.028>.

RAMKUMAR, J.; MALHOTRA, S. K.; KRISHNAMURTHY, R. Studies on drilling of glass/epoxy laminates using coated high-speed steel drills. **Materials and Manufacturing Processes**, United States, v. 17, n. 2, p. 213–222, 2002. DOI: 10.1081/AMP-120003531.

RAMKUMAR, J.; MALHOTRA, S. K.; KRISHNAMURTHY, R. Effect of workpiece vibration on drilling of GFRP laminates. **Journal of Materials Processing Technology**, Netherlands, v. 152, n. 3, p. 329–332, 2004. DOI: 10.1016/S0924-0136(03)00622-8.

RANA, S.; FANGUEIRO, R. (ORG.). **Advanced Composite Materials for Aerospace Engineering: Processing, Properties and Applications**. 1. ed. Cambridge,: Woodhead Publishing, 2016.

RAPHEY, V. R.; HENNA, T. K.; NIVITHA, K. P.; MUFEEDHA, P.; SABU, C.; PRAMOD, K. Advanced biomedical applications of carbon nanotube. **Materials Science and Engineering C**, Netherlands, v. 100, n. March, p. 616–630, 2019. DOI: 10.1016/j.msec.2019.03.043. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.msec.2019.03.043>.

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**, Switzerland, v. 267, n. 5–8, p. 1022–1030, 2009. a. DOI: 10.1016/j.wear.2009.01.031.

RAWAT, S.; ATTIA, H. Characterization of the dry high speed drilling process of woven composites using Machinability Maps approach. **CIRP Annals - Manufacturing Technology**, Switzerland, v. 58, n. 1, p. 105–108, 2009. b. DOI: 10.1016/j.cirp.2009.03.100.

RAY, Dia (ORG.). **Biocomposites for High-Performance Applications: Current Barriers and Future Needs Towards Industrial Development**. 1. ed. Cambridge: Woodhead Publishing, 2017.

REGHUNADHAN NAIR, C. P. Advances in addition-cure phenolic resins. **Progress in Polymer Science**, United Kingdom, v. 29, n. 5, p. 401–498, 2004. DOI: 10.1016/j.progpolymsci.2004.01.004.

REZENDE; COSTA, M. L.; BOTELHO, E. C. **Compósitos Estruturais: Tecnologia e Prática**. 1. ed. São Paulo: Artliber, 2011.

REZENDE, M. C. Fractografia de Compósitos Estruturais. **Polímeros: Ciência e Tecnologia**, São Carlos, v. 17, n. 3, p. E4–E11, 2007. DOI: 10.1590/S0104-14282007000300003. Disponível em: http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0104-14282007000300003&lng=pt&nrm=iso&tlng=pt.

REZENDE, M. C.; BOTELHO, E. C. O uso de compósitos estruturais na indústria aeroespacial. **Polímeros**, Brasil, v. 10, n. 2, p. e4–e10, 2000. DOI: 10.1590/S0104-14282000000200003.

RIBEIRO, B. **Obtenção e caracterização de compósitos nanoestruturados de poli(sulfeto de fenileno) reforçados com nanotubos de carbono**. 2015. Tese (Doutor em Engenharia

Mecânica). Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2015.

RIBEIRO, B. **Estudo da cinética de cristalização e de degradação de compósitos nanoestruturados de poliamida 6,6/nanotubos de carbonos**. 2011. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2011.

ROBBEN, L.; RAHMAN, S.; BUHL, J. C.; DENKENA, B.; KONOPATZKI, B. Airborne sound emission as a process monitoring tool in the cut-off grinding of concrete. **Applied Acoustics**, United Kingdom, v. 71, n. 1, p. 52–60, 2010. DOI: 10.1016/j.apacoust.2009.07.004. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.apacoust.2009.07.004>.

RUSHING, H.; KARL, A.; WISNOWSKI, J. **Design and Analysis of Experiments by Douglas Montgomery: A Supplement for Using JMP**. Cary, North Carolina: SAS Institute Inc, 2013. DOI: 10.1002/9781118147634.

SAHOO, N. G.; RANA, S.; CHO, J. W.; LI, L.; CHAN, S. H. Polymer nanocomposites based on functionalized carbon nanotubes. **Progress in Polymer Science**, United Kingdom, v. 35, n. 7, p. 837–867, 2010. DOI: 10.1016/j.progpolymsci.2010.03.002. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.progpolymsci.2010.03.002>.

SAKUMA, K.; SETO, M.; TANIGUCHI, M.; YOKOO, Y. Tool Wear in Cutting Carbon-fiber-reinforced Plastics : The Effect of Physical Properties of Tool Materials. **Bulletin of JSME**, Japan, v. 28, n. 245, p. 2781–2788, 1985. DOI: 10.1299/jsme1958.28.2781. Disponível em: <http://www.mendeley.com/research/geology-volcanic-history-eruptive-style-yakedake-volcano-group-central-japan/>.

SAMARŽIJA-JOVANOVIĆ, S.; JOVANOVIĆ, V.; PETKOVIĆ, B.; JOVANOVIĆ, S.; MARKOVIĆ, G.; POROBIĆ, S.; MARINOVIĆ-CINCOVIĆ, M. Radiation stability and thermal behaviour of modified UF resin using biorenewable raw material-furfuryl alcohol. **Composites Part B: Engineering**, United Kingdom, v. 167, n. November 2018, p. 161–166, 2019. DOI: 10.1016/j.compositesb.2018.12.024.

SANDVIK COROMANT. **User's Guide: Machining carbon fibre materials** ContentSwedenAB Sandvik Coromant, 2010. Disponível em: <https://www.sandvik.coromant.com/sitecollectiondocuments/downloads/global/technical/guides/en-gb/c-2920-30.pdf>.

SANDVIK COROMANT. **Fórmulas de furação e definições**. 2017. Disponível em: <https://www.sandvik.coromant.com/pt-pt/knowledge/machining-formulas-definitions/pages/drilling.aspx>. Acesso em: 10 out. 2019.

SANTIAGO, R. C. **Desempenho ao impacto de laminados fibra-metal utilizando reforços termoplásticos**. 2014. Tese (Doutorado em Engenharia) Universidade de São Paulo, São Paulo, 2014

SANTIUSTE, C.; BARBERO, E.; MIGUÉLEZ, M. H. Computational analysis of temperature effect in composite bolted joints for aeronautical applications. **Journal of Reinforced Plastics and Composites**, United States, v. 30, n. 1, p. 3–11, 2011. DOI: 10.1177/0731684410385034.

SANTOS, R. G. **Desenvolvimento de um método para comparar os limites de estabilidade dinâmica em máquinas-ferramentas utilizando o diagrama de lóbulos**. 2011. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção). Universidade de São Paulo, São Carlos, 2011

SAOUDI, J.; ZITOUNE, R.; MEZLINI, S.; GURURAJA, S.; SEITIER, P. Critical thrust force predictions during drilling: Analytical modeling and X-ray tomography quantification. **Composite Structures**, United Kingdom, v. 153, p. 886–894, 2016. DOI: 10.1016/j.compstruct.2016.07.015. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.compstruct.2016.07.015>.

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**, United Kingdom, v. 66, n. 15, p. 3083–3088, 2006. DOI: 10.1016/j.compscitech.2006.05.003.

SCHROETER, R. B.; WEINGAERTNER, W. L. **Processos de Usinagem: Fabricação por Remoção de Material**. Santa Catarina: UFSC, 2004. Disponível em: <https://solidboxprojectss.files.wordpress.com/2013/01/usinagem-apostila-toda-ilustrada-ufsc.pdf>.

SCHULZE, V.; BECKE, C.; WEIDENMANN, K.; DIETRICH, S. Machining strategies for hole making in composites with minimal workpiece damage by directing the process forces inwards. **Journal of Materials Processing Technology**, Netherlands, v. 211, n. 3, p. 329–338, 2011. DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2010.10.004. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2010.10.004>.

SECO TOOLS. **Holemaking**. Sweden: Seco Tools AB, 2018. a.

SECO TOOLS. **Seco FeedMax SD205A-4.78-31-6R1-C1**. 2018b. Disponível em: https://www.secotools.com/#article/p_02740088. Acesso em: 5 ago. 2018.

SHAW, M. C. **Metal Cutting Principles**. 2. ed. Oxford: Oxford University Press, In, 2005.

SHEIKH-AHMAD, J. Y. **Machining of Polymer Composites**. New York: Springer, 2009. DOI: 10.1007/978-0-387-68619-6. Disponível em: <http://books.google.com/books?id=jYWHVCzjp4gC&pgis=1>.

SHETTY, N.; SHAHABAZ, S. M.; SHARMA, S. S.; DIVAKARA SHETTY, S. A review on finite element method for machining of composite materials. **Composite Structures**, United Kingdom, v. 176, p. 790–802, 2017. DOI: 10.1016/j.compstruct.2017.06.012. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.compstruct.2017.06.012>.

SHOKRIEH, M. M. **Residual Stresses in Composite Materials**. Cambridge: Woodhead Publishing Limited, 2014.

SHOKRIEH, M. M.; DANESHVAR, A.; AKBARI, S.; CHITSAZZADEH, M. The use of carbon nanofibers for thermal residual stress reduction in carbon fiber/epoxy laminated composites. **Carbon**, United Kingdom, v. 59, p. 255–263, 2013. DOI: 10.1016/j.carbon.2013.03.016. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.carbon.2013.03.016>.

SHUAIB, A. N.; AL-SULAIMAN, F. A.; HAMID, F. Machinability of Kevlar® 49 composite laminates while using standard TiN coated HSS drills. *In*: **Machining Science and Technology**. United States. v. 8p. 449–467. DOI: 10.1081/MST-200041116.

SHUNMUGESH, K.; KAVAN, P. Investigation and optimization of machining parameters in drilling of carbon fiber reinforced polymer (CFRP) composites. **Pigment and Resin Technology**, United Kingdom, v. 46, n. 1, p. 21–30, 2017. DOI: 10.1108/PRT-03-2016-0029.

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**, United Kingdom, v. 49, n. 12–13, p. 1008–1014, 2009. DOI: 10.1016/j.ijmachtools.2009.05.009. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2009.05.009>.

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**, United Kingdom, v. 51, n. 7–8, p. 569–578, 2011. DOI: 10.1016/j.ijmachtools.2011.04.007.

SHYHA, I.; SOO, S. L.; 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**, Netherlands, v. 210, n. 8, p. 1023–1034, 2010. DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2010.02.011. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2010.02.011>.

SIDDHPURA, M.; PAUROBALLY, R. A review of chatter vibration research in turning. **International Journal of Machine Tools and Manufacture**, United Kingdom, v. 61, p. 27–47, 2012. DOI: 10.1016/j.ijmachtools.2012.05.007. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2012.05.007>.

SILVA, D.; PAMIES TEIXEIRA, J.; MACHADO, C. M. Methodology analysis for evaluation of drilling-induced damage in composites. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, United Kingdom, v. 71, n. 9–12, p. 1919–1928, 2014. DOI: 10.1007/s00170-014-5616-y.

SILVA, H. P. **Caracterização mecânica por cisalhamento em materiais compósitos de carbono/fenólica submetidos a altas temperaturas para aplicação aeroespacial**. 2015a. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2015).

SILVA, H. P.; PARDINI, L. C.; BITTENCOURT, E. Shear Properties of Carbon Fiber / Phenolic Resin Composites Heat Treated at High Temperatures. **Journal of Aerospace Technology and Management**, Brazil, v. 8, n. 3, p. 363–372, 2016. DOI: 10.5028/jatm.v8i3.643.

SILVA, R. H. L.; BOMBONATO, S. G.; LUSTOSA, A. A.; SOUTO, U. B.; SILVA, M. B. Análise do desgaste de ferramentas via emissão acústica na usinagem de um aço inoxidável. In: 5^o BRAZILIAN CONFERENCE ON MANUFACTURING ENGINEERING 2009, Belo Horizonte. **Anais [...]**. Belo Horizonte: 5^o COBEF, 2009. p. 1–7.

SILVA, R. H. L.; SILVA, M. B.; DUARTE, M. A. V; COSTA, G. M.; BORGES, A. S. Aplicação De Rede Neural Artificial Para Monitoramento do Desgaste de Ferramentas Utilizando Sinal de Emissão Acústica e Potência de Corte. In: 6^o BRAZILIAN CONFERENCE ON MANUFACTURING ENGINEERING 2011, Caxias do Sul. **Anais [...]**. Caxias do Sul: 6^o COBEF, 2011. p. 1–11.

SILVA, S. F. C. **Tecnologia de plasma para estudo das propriedades ablativas em compósitos obtidos por bobinagem para uso aeroespacial**. 2015b Tese (Doutorado em Engenharia Química). Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2015.

SINGH, I.; BHATNAGAR, N. Drilling-induced damage in uni-directional glass fiber reinforced plastic (UD-GFRP) composite laminates. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, United Kingdom, v. 27, n. 9–10, p. 877–882, 2006. DOI: 10.1007/s00170-004-2282-5.

SINGH, I.; BHATNAGAR, N.; VISWANATH, P. Drilling of uni-directional glass fiber reinforced plastics: Experimental and finite element study. **Materials & Design**, United Kingdom, v. 29, n. 2, p. 546–553, 2008. DOI: 10.1016/j.matdes.2007.01.029. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0261306907000374>.

SORRENTINO, L.; TURCHETTA, S.; BELLINI, C. A new method to reduce delaminations during drilling of FRP laminates by feed rate control. **Composite Structures**, United Kingdom, v. 186, n. September 2017, p. 154–164, 2018. DOI: 10.1016/j.compstruct.2017.12.005. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2017.12.005>.

SOUZA, A. J. **Processos de Fabricação por Usinagem**. Porto Alegre: UFRGS, 2011.

STAROST, K.; FRIJNS, E.; VAN LAER, J.; FAISAL, N.; EGIZABAL, A.; ELIZEXTEA, C.; BLAZQUEZ, M.; NELISSEN, I.; NJUGUNA, J. Assessment of nanoparticles release into the environment during drilling of carbon nanotubes/epoxy and carbon nanofibres/epoxy nanocomposites. **Journal of Hazardous Materials**, Netherlands, v. 340, p. 57–66, 2017. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2017.06.057.

STEMMER, C. E. **Ferramentas de corte II**. Florianópolis: UFSC, 1995.

STEPHENSON, D. A.; AGAPIOU, J. S. **Metal Cutting: Theory and Practice**. 2. ed. Florida: CRC Press, 2006.

TAKATA, S.; AHN, J. H.; MIKI, M.; MIYAO, Y.; SATA, T. A Sound Monitoring System for Fault Detection of Machine and Machining States. **CIRP Annals - Manufacturing Technology**, Switzerland, v. 35, n. 1, p. 289–292, 1986. DOI: 10.1016/S0007-8506(07)61890-3.

TAN, C. L.; AZMI, A. I.; MUHAMMAD, N. Delamination and Surface Roughness Analyses in Drilling Hybrid Carbon/Glass Composite. **Materials and Manufacturing Processes**, United States, v. 31, n. 10, p. 1366–1376, 2016. DOI: 10.1080/10426914.2015.1103864. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1080/10426914.2015.1103864>.

TAVARES, C. M. M. **Influência da força de aperto na minimização do dano em furação a alta velocidade em materiais compósitos**. 2013. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) Universidade Nova de Lisboa, Lisboa, 2013.

TEKSCAN. **FlexiForce A201** USATekscan Inc., 2019. Disponível em: <https://www.tekscan.com/products-solutions/force-sensors/a201>.

TETI, R. Machining of Composite Materials. **CIRP Annals**, Switzerland, v. 51, n. 2, p. 611–634, 2002. DOI: 10.1016/S0007-8506(07)61703-X. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S000785060761703X>.

TITA, S. P. S.; PAIVA, J. M. F. De; FROLLINI, E. Resistência ao Impacto e Outras Propriedades de Compósitos Lignocelulósicos: Matrizes Termofixas Fenólicas Reforçadas com Fibras de Bagaço de Cana-de-açúcar. **Polímeros**, Brasil, v. 12, n. 4, p. 228–239, 2005. DOI: 10.1590/s0104-14282002000400005.

TITA, V. **Contribuição ao estudo de danos e falhas progressivas em estruturas de material compósito polimérico**. 2003. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica). Universidade de São Paulo, São Carlos, 2003.

TRANSFURANS CHEMICALS BVBA. **Polyfurfuryl Alcohol for Composite in Aerospace**. 2018a. Disponível em: <https://www.polyfurfurylalcohol.com/>. Acesso em: 5 jun. 2018.

TRANSFURANS CHEMICALS BVBA. **PFA Thermosets in Composite Applications**, 2018. b. Disponível em: <http://e-lass.eu/media/2018/07/TRANSFURAN-Chem.pdf>.

TRENT, E. M.; WRIGHT, P. K. **Metal Cutting**. 4. ed. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2000.

TSAO, C. C. Taguchi analysis of drilling quality associated with core drill in drilling of composite material. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, United Kingdom, v. 32, n. 9–10, p. 877–884, 2007. DOI: 10.1007/s00170-006-0414-9.

TSAO, C. C. Investigation into the effects of drilling parameters on delamination by various step-core drills. **Journal of Materials Processing Technology**, Netherlands, v. 206, n. 1–3, p. 405–411, 2008. a. DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2007.12.057.

TSAO, C. C. **Thrust force and delamination of core-saw drill during drilling of carbon fiber reinforced plastics (CFRP)**. United Kingdom. v. 37 DOI: 10.1007/s00170-007-0963-6.

TSAO, C. C. Comparison between response surface methodology and radial basis function network for core-center drill in drilling composite materials. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, United Kingdom, v. 37, n. 11–12, p. 1061–1068, 2008. c. DOI: 10.1007/s00170-007-1057-1.

TSAO, C. C. Experimental study of drilling composite materials with step-core drill. **Materials & Design**, United Kingdom, v. 29, n. 9, p. 1740–1744, 2008. d. DOI: 10.1016/j.matdes.2008.03.022. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0261306908000654>.

TSAO, C. C. Drilling processes for composites. In: HOCHENG, H. (org.). **Machining Technology for Composite Materials**. 1. ed. Cambridge: Elsevier, 2012. p. 17–64. DOI: 10.1533/9780857095145.1.17. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/B9780857090300500023>.

TSAO, C. C.; HOCHENG, H. The effect of chisel length and associated pilot hole on delamination when drilling composite materials. **International Journal of Machine Tools and Manufacture**, United Kingdom, v. 43, n. 11, p. 1087–1092, 2003. DOI: 10.1016/S0890-6955(03)00127-5.

TSAO, C. C.; HOCHENG, H. Taguchi analysis of delamination associated with various drill bits in drilling of composite material. **International Journal of Machine Tools and Manufacture**, United Kingdom, v. 44, n. 10, p. 1085–1090, 2004. DOI: 10.1016/j.ijmachtools.2004.02.019.

TSAO, C. C.; HOCHENG, H. Effect of eccentricity of twist drill and candle stick drill on delamination in drilling composite materials. **International Journal of Machine Tools and Manufacture**, United Kingdom, v. 45, n. 2, p. 125–130, 2005. a. DOI: 10.1016/j.ijmachtools.2004.08.001.

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**, United Kingdom, v. 45, n. 11, p. 1282–1287, 2005. b. DOI: 10.1016/j.ijmachtools.2005.01.009.

TSAO, C. C.; HOCHENG, H. Effect of tool wear on delamination in drilling composite materials. **International Journal of Mechanical Sciences**, United Kingdom, v. 49, n. 8, p. 983–988, 2007. DOI: 10.1016/j.ijmecsci.2007.01.001.

TSAO, C. C.; HOCHENG, H. A Review of Backup Mechanism for Reducing Delamination when Drilling Composite Laminates. **Journal of Research Updates in Polymer Science**, Canada, v. 5, n. 3, p. 97–107, 2016. DOI: 10.6000/1929-5995.2016.05.03.2.

TSAO, C. C.; HOCHENG, H.; CHEN, Y. C. Delamination reduction in drilling composite materials by active backup force. **CIRP Annals - Manufacturing Technology**, Switzerland, v. 61, n. 1, p. 91–94, 2012. DOI: 10.1016/j.cirp.2012.03.036. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.cirp.2012.03.036>.

TSAO, C. C.; KUO, K. L.; HSU, I. C. Evaluation of a novel approach to a delamination factor after drilling composite laminates using a core-saw drill. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, United Kingdom, v. 59, n. 5–8, p. 617–622, 2012. DOI: 10.1007/s00170-011-3532-y.

TSAO, C. C.; KUO, K. L.; HSU, I. C.; CHERN, G. T. Analysis of core-candlestick drill in drilling composite materials. **Key Engineering Materials**, Switzerland, v. 419–420, p. 337–340, 2010. DOI: 10.4028/www.scientific.net/KEM.419-420.337.

TSAO; HOCHENG. Effects of exit back-up on delamination in drilling composite materials using a saw drill and a core drill. **International Journal of Machine Tools and Manufacture**, United Kingdom, v. 45, n. 11, p. 1261–1270, 2005. c. DOI: 10.1016/j.ijmachtools.2005.01.015.

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**, United Kingdom, v. 87, p. 61–72, 2014. DOI: 10.1016/j.ijmachtools.2014.06.004. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2014.06.004>.

ÜNVER, H.; ÖKTEM, Z. Controlled cationic polymerization of furfuryl alcohol. **European Polymer Journal**, United Kingdom, v. 49, n. 5, p. 1023–1030, 2013. DOI: 10.1016/j.eurpolymj.2013.01.025. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.eurpolymj.2013.01.025>.

VALENTE, P. A. L. **Juntas Mecânicas em Material Compósito**. 2012. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica), Instituto Superior de Engenharia de Lisboa, Lisboa, 2012.

VARGAS, M. A.; SCHEUBNER, M.; GUTHAUSEN, G. Reaction kinetics of polyfurfuryl alcohol bioresin and nanoparticles by ¹H-NMR transverse relaxation measurements. **Polymer Composites**, United States, v. 39, n. 9, p. 3280–3288, 2018. DOI: 10.1002/pc.24342. Disponível em: <http://doi.wiley.com/10.1002/pc.24342>.

VELAYUDHAM, A.; KRISHNAMURTHY, R. Effect of point geometry and their influence on thrust and delamination in drilling of polymeric composites. **Journal of Materials Processing Technology**, Netherlands, v. 185, n. 1–3, p. 204–209, 2007. DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2006.03.146.

VELAYUDHAM, A.; KRISHNAMURTHY, R.; SOUNDARAPANDIAN, T. Evaluation of drilling characteristics of high volume fraction fibre glass reinforced polymeric composite. **International Journal of Machine Tools and Manufacture**, United Kingdom, v. 45, n. 4–5, p. 399–406, 2005. DOI: 10.1016/j.ijmachtools.2004.09.012.

VENKATESH, B.; SIKARWAR, R. S. Drilling of Carbon Fibre Reinforced Polymer Materials - A Review. **International Journal of Mechanical and Production Engineering Research and Development**, India, v. 8, n. 2, p. 157–166, 2018. DOI: 10.24247/ijmperdapr201817.

VILLAVERDE, M. M.; GARETTO, T. F.; MARCHI, A. J. Liquid-phase transfer hydrogenation of furfural to furfuryl alcohol on Cu – Mg – Al catalysts. **Catalysis Communications**, Netherlands, v. 58, p. 6–10, 2015. DOI: 10.1016/j.catcom.2014.08.021. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.catcom.2014.08.021>.

VLASVELD, D. P. N.; BERSEE, H. E. N.; PICKEN, S. J. **Nanocomposite matrix for increased fibre composite strength**. United Kingdom. v. 46 DOI: 10.1016/j.polymer.2005.08.003.

VOROBEL, A. M.; POKROVSKIY, O. I.; USTINOVICH, K. B.; PARENAGO, O. O.; SAVILOV, S. V.; LUNIN, V. V.; NOVOTORTSEV, V. M. Preparation of polymer - Multi-walled carbon nanotube composites with enhanced mechanical properties using supercritical antisolvent precipitation. **Polymer**, United Kingdom, v. 95, p. 77–81, 2016. DOI: 10.1016/j.polymer.2016.04.059. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.polymer.2016.04.059>.

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**, United Kingdom, v. 35, n. 12, p. 1623–1638, 1995. DOI: 10.1016/0890-6955(95)00014-O.

WANG, G. D.; KIRWA, M. S. Comparisons of the use of twist, pilot-hole and step-drill on influence of carbon fiber-reinforced polymer drilling hole quality. **Journal of Composite Materials**, United States, v. 52, n. 11, p. 1465–1480, 2018. DOI: 10.1177/0021998317726366.

WANG, G. D.; MELLY, S. K. Three-dimensional finite element modeling of drilling CFRP composites using Abaqus/CAE: a review. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, United Kingdom, v. 94, n. 1–4, p. 599–614, 2018. DOI: 10.1007/s00170-017-0754-7. Disponível em: <http://link.springer.com/10.1007/s00170-017-0754-7>.

WANG, H.; SUN, J.; LI, J.; LI, W. Investigation on delamination morphology during drilling composite laminates. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, United Kingdom, v. 74, n. 1–4, p. 257–266, 2014. a. DOI: 10.1007/s00170-014-5973-6.

WANG, H.; YAO, J. Use of Poly(furfuryl alcohol) in the Fabrication of Nanostructured Carbons and Nanocomposites. **Industrial & Engineering Chemistry Research**, United States, v. 45, n. 19, p. 6393–6404, 2006. DOI: 10.1021/ie0602660. Disponível em: <http://pubs.acs.org/doi/abs/10.1021/ie0602660>.

WANG; KWON; STURTEVANT; KIM; LANTRIP. Comparative tool wear study based on drilling experiments on CFRP/Ti stack and its individual layers. **Wear**, Switzerland, v. 317, n. 1–2, 2014. b. DOI: 10.1016/j.wear.2014.05.007.

WANG, Q.; ZHANG, D.; TANG, K.; ZHANG, Y. A mechanics based prediction model for tool wear and power consumption in drilling operations and its applications. **Journal of Cleaner Production**, Netherlands, v. 234, p. 171–184, 2019. DOI: 10.1016/j.jclepro.2019.06.148. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.06.148>.

WANG, R. M.; ZHENG, S. R.; ZHENG, Y. G. **Polymer Matrix Composites and Technology**. Oxford; Cambridge; Philadelphia; New Delhi: Woodhead Publishing Limited, 2011.

WANG, X.; KWON, P. Y.; STURTEVANT, C.; KIM, D. DW; LANTRIP, J. Tool wear of coated drills in drilling CFRP. **Journal of Manufacturing Processes**, United States, v. 15, n. 1, p. 127–135, 2013. DOI: 10.1016/j.jmapro.2012.09.019. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jmapro.2012.09.019>.

WEI, Y.; XU, J.; CAI, X.; AN, Q.; CHEN, M. Effect of drills with different drill bits on delamination in drilling composite materials. **Key Engineering Materials**, Switzerland, v. 589–590, p. 173–178, 2014. DOI: 10.4028/www.scientific.net/KEM.589-590.173.

WEINERT, K.; KEMPMANN, C. Cutting temperatures and their effects on the machining behaviour in drilling reinforced plastic composites. **Advanced Engineering Materials**, Germany, v. 6, n. 8, p. 684–689, 2004. DOI: 10.1002/adem.200400025.

WICKS, S. S.; DE VILLORIA, R. G.; WARDLE, B. L. Interlaminar and intralaminar reinforcement of composite laminates with aligned carbon nanotubes. **Composites Science and Technology**, United Kingdom, v. 70, n. 1, p. 20–28, 2010. DOI: 10.1016/j.compscitech.2009.09.001. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.compscitech.2009.09.001>.

WIN, D. T. Furfural – Gold from Garbage. **Assumption University Journal of Technology**, Thailand, v. 8, n. 4, p. 185–190, 2005. Disponível em: http://www.journal.au.edu/au techno/2005/apr05/vol8no4_abstract04.pdf.

WU, Mi; GAO, Y.; CHENG, Y.; WANG, B.; HUO, T. Carbon Fiber Composite Materials Finite Element Simulation Analysis of Cutting Force. **Procedia CIRP**, Netherlands, v. 56, p. 109–114, 2016. DOI: 10.1016/j.procir.2016.10.031.

WU, Q.; ZHU, W.; ZHANG, C.; LIANG, Z.; WANG, B. Study of fire retardant behavior of carbon nanotube membranes and carbon nanofiber paper in carbon fiber reinforced epoxy composites. **Carbon**, United Kingdom, v. 48, n. 6, p. 1799–1806, 2010. DOI: 10.1016/j.carbon.2010.01.023.

Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.carbon.2010.01.023>.

XU, J.; AN, Q.; CHEN, M. A comparative evaluation of polycrystalline diamond drills in drilling high-strength T800S/250F CFRP. **Composite Structures**, United Kingdom, v. 117, n. 1, p. 71–82, 2014. DOI: 10.1016/j.compstruct.2014.06.034. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.compstruct.2014.06.034>.

XU, J.; JI, M.; CHEN, M.; REN, F. Investigation of minimum quantity lubrication effects in drilling CFRP/Ti6Al4V stacks. **Materials and Manufacturing Processes**, United States, v. 34, n. 12, p. 1401–1410, 2019. a. DOI: 10.1080/10426914.2019.1661431. Disponível em: <https://doi.org/10.1080/10426914.2019.1661431>.

XU, J.; MKADDEM, A.; EL MANSORI, M. Recent advances in drilling hybrid FRP/Ti composite: A state-of-the-art review. **Composite Structures**, United Kingdom, v. 135, p. 316–338, 2016. DOI: 10.1016/j.compstruct.2015.09.028. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.compstruct.2015.09.028>.

XU, J.; ZHOU, L.; CHEN, M.; REN, F. Experimental study on mechanical drilling of carbon/epoxy composite-Ti6Al4V stacks. **Materials and Manufacturing Processes**, United States, v. 34, n. 7, p. 715–725, 2019. b. DOI: 10.1080/10426914.2019.1594275. Disponível em: <https://doi.org/10.1080/10426914.2019.1594275>.

XU, Jinyang; LI, Chao; CHEN, Ming; EL MANSORI, Mohamed; REN, Fei. An investigation of drilling high-strength CFRP composites using specialized drills. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, United Kingdom, v. 103, n. 9–12, p. 3425–3442, 2019. c. DOI: 10.1007/s00170-019-03753-8. Disponível em: <http://link.springer.com/10.1007/s00170-019-03753-8>.

XU, W.; ZHANG, L.; WU, Y. Effect of tool vibration on chip formation and cutting forces in the machining of fiber-reinforced polymer composites. **Machining Science and Technology**, United States, v. 20, n. 2, p. 312–329, 2016. DOI: 10.1080/10910344.2016.1168930. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1080/10910344.2016.1168930>.

YANG, K.; GU, M.; GUO, Y.; PAN, X.; MU, G. Effects of carbon nanotube functionalization on the mechanical and thermal properties of epoxy composites. **Carbon**, United Kingdom, v. 47, n. 7, p. 1723–1737, 2009. DOI: 10.1016/j.carbon.2009.02.029. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.carbon.2009.02.029>.

YARAGALLA, S.; MISHRA, R.; THOMAS, S.; KALARIKKAL, N.; MARIA, H. J. (ORG.). **Carbon-Based Nanofillers and Their Rubber Nanocomposites**. United States : Elsevier, 2019. DOI: 10.1016/C2016-0-03648-3. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/C20160036483>.

YEAGER, C.; NAZARI, A.; AROLA, D. Machining of cortical bone: Surface texture, surface integrity and cutting forces. **Machining Science and Technology**, United States, v. 12, n. 1, p. 100–118, 2008. DOI: 10.1080/10910340801890961.

YEN, Y. C.; JAIN, A.; CHIGURUPATI, P.; WU, W. T.; ALTAN, T. Computer simulation of orthogonal cutting using a tool with multiple coatings. **Machining Science and Technology**, United States, v. 8, n. 2, p. 305–326, 2004. DOI: 10.1081/MST-200029230.

ZARIF KARIMI, N.; HEIDARY, H.; FOTOUHI, M.; MINAK, G. Experimental analysis of GFRP laminates subjected to compression after drilling. **Composite Structures**, United Kingdom, v. 169, p. 144–152, 2017. DOI: 10.1016/j.compstruct.2017.01.017. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.compstruct.2017.01.017>.

ZENIA, S.; BEN AYED, L.; NOUARI, M.; DELAMÉZIERE, A. Numerical analysis of the

interaction between the cutting forces, induced cutting damage, and machining parameters of CFRP composites. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, United Kingdom, v. 78, n. 1–4, p. 465–480, 2015. DOI: 10.1007/s00170-014-6600-2.

ZHANG, H.; ZHU, P.; LIU, Z.; QI, S.; ZHU, Y. Research on prediction method of mechanical properties of open-hole laminated plain woven CFRP composites considering drilling-induced delamination damage. **Mechanics of Advanced Materials and Structures**, United Kingdom, v. 0, n. 0, p. 1–16, 2020. DOI: 10.1080/15376494.2020.1745969. Disponível em: <https://doi.org/10.1080/15376494.2020.1745969>.

ZHANG, L. C.; ZHANG, H. J.; WANG, X. M. A force prediction model for cutting unidirectional fibre-reinforced plastics. **Machining Science and Technology**, United States, v. 5, n. 3, p. 293–305, 2001. DOI: 10.1081/MST-100108616.

ZHANG, L.; ZHANG, Y.; WANG, L.; YAO, Y.; WU, J.; SUN, Y.; TIAN, M.; LIU, J. Phenolic resin modified by boron-silicon with high char yield. **Polymer Testing**, United Kingdom, v. 73, n. November 2018, p. 208–213, 2019. DOI: 10.1016/j.polymertesting.2018.11.033. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2018.11.033>.

ZHENG, K.; DONG, S.; LIAO, W. Investigation on thrust force in rotary ultrasonic drilling of CFRP using Brad drill. **Machining Science and Technology**, United States, v. 23, n. 6, p. 971–984, 2019. DOI: 10.1080/10910344.2019.1636277. Disponível em: <https://doi.org/10.1080/10910344.2019.1636277>.

ZITOUNE, R.; COLLOMBET, F. Numerical prediction of the thrust force responsible of delamination during the drilling of the long-fibre composite structures. **Composites Part A: Applied Science and Manufacturing**, United Kingdom, v. 38, n. 3, p. 858–866, 2007. DOI: 10.1016/j.compositesa.2006.07.009.

ZITOUNE, R.; KRISHNARAJ, V.; COLLOMBET, F. Study of drilling of composite material and aluminium stack. **Composite Structures**, United Kingdom, v. 92, n. 5, p. 1246–1255, 2010. DOI: 10.1016/j.compstruct.2009.10.010. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.compstruct.2009.10.010>.

APÊNDICE A- ANÁLISE ESTATÍSTICA PARA O PROCESSO DE FURAÇÃO

Neste apêndice são apresentadas as análises estatísticas para o consumo de potência, torque, pressão específica de corte, força de avanço, vibração do sistema, emissão sonora, fator delaminação, erro de dimensão e circularidade. Vale ressaltar que foram utilizados métodos lineares e interações de segunda ordem, visando evitar o confundimento das interações de 3ª ordem com as de 1ª ordem, e as de 4ª com as de 2ª ordem. Para cada modelo foi utilizado o melhor ajuste, com base no desvio padrão, R^2 , R^2 ajustado e R^2 predito.

Também são apresentados os resultados das análises de regressão linear simples e múltipla. No caso da regressão linear simples é examinada a relação linear entre duas variáveis contínuas: uma resposta (y) e uma preditora (x). Quanto mais essas duas variáveis são relacionadas, mais fácil de prever um valor de resposta a partir de um valor da preditora, ou seja, maior exatidão dos resultados. Essa metodologia foi utilizada para casos onde somente um dos fatores principais contribuiu com mais de 90% do resultado.

Para os casos onde um conjunto de fatores e/ou interações foram responsável pelo resultado final foi utilizado a regressão linear múltipla, a qual examina as relações lineares entre uma resposta contínua e duas ou mais preditoras.

CONSUMO DE POTÊNCIA

Nas Tabelas 10 e 11 são apresentados os resultados das análises de variância dos laminados sem e com adição de nanotubo de carbono, respectivamente. Constata-se que dos fatores principais o único que não tem influência nos resultados é a broca. Com relação as interações quase todas demonstraram ser significativas, sendo que para cada material as combinações se mostraram diferentes em alguns casos.

Tabela 10- Análise de variância para potência consumida, para os laminados sem CNT

Fator	DF	Seq SS	Contribuição	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Broca	1	260	0,24%	260,0	260,0	2,26	0,135
Suporte	1	3429	3,18%	3429,4	3429,4	29,83	0,000
Rotação	2	10101	9,36%	10101,4	5050,7	43,94	0,000
Avanço	4	42249	39,3%	42249,1	10562,3	9,88	0,000
Broca*Suporte	1	7494	6,94%	7494,4	7494,4	65,19	0,000
Broca*Rotação	2	62	0,06%	62,5	31,2	0,27	0,762
Broca*Avanço	4	1448	1,34%	1447,5	361,9	3,15	0,016
Suporte*Rotação	2	603	0,56%	603,0	301,5	2,62	0,076
Suporte*Avanço	4	2749	2,55%	2749,4	687,3	5,98	0,000
Rotação*Avanço	8	22336	20,69%	22335,5	2791,9	24,29	0,000
Erro	150	17244	15,97%	17243,7	115,0		
Teste de ajuste	30	7052	6,53%	7051,8	235,1	2,77	0,000
Erro puro	120	10192	9,44%	10191,9	84,9		
Total	179	107976	100,00%				

Resumo do Modelo

S	R ²	R ² (adj)	PRESS	R ² (pred)
10,7218	84,03%	80,94%	24830,9	77,0%

Tabela 11- Análise de variância para potência consumida, para os laminados com CNT

Fator	DF	Seq SS	Contribuição	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Broca	1	144,3	0,17%	144,3	144,3	2,00	0,159
Suporte	1	1054,4	1,22%	1054,4	1054,4	14,65	0,000
Rotação	2	5552,0	6,44%	5552,0	2776,0	38,57	0,000
Avanço	4	50389,3	58,44%	50389,3	12597,3	175,05	0,000
Broca*Suporte	1	727,8	0,84%	727,8	727,8	10,11	0,002
Broca*Rotação	2	480,2	0,56%	480,2	240,1	3,34	0,038
Broca*Avanço	4	825,0	0,96%	825,0	206,2	2,87	0,025
Suporte*Rotação	2	1480,0	1,72%	1480,0	740,0	10,28	0,000
Suporte*Avanço	4	666,0	0,77%	666,0	166,5	2,31	0,060
Rotação*Avanço	8	14104,5	16,36%	14104,5	1763,1	24,50	0,000
Erro	150	10794,7	12,52%	10794,7	72,0		
Teste de ajuste	30	4180,3	4,85%	4180,3	139,3	2,53	0,000
Erro puro	120	6614,3	7,67%	6614,3	55,1		
Total	179	86218,1	100,00%				

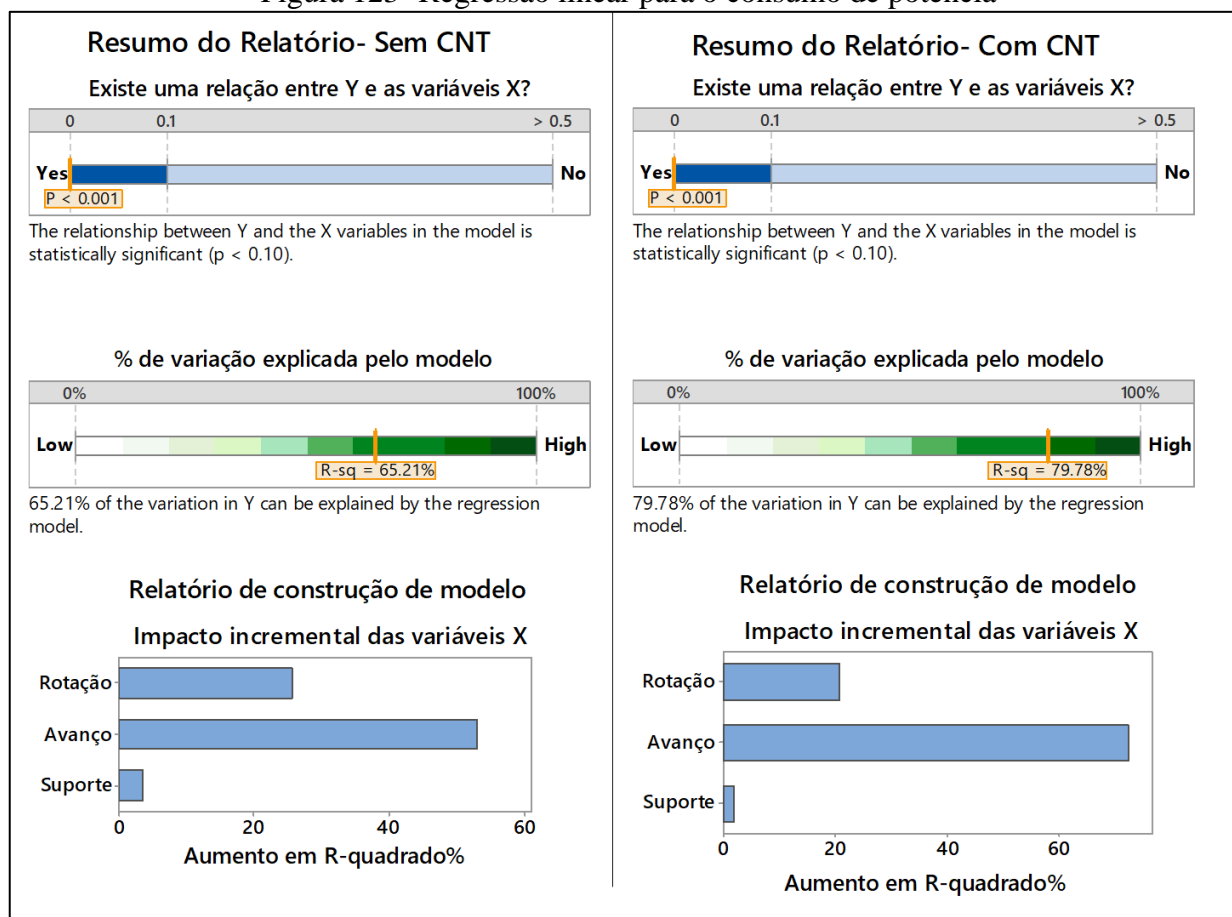
Resumo do Modelo

S	R ²	R ² (adj)	PRESS	R ² (pred)
10,7218	87,48%	85,06%	15544,3	81,97%

Na Figura 123 é apresentado os principais resultados da regressão linear múltipla, sendo Y a potência e X as variáveis rotação, avanço e suporte. O conjunto de variáveis analisadas pode

explicar aproximadamente 65% e 80% dos resultados, para os laminados sem e com CNT respectivamente. O avanço é o responsável pelo maior impacto incremental de R^2 , para ambos os materiais.

Figura 123- Regressão linear para o consumo de potência



Fonte: Autoria própria

TORQUE

Nas Tabelas 12 e 13 são apresentados os resultados das análises de variância dos laminados sem e com CNT respectivamente. Constata-se que dentre fatores principais a rotação é o fator de maior influência, para ambos os materiais, sendo sua a contribuição de 98%.

Tabela 12- Análise de variância para o torque, para os laminados sem CNT

Fator	DF	Seq SS	Contribuição	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Broca	1	928	0,01%	928	928	2,47	0,118
Suporte	1	9332	0,09%	9332	9332	24,89	0,000
Rotação	2	10646159	98%	10646159	5323080	14198,62	0,000
Avanço	4	89015	0,82%	89015	22254	59,36	0,000
Broca*Sujeito	1	21507	0,2%	21507	21507	57,37	0,000
Broca*Rotação	2	509	0,00%	509	254	0,68	0,509
Broca*Avanço	4	4833	0,04%	4833	1208	3,22	0,014
Suporte*Rotação	2	1422	0,01%	1422	711	1,9	0,154
Suporte*Avanço	4	7618	0,07%	7618	1904	5,08	0,001
Rotação*Avanço	8	25707	0,24%	25707	3213	8,57	0,000
Erro	150	56235	0,52%	56235	375		
Teste de ajuste	30	20239	0,19%	20239	675	2,25	0,001
Erro puro	120	35996	0,33%	35996	300		
Total	179	10863265	100%				

Resumo do Modelo

S	R ²	R ² (adj)	PRESS	R ² (pred)
19,3624	99,48%	99,38%	80978,6	99,25%

Tabela 13- Análise de variância para o torque, para os laminados com CNT

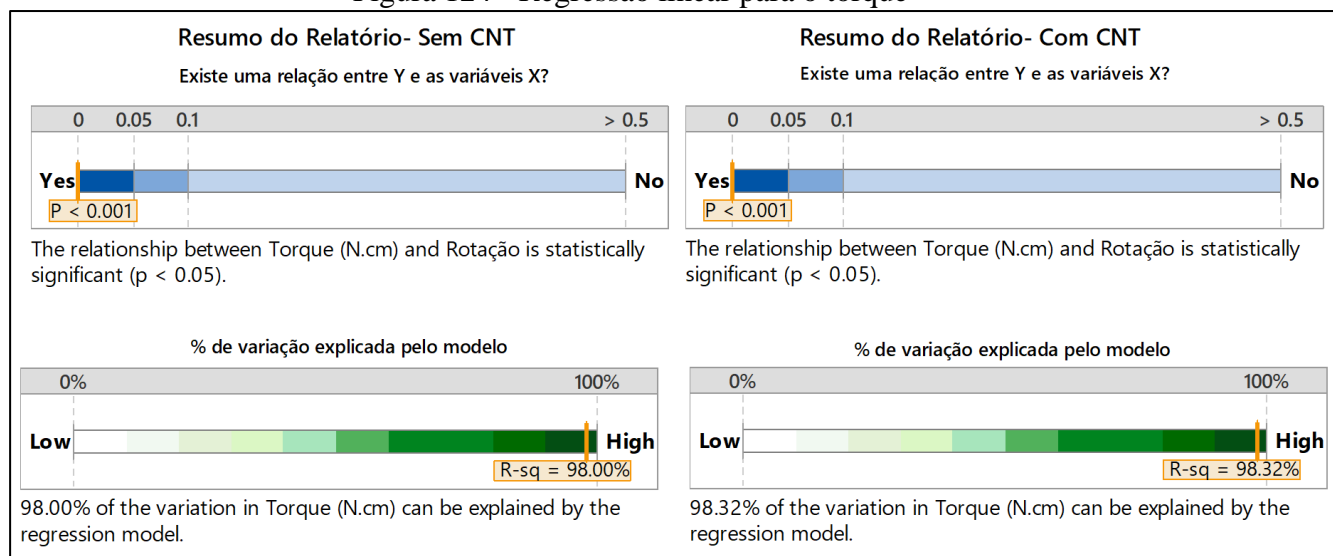
Fator	DF	Seq SS	Contribuição	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Broca	1	119	0,00%	119	119	0,53	0,468
Suporte	1	2583	0,03%	2583	2583	11,53	0,001
Rotação	2	9891285	98,32%	9891285	4945643	22083,06	0,000
Avanço	4	113280	1,13%	113280	28320	126,45	0,000
Broca*Sujeito	1	1585	0,02%	1585	1585	7,08	0,009
Broca*Rotação	2	1615	0,02%	1615	807	3,61	0,03
Broca*Avanço	4	2367	0,02%	2367	592	2,64	0,036
Suporte*Rotação	2	2942	0,03%	2942	1471	6,57	0,002
Suporte*Avanço	4	1215	0,01%	1215	304	1,36	0,252
Rotação*Avanço	8	9325	0,09%	9325	1166	5,2	0,000
Erro	150	33593	0,33%	33593	224		
Teste de ajuste	30	11529	0,11%	11529	384	2,09	0,003
Erro puro	120	22064	0,22%	22064	184		
Total	179	10059909	100%				

Resumo do Modelo

S	R ²	R ² (adj)	PRESS	R ² (pred)
14,9652	99,67%	99,60%	48374,6	99,52%

Na Figura 124 é apresentado os principais resultados da regressão linear individual, sendo Y o toque e X a variável preditora rotação. De acordo com a regressão linear 98% dos resultados podem ser explicados pela rotação.

Figura 124 - Regressão linear para o torque



Fonte: Autoria própria

PRESSÃO ESPECÍFICA DE CORTE

Nas Tabelas 14 e 15 são apresentados respectivamente os resultados das análises de variância para os laminados sem e com adição de nanotubo de carbono. Nota-se que para os laminados sem CNT o fator broca é significativo, já para o com CNT não, porém a contribuição em ambos os materiais é a mesma, próximo de 0%.

Os fatores que tiveram contribuição significativa para o resultado final foram a rotação e o avanço, sendo que juntos seus valores são de 92,67% para os sem CNT e de 93,13% para os com CNT. Com relação as interações, somente a rotação*avanço tem uma contribuição significativa no resultado final, sendo ela de aproximadamente 7%.

Tabela 14- Análise de variância para a pressão específica de corte, para os laminados sem CNT

Fator	DF	Seq SS	Contribuição	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Broca	1	646165	0,00%	646165	646165	4,85	0,029
Suporte	1	1865754	0,01%	1865754	1865754	14	0,000
Rotação	2	1,22E+09	8,96%	1223921898	611960949	4592,79	0,000
Avanço	4	1,14E+10	83,71%	11432899136	2858224784	21451,08	0,000
Broca*Suporte	1	3713101	0,03%	3713101	3713101	27,87	0,000
Broca*Rotação	2	19939	0,00%	19939	9970	0,07	0,928
Broca*Avanço	4	1034291	0,01%	1034291	258573	1,94	0,107
Suporte*Rotação	2	350479	0,00%	350479	175239	1,32	0,272
Suporte*Avanço	4	2516519	0,02%	2516519	629130	4,72	0,001
Rotação*Avanço	8	9,7E+08	7,1%	970312024	121289003	910,28	0,000
Erro	150	19986576	0,15%	19986576	133244		
Teste de ajuste	30	6894975	0,05%	6894975	229833	2,11	0,002
Erro puro	120	13091601	0,1%	13091601	109097		
Total	179	1,37E+10	100%				

Resumo do Modelo

S	R ²	R ² (adj)	PRESS	R ² (pred)
365.026	99,85%	99,83%	28780669	99,79%

Tabela 15- Análise de variância para a pressão específica de corte, para os laminados com CNT

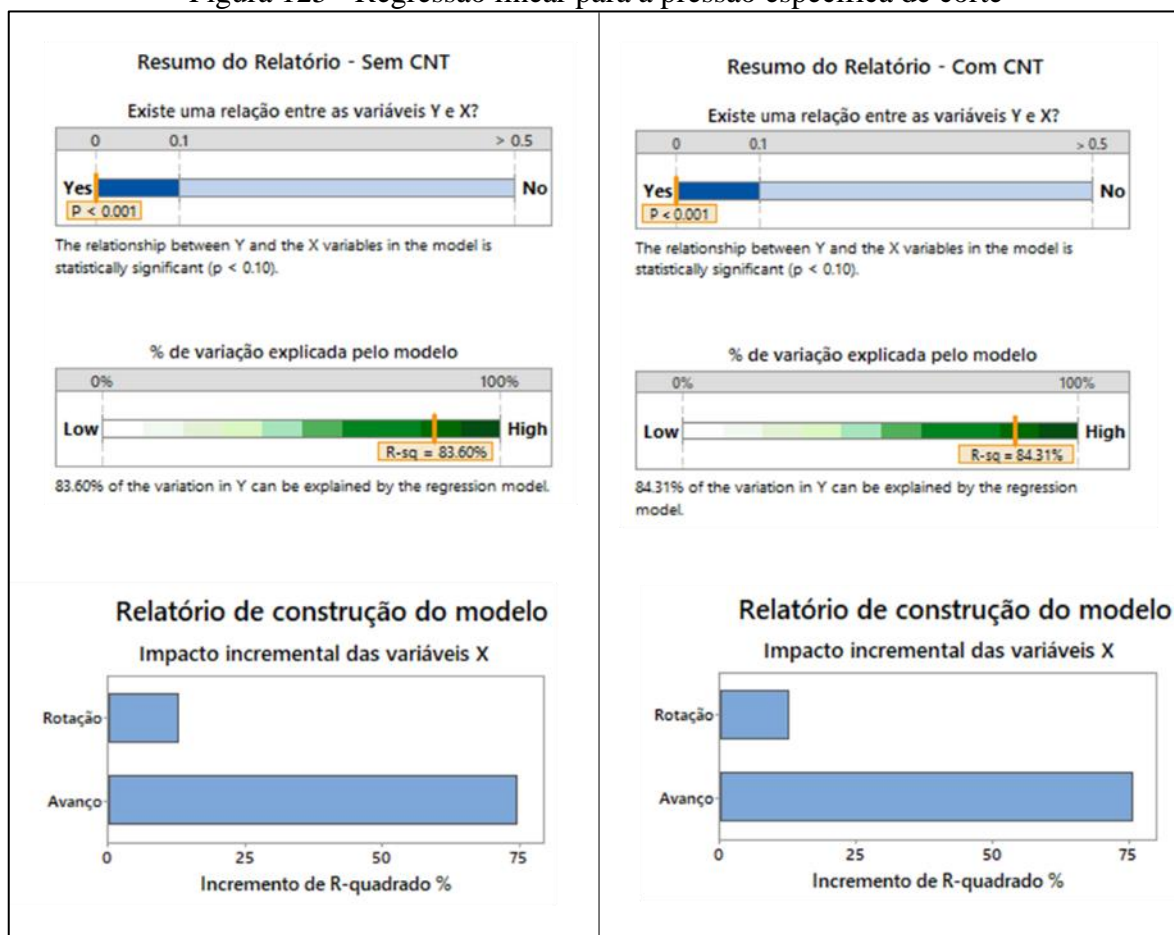
Fator	DF	Seq SS	Contribuição	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Broca	1	54757	0,00%	54757	54757	1,3	0,256
Suporte	1	352221	0,00%	352221	352221	8,37	0,004
Rotação	2	1,14E+09	8,8%	1136412349	568206174	13502,53	0,000
Avanço	4	1,09E+10	84,33%	10885277483	2721319371	64667,89	0,000
Broca*Suporte	1	242320	0,00%	242320	242320	5,76	0,018
Broca*Rotação	2	190701	0,00%	190701	95351	2,27	0,107
Broca*Avanço	4	8914	0,00%	8914	2229	0,05	0,995
Suporte*Rotação	2	286382	0,00%	286382	143191	3,4	0,036
Suporte*Avanço	4	633473	0,00%	633473	158368	3,76	0,006
Rotação*Avanço	8	8,79E+08	6,81%	878894291	109861786	2610,69	0,000
Erro	150	6312219	0,05%	6312219	42081		
Teste de ajuste	30	1719993	0,01%	1719993	57333	1,5	0,066
Erro puro	120	4592227	0,04%	4592227	38269		
Total	179	1,29E+10	100%				

Resumo do Modelo

S	R ²	R ² (adj)	PRESS	R ² (pred)
205.138	99,95%	99,94%	9089596	99,93%

Na Figura 125 é apresentado os principais resultados da regressão linear múltipla, sendo Y o Ks e X as variáveis rotação e avanço. De acordo com a regressão linear para os laminados sem CNT 83,6% do resultado pode ser explicado pelas variáveis rotação e avanço e no caso dos com adição de CNT esse valor é de 84,31%

Figura 125 - Regressão linear para a pressão específica de corte



Fonte: Autoria própria

FORÇA DE CORTE

Nas Tabelas 16 e 17 são apresentados os resultados na análise de variância dos laminados com e sem adição de nanotubo de carbono, respectivamente. Verifica-se que todos os fatores foram significantes, assim como quase todas as interações. Entretanto os fatores broca e rotação juntos contribuem com 96,57% para o resultado obtido. Além disso, a interação entre esses dois fatores é a única que contribui com mais de 1%.

Tabela 16- Análise de variância para a força de corte, para os laminados sem CNT

Fator	DF	Seq SS	Contribuição	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Broca	1	654967	18,08%	654967	654967	6483,67	0,000
Suporte	1	3682	0,1%	3682	3682	36,45	0,000
Rotação	2	2843303	78,49%	2843303	1421652	14073,27	0,000
Avanço	4	24175	0,67%	24,175	6,044	59,83	0,000
Broca*Suporte	1	6862	0,19%	6862	6,862	67,93	0,000
Broca*Rotação	2	62796	1,73%	62796	31398	310,82	0,000
Broca*Avanço	4	2188	0,06%	2188	547	5,41	0,000
Suporte*Rotação	2	559	0,02%	559	279	2,76	0,066
Suporte*Avanço	4	2212	0,06%	2212	553	5,47	0,000
Rotação*Avanço	8	6699	0,18%	6699	837	8,29	0,000
Erro	150	15153	0,42%	15,153	101		
Teste de ajuste	30	5559	0,15%	5,559	185	2,32	0,001
Erro puro	120	9594	0,26%	9,594	80		
Total	179	3622595	100%				

Resumo do Modelo

S	R ²	R ² (adj)	PRESS	R ² (pred)
10,0508	99,58%	99,50%	21819,9	99,40%

Tabela 17- Análise de variância do torque, para os laminados com CNT

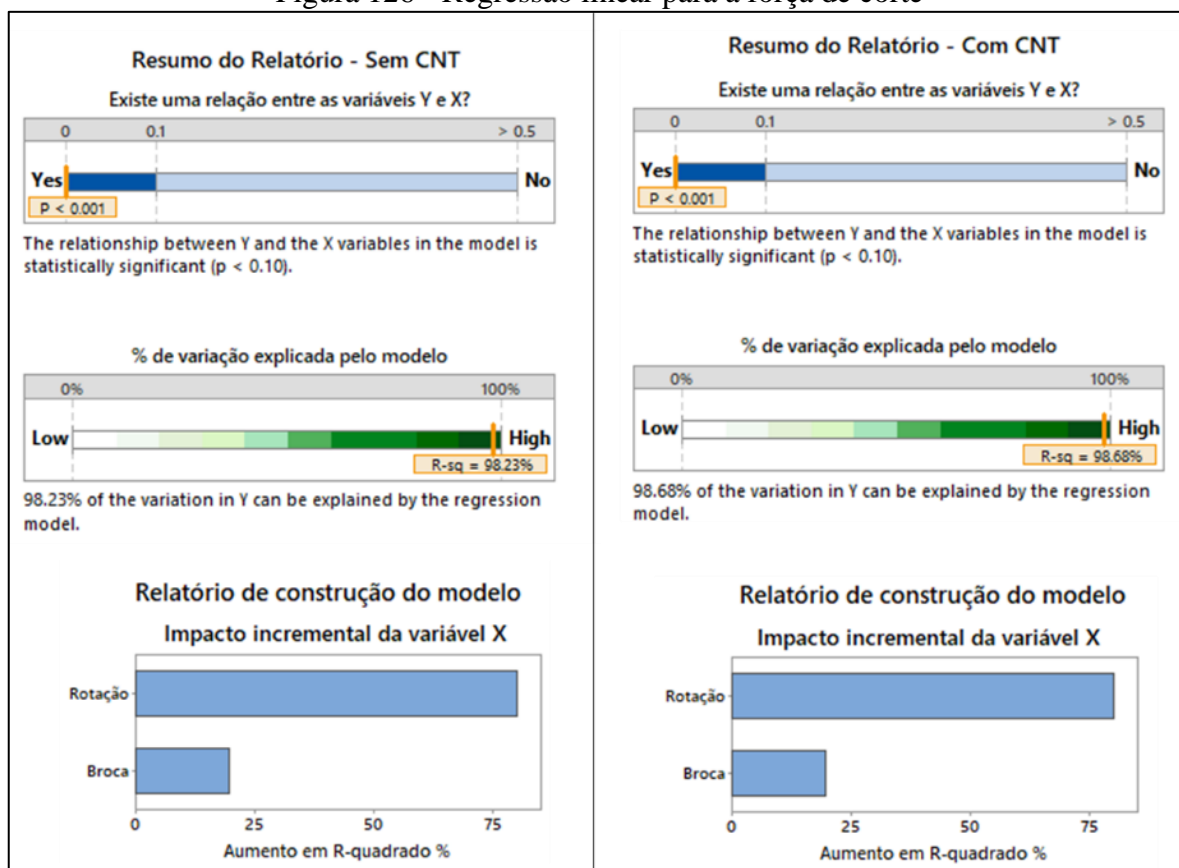
Fator	DF	Seq SS	Contribuição	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Broca	1	614395	18,44%	614395	614395	9516,21	0,000
Suporte	1	543	0,02%	543	543	8,42	0,004
Rotação	2	2628881	78,89%	2628881	1314440	20359,05	0,000
Avanço	4	28975	0,87%	28,975	7,244	112,2	0,000
Broca*Suporte	1	283	0,01%	283	283	4,38	0,038
Broca*Rotação	2	45826	1,38%	45826	22913	354,89	0,000
Broca*Avanço	4	6	0,00%	6	2	0,02	0,999
Suporte*Rotação	2	878	0,03%	878	439	6,8	0,001
Suporte*Avanço	4	367	0,01%	367	92	1,42	0,23
Rotação*Avanço	8	2582	0,08%	2582	323	5	0,000
Erro	150	9684	0,29%	9,684	65		
Teste de ajuste	30	3545	0,11%	3,545	118	2,31	0,001
Erro puro	120	6139	0,18%	6,139	51		
Total	179	3332421	100%				

Resumo do Modelo

S	R ²	R ² (adj)	PRESS	R ² (pred)
8,03511	99,71%	99,61%	13945,6	99,58%

Na Figura 126 é apresentado os principais resultados da regressão linear individual, sendo Y o toque e X a variável rotação. De acordo com a regressão linear 98% dos resultados podem ser explicados pela variável rotação

Figura 126 - Regressão linear para a força de corte



Fonte: Autoria própria

FORÇA DE AVANÇO

Nas Tabelas 18 e 19 são apresentados os resultados das análises de variância dos laminados sem e com adição de nanotubo de carbono, respectivamente. Nota-se que para os laminados com CNT o fator rotação é significativo, já para o sem CNT não, porém sua contribuição é de 0,4%.

Os fatores que tiveram maior contribuição foram broca e avanço, sendo que juntos seus valores são de 90,13% para os sem CNT e de 91,43% para os com CNT. Com relação as interações, somente a broca*avanço teve uma contribuição significativa no resultado final, sendo ela de aproximadamente 7,3% para os laminados em CNT e de 4,4% para os com CNT.

Tabela 18- Análise de variância para a força de avanço, para os laminados sem CNT

Fator	DF	Seq SS	Contribuição	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Broca	1	10193,4	16,07%	10193,4	10193,4	494,26	0,000
Rotação	2	62,2	0,1%	62,2	31,1	1,51	0,228
Avanço	4	46983,2	74,06%	46983,2	11745,8	569,53	0,000
Broca*Rotação	2	91,5	0,14%	91,5	45,7	2,22	0,117
Broca*Avanço	4	4643,9	7,32%	4643,9	1161	56,29	0,000
Rotação*Avanço	8	62,8	0,1%	62,8	7,8	0,38	0,927
Erro	68	1402,4	2,21%	1402,4	20,6		
Teste de ajuste	8	100,4	0,16%	100,4	12,5	0,58	0,792
Erro puro	60	1302	2,05%	1302	21,7		
Total	89	63439,4	100%				

Resumo do Modelo

S	R ²	R ² (adj)	PRESS	R ² (pred)
4,54133	97,79%	97,11%	2456,64	96,13%

Tabela 19- Análise de variância para a força de avanço, para os laminados com CNT

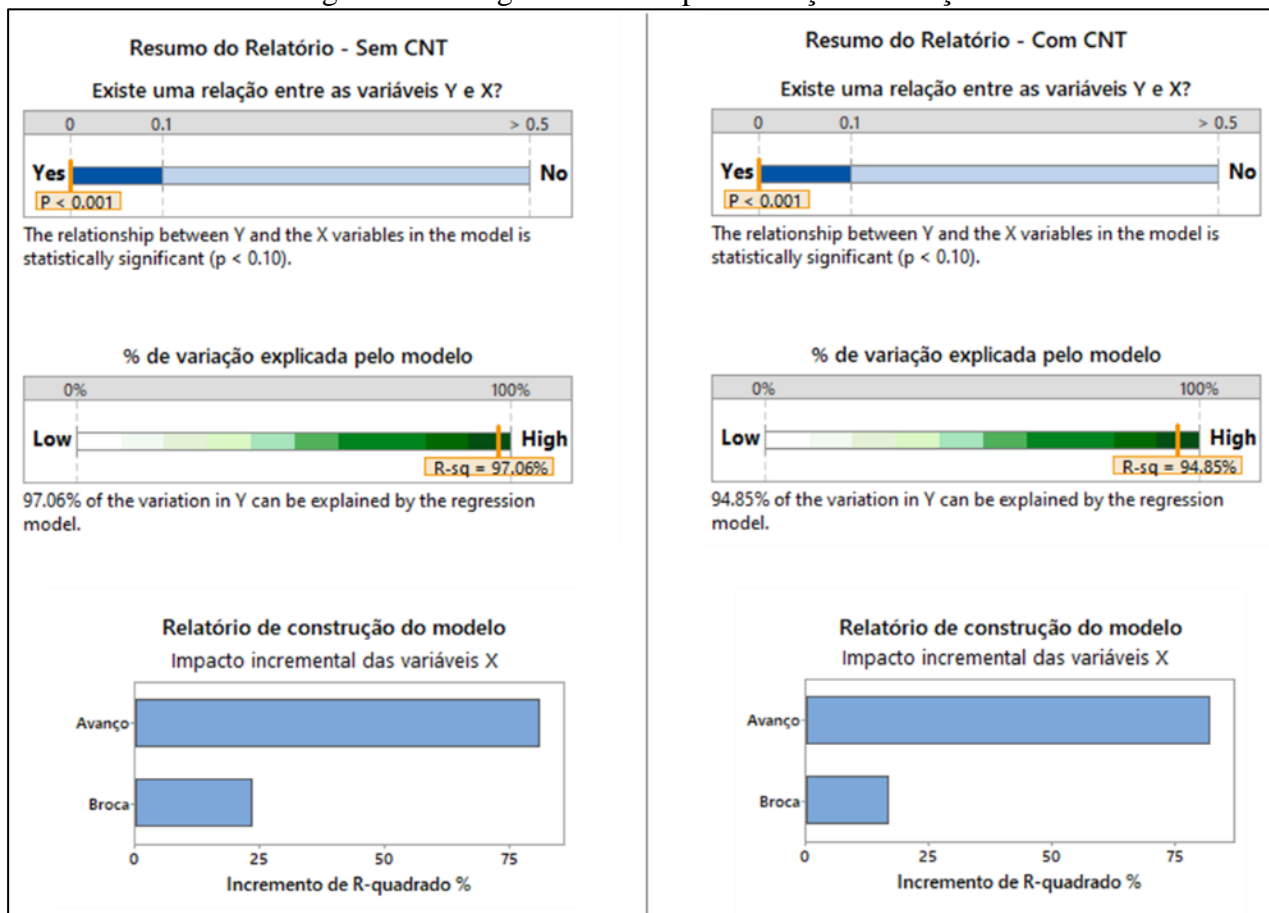
Fator	DF	Seq SS	Contribuição	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Broca	1	8890,3	12,79%	8890,3	8890,3	281,17	0,000
Rotação	2	280,6	0,4%	280,6	140,3	4,44	0,015
Avanço	4	54662,1	78,64%	54662,1	13665,5	432,19	0,000
Broca*Rotação	2	153,3	0,22%	153,3	76,7	2,42	0,096
Broca*Avanço	4	3062,1	4,41%	3062,1	765,5	24,21	0,000
Rotação*Avanço	8	310,8	0,45%	310,8	38,8	1,23	0,296
Erro	68	2150,1	3,09%	2150,1	31,6		
Teste de ajuste	8	261,5	0,38%	261,5	32,7	1,04	0,418
Erro puro	60	1888,6	2,72%	1888,6	31,5		
Total	89	69509,2	100%				

Resumo do Modelo

S	R ²	R ² (adj)	PRESS	R ² (pred)
5,62309	96,91%	95,95%	3766,39	94,58%

Na Figura 127 é apresentado os principais resultados da regressão linear múltipla, sendo Y a força de avanço e X as variáveis rotação e avanço. De acordo com a regressão linear para os laminados sem CNT 97,06% do resultado pode ser explicado pelas variáveis rotação e avanço e no caso dos com adição de CNT esse valor é de 94,85%.

Figura 127 - Regressão linear para a força de avanço



Fonte: Autoria própria

VIBRAÇÃO DO SISTEMA

Nas Tabelas 19 e 20 são apresentados os resultados das análises de variância para ambos os materiais de estudo. Consta-se que dos fatores principais o suporte é o fator de maior influência, para ambos os materiais, sendo que sua contribuição é mais de 99%.

Tabela 20- Análise de variância para vibração do sistema, para os laminados sem CNT

Fator	DF	Seq SS	Contribuição	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Broca	1	0,01	0,00%	0,01	0,01	0,23	0,634
Suporte	1	1901,49	99,64%	1901,49	1901,49	51530,30	0,000
Rotação	2	0,07	0,00%	0,07	0,04	0,99	0,374
Avanço	4	0,27	0,01%	0,27	0,07	1,86	0,120
Broca*Suporte	1	0,00	0,00%	0,00	0,00	0,00	0,979
Broca*Rotação	2	0,15	0,01%	0,15	0,08	2,06	0,131
Broca*Avanço	4	0,14	0,01%	0,14	0,04	0,98	0,423
Suporte*Rotação	2	0,04	0,00%	0,04	0,02	0,60	0,552
Suporte*Avanço	4	0,36	0,02%	0,36	0,09	2,42	0,051
Rotação*Avanço	8	0,28	0,01%	0,28	0,04	0,96	0,468
Erro	150	5,54	0,29%	5,54	0,04		
Teste de ajuste	30	0,99	0,05%	0,99	0,03	0,87	0,665
Erro puro	120	4,55	0,24%	4,55	0,04		
Total	179	1908,37	100,00%				

Resumo do Modelo

S	R ²	R ² (adj)	PRESS	R ² (pred)
0.192095	99,71%	99,65%	7.97050	99,58%

Tabela 21- Análise de variância para vibração do sistema, para os laminados com CNT

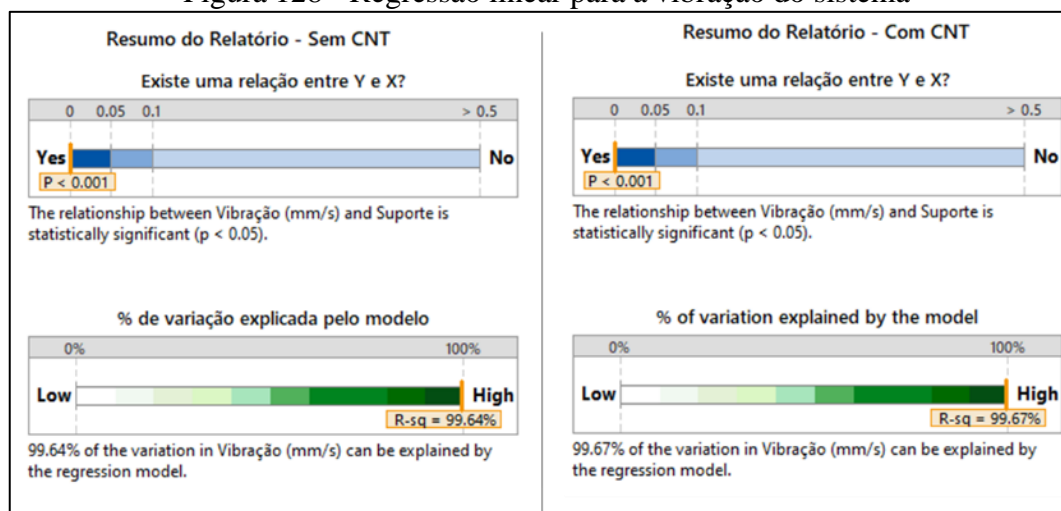
Fator	DF	Seq SS	Contribuição	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Broca	1	0,01	0,00%	0,01	0,01	0,36	0,548
Suporte	1	1835,02	99,67%	1835,02	1835,02	53091,24	0,000
Rotação	2	0,13	0,01%	0,13	0,07	1,95	0,146
Avanço	4	0,09	0,00%	0,09	0,02	0,62	0,647
Broca*Suporte	1	0,00	0,00%	0,00	0,00	0,08	0,779
Broca*Rotação	2	0,08	0,00%	0,08	0,04	1,23	0,296
Broca*Avanço	4	0,23	0,01%	0,23	0,06	1,65	0,165
Suporte*Rotação	2	0,02	0,00%	0,02	0,01	0,35	0,704
Suporte*Avanço	4	0,04	0,00%	0,04	0,01	0,27	0,897
Rotação*Avanço	8	0,26	0,01%	0,26	0,03	0,95	0,481
Erro	150	5,18	0,28%	5,18	0,03		
Teste de ajuste	30	0,93	0,05%	0,93	0,03	0,88	0,648
Erro puro	120	4,25	0,23%	4,25	0,04		
Total	179	1841,08	100%				

Resumo do Modelo

S	R ²	R ² (adj)	PRESS	R ² (pred)
0.185913	99,72%	99,66%	7.46573	99,59%

Na Figura 128 é apresentado os principais resultados da regressão linear múltipla, sendo Y a vibração e X a variável avanço. De acordo com a regressão linear para os resultados obtidos para a vibração, podem ser explicados pela variável preditora suporte.

Figura 128 - Regressão linear para a vibração do sistema



Fonte: Autoria própria

EMISSÃO SONORA

Nas Tabelas 21 e 22 são apresentados os resultados das análises de variância dos laminados sem e com adição de CNT. Verifica-se que basicamente todos os fatores e as interações foram significativas, para ambos os materiais. Entretanto nota-se que há uma grande diferença entre a porcentagem de contribuição de cada fator. Além disso, o ajuste do modelo para os laminados com CNT foi melhor que para os sem CNT.

O fator broca foi o de maior contribuição, entretanto para os laminados sem CNT representou ~36% e para o com CNT 27,5%. Já a rotação apresentou uma contribuição de 18,4% e 26,5%, para os laminados sem e com CNT respectivamente. Com relação as interações, a que se destaca é a broca*avanço, a qual apresentou uma contribuição de 7% para os sem CNT e de 23,5% para os com CNT.

Tabela 22- Análise de variância para a emissão sonora, para os laminados sem CNT

Fator	DF	Seq SS	Contribuição	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Broca	1	1280,7	35,91%	1280,7	1280,67	95,66	0,000
Rotação	2	655,7	18,39%	655,7	327,83	24,49	0,000
Avanço	4	156,9	4,4%	156,9	39,23	2,93	0,027
Broca*Rotação	2	206,4	5,79%	206,4	103,2	7,71	0,001
Broca*Avanço	4	247,1	6,93%	247,1	61,78	4,61	0,002
Rotação*Avanço	8	109,1	3,06%	109,1	13,63	1,02	0,431
Erro	68	910,3	25,53%	910,3	13,39		
Teste de ajuste	8	185,7	5,21%	185,7	23,21	1,92	0,073
Erro puro	60	724,6	20,32%	724,6	12,08		
Total	89	3566,2	100%				

Resumo do Modelo

S	R ²	R ² (adj)	PRESS	R ² (pred)
3.65889	74,47%	66,59%	1594,69	55,28%

Tabela 23- Análise de variância para a emissão sonora, para os laminados com CNT

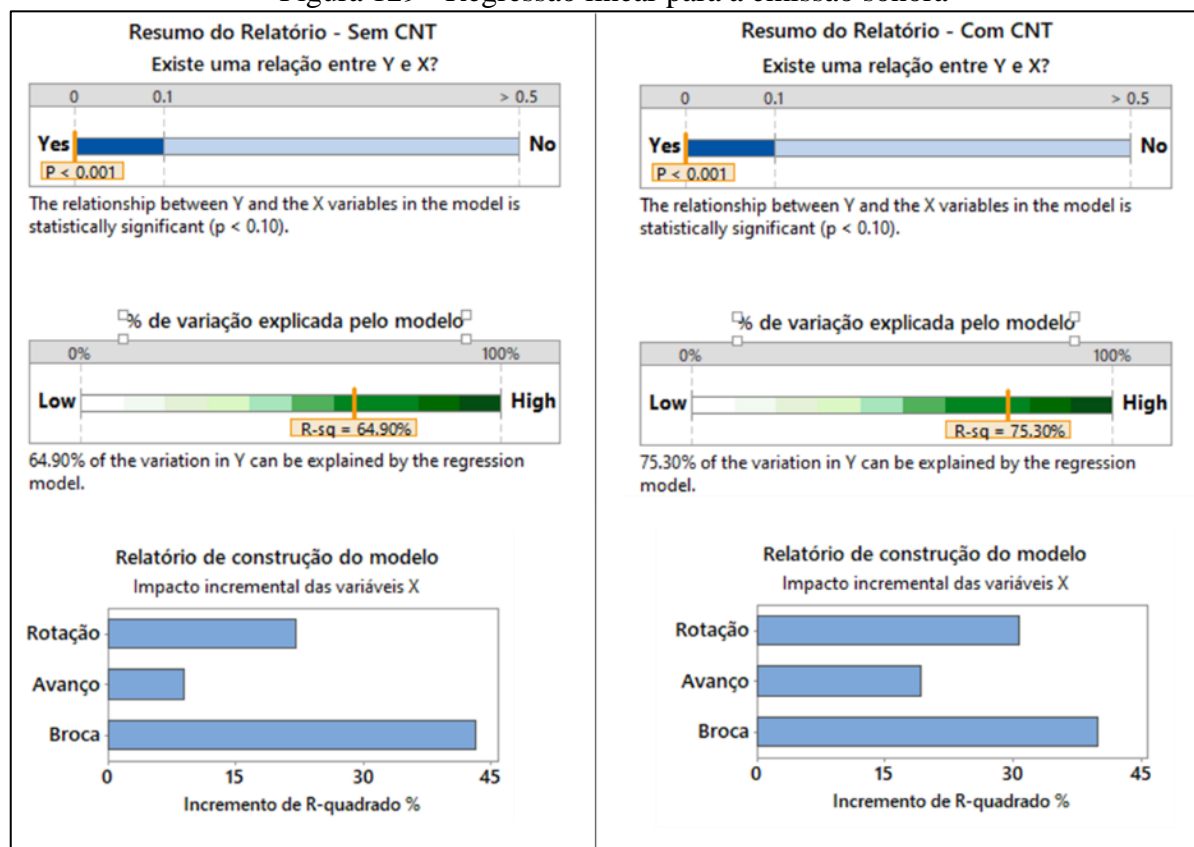
Fator	DF	Seq SS	Contribuição	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Broca	1	804,01	27,55%	804,01	804,011	268,26	0,000
Rotação	2	772,83	26,49%	772,83	386,416	128,93	0,000
Avanço	4	283,15	9,7%	283,15	70,789	23,62	0,000
Broca*Rotação	2	77,9	2,67%	77,9	38,951	13	0,000
Broca*Avanço	4	684,85	23,47%	684,85	171,212	57,13	0,000
Rotação*Avanço	8	91,39	3,13%	91,39	11,423	3,81	0,001
Erro	68	203,8	6,98%	203,8	2,997		
Teste de ajuste	8	95,64	3,28%	95,64	11,955	6,63	0,000
Erro puro	60	108,17	3,71%	108,17	1,803		
Total	89	2917,94	100%				

Resumo do Modelo

S	R ²	R ² (adj)	PRESS	R ² (pred)
1,73121	93,02%	90,86%	357,008	87,77%

Na Figura 129 é apresentado os principais resultados da regressão linear múltipla, sendo Y a emissão sonora e X as variáveis rotação, broca e avanço. De acordo com a regressão linear as variáveis predictoras estudadas explica melhor o resultado para o material com adição de nanotubo que para o sem.

Figura 129 - Regressão linear para a emissão sonora



Fonte: Autoria própria

FATOR DELAMINAÇÃO

➤ Entrada

Nas Tabelas 24 e 25 são apresentados os resultados das análises de variância dos laminados sem e com adição de nanotubo de carbono. Observa-se que os materiais se comportaram de forma diferente, visto que o único fator/interação significativa em comum é o avanço, o qual contribuiu com aproximadamente 25%.

Com relação aos laminados sem CNT, verifica-se que o suporte é outro fator principal que tem influência, assim como, a sua interação com o avanço. Já para os com CNT, nota-se que algumas interações foram significativas, sendo elas a rotação*avanço, broca*avanço e broca*suporte, que juntas contribuem com 15,4%.

Tabela 24- Análise de variância para o fator delaminação - entrada, para os laminados sem CNT

Fator	DF	Seq SS	Contribuição	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Broca	1	0,00713	0,25%	0,00713	0,007132	0,62	0,434
Suporte	1	0,1022	3,53%	0,1022	0,102197	8,83	0,003
Rotação	2	0,03101	1,07%	0,03101	0,015503	1,34	0,265
Avanço	4	0,71434	24,67%	0,71434	0,178585	15,44	0,000
Broca*Suporte	1	0,0115	0,40%	0,0115	0,011504	0,99	0,32
Broca*Rotação	2	0,00437	0,15%	0,00437	0,002183	0,19	0,828
Broca*Avanço	4	0,06251	2,16%	0,06251	0,015626	1,35	0,254
Suporte*Rotação	2	0,00561	0,19%	0,00561	0,002803	0,24	0,785
Suporte*Avanço	4	0,13661	4,72%	0,13661	0,034152	2,95	0,022
Rotação*Avanço	8	0,08487	2,93%	0,08487	0,010609	0,92	0,504
Erro	150	1,73515	59,93%	1,73515	0,011568		
Teste de ajuste	30	0,40211	13,89%	0,40211	0,013404	1,21	0,236
Erro puro	120	1,33304	46,04%	1,33304	0,011109		
Total	179	1841,08	100%				

Resumo do Modelo

S	R ²	R ² (adj)	PRESS	R ² (pred)
0,107553	40,07%	28,48%	2,49861	13,70%

Tabela 25- Análise de variância para o fator delaminação - entrada, para os laminados com CNT

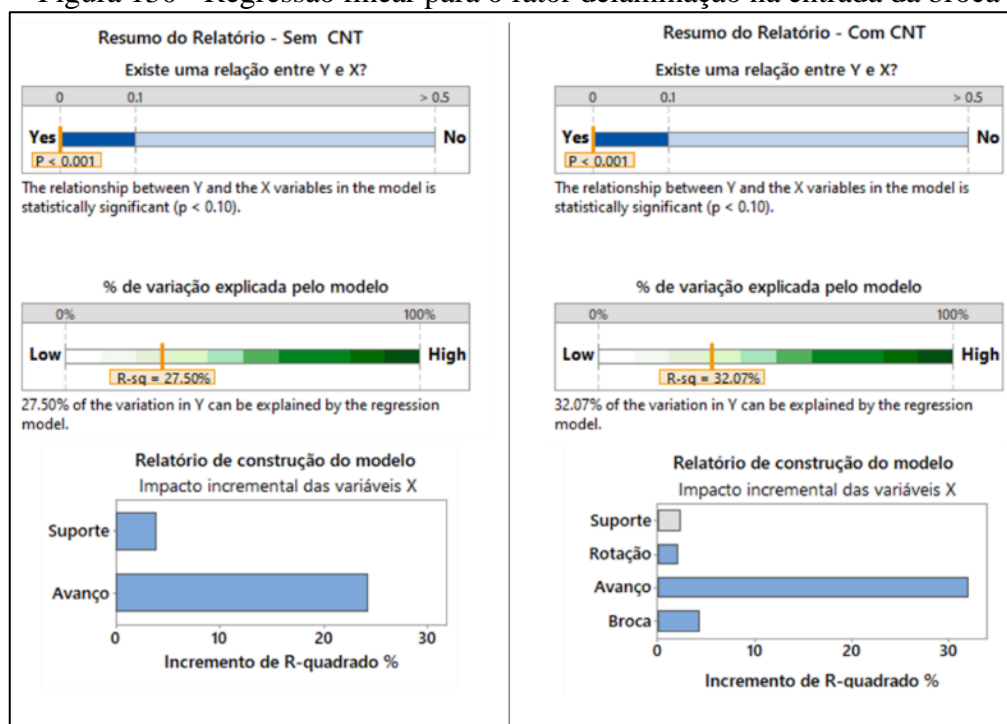
Fator	DF	Seq SS	Contribuição	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Broca	1	0,00274	0,05%	0,00274	0,002738	0,15	0,698
Suporte	1	0,00021	0%	0,00021	0,000209	0,01	0,914
Rotação	2	0,00638	0,13%	0,00638	0,00319	0,18	0,838
Avanço	4	144,765	28,77%	144,765	0,361913	20,03	0,000
Broca*Suporte	1	0,10716	2,13%	0,10716	0,107165	5,93	0,016
Broca*Rotação	2	0,0115	0,23%	0,0115	0,005751	0,32	0,728
Broca*Avanço	4	0,19766	3,93%	0,19766	0,049415	2,73	0,031
Suporte*Rotação	2	0,00481	0,1%	0,00481	0,002406	0,13	0,875
Suporte*Avanço	4	0,07341	1,46%	0,07341	0,018353	1,02	0,401
Rotação*Avanço	8	0,47007	9,34%	0,47007	0,058759	3,25	0,002
Erro	150	271,055	53,86%	271,055	0,01807		
Teste de ajuste	30	0,59715	11,87%	0,59715	0,019905	1,13	0,314
Erro puro	120	21,134	42,00%	21,134	0,017612		
Total	179	503,215	100%				

Resumo do Modelo

S	R ²	R ² (adj)	PRESS	R ² (pred)
0,134426	46,14%	35,72%	3,90319	22,43%

Na Figura 130 é apresentado os principais resultados da regressão linear múltipla, sendo Y a fator delaminação e X as variáveis rotação, broca, suporte e avanço. De acordo com a regressão linear observa-se que as variáveis estudadas, apesar de terem relação com o fator delaminação, não explicam muito bem os resultados obtidos. Dentre as variáveis predictoras o avanço é o mais influente no incremento do R².

Figura 130 - Regressão linear para o fator delaminação na entrada da broca



Fonte: Autoria própria

➤ Saída

Nas Tabelas 26 e 27 são apresentados os resultados das análises de variância dos laminados para os materiais estudados. Verifica-se que o único fator/interação em comum entre os materiais é o tipo de suporte empregado, sendo que o mesmo teve maior contribuição no laminado com CNT.

Para material sem adição de CNT, observa-se que além do tipo de suporte, o avanço empregado também foi significativo, assim como, as interações broca*avanço e rotação*avanço. Já os laminados com CNT, além do tipo de suporte, o tipo de broca utilizada também foi significativo, bem como as interações broca*suporte e suporte*avanço.

Entretanto, apesar se serem os melhores modelos encontrados, não conseguem explicar com precisão os resultados obtidos. O que comprova a dificuldade de se estudar a qualidade dos furos em materiais compósitos.

Tabela 26- Análise de variância para o fator delaminação - saída, para os laminados sem CNT

Fator	DF	Seq SS	Contribuição	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Broca	1	0,00104	0,03%	0,00104	0,001042	0,08	0,771
Suporte	1	0,45391	15,22%	0,45391	0,453908	36,99	0,000
Rotação	2	0,03514	1,18%	0,03514	0,01757	1,43	0,242
Avanço	4	0,21363	7,16%	0,21363	0,053408	4,35	0,002
Broca*Suporte	1	0,00199	0,07%	0,00199	0,001993	0,16	0,687
Broca*Rotação	2	0,00643	0,22%	0,00643	0,003216	0,26	0,770
Broca*Avanço	4	0,14762	4,95%	0,14762	0,036905	3,01	0,020
Suporte*Rotação	2	0,00926	0,31%	0,00926	0,004628	0,38	0,686
Suporte*Avanço	4	0,05911	1,98%	0,05911	0,014778	1,2	0,311
Rotação*Avanço	8	0,21445	7,19%	0,21445	0,026807	2,18	0,032
Erro	150	184,061	61,7%	184,061	0,012271		
Teste de ajuste	30	0,39043	13,09%	0,39043	0,013014	1,08	0,376
Erro puro	120	145,018	48,61%	145,018	0,012085		
Total	179	29,832	100%				

Resumo do Modelo

S	R ²	R ² (adj)	PRESS	R ² (pred)
0,110773	38,30%	26,37%	2,65048	11,15%

Tabela 27- Análise de variância para o fator delaminação - saída, para os laminados com CNT

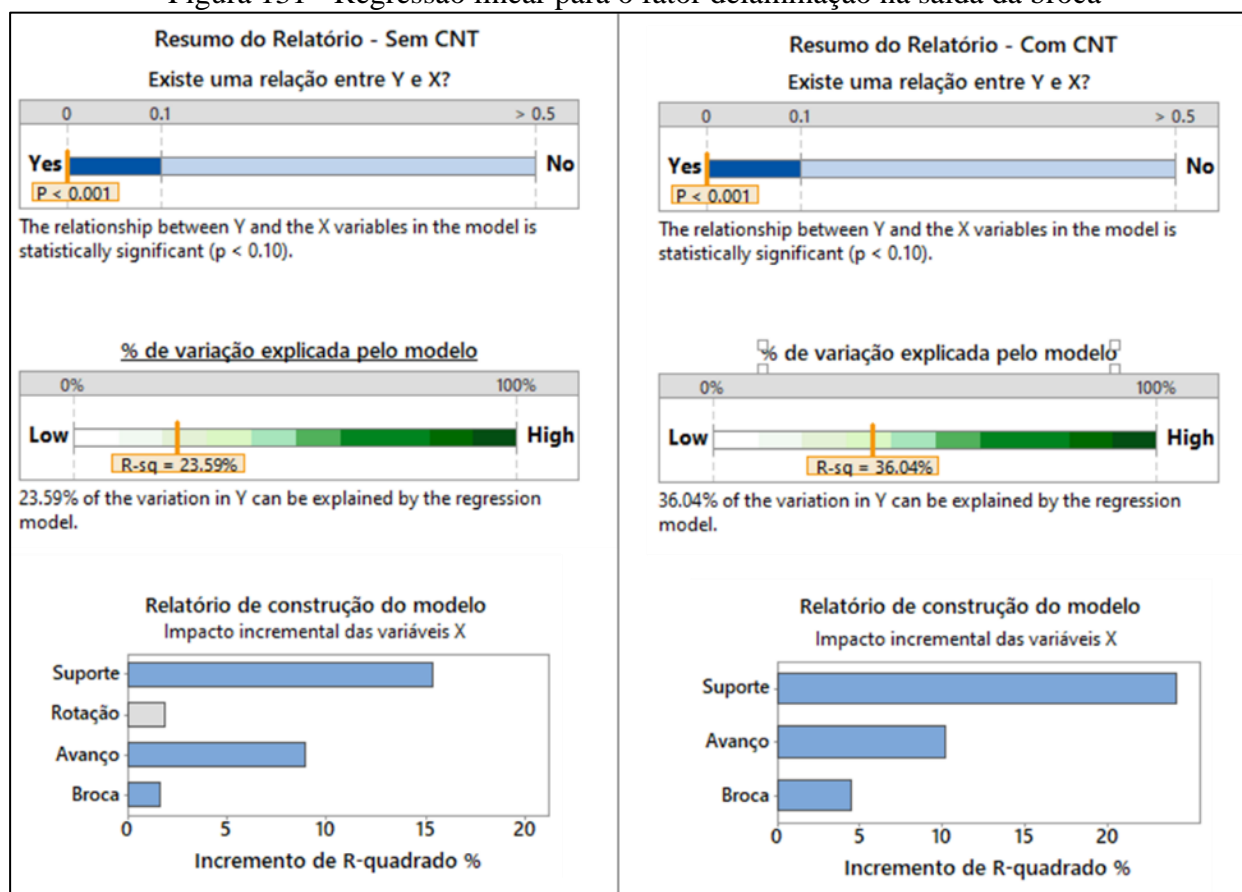
Fator	DF	Seq SS	Contribuição	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Broca	1	0,02355	1,79%	0,023553	0,023553	5,38	0,022
Suporte	1	0,42954	32,73%	0,429538	0,429538	98,19	0,000
Rotação	2	0,00513	0,39%	0,005125	0,002563	0,59	0,558
Avanço	4	0,02995	2,28%	0,029948	0,007487	1,71	0,15
Broca*Suporte	1	0,0509	3,88%	0,050904	0,050904	11,64	0,001
Broca*Rotação	2	0,00155	0,12%	0,001552	0,000776	0,18	0,838
Broca*Avanço	4	0,02104	1,6%	0,021044	0,005261	1,2	0,312
Suporte*Rotação	2	0,00646	0,49%	0,006456	0,003228	0,74	0,48
Suporte*Avanço	4	0,04052	3,09%	0,040519	0,01013	2,32	0,06
Rotação*Avanço	8	0,04749	3,62%	0,047493	0,005937	1,36	0,22
Erro	150	0,65617	50%	0,656166	0,004374		
Teste de ajuste	30	0,15289	11,65%	0,15289	0,005096	1,22	0,229
Erro puro	120	0,50328	38,35%	0,503275	0,004194		
Total	179	1,3123	100%				

Resumo do Modelo

S	R ²	R ² (adj)	PRESS	R ² (pred)
0.0661395	50%	40,33%	0.944878	28%

Na Figura 131 é apresentado os principais resultados da regressão linear múltipla, sendo Y o fator delaminação e X as variáveis rotação, broca, suporte e avanço. Assim como para o fator delaminação na entrada, as variáveis estudadas, apesar de terem relação com o fator delaminação, não explicam muito bem os resultados obtidos. Sendo que das variáveis estudadas o tipo de suporte é o mais influente no incremento do R².

Figura 131 - Regressão linear para o fator delaminação na saída da broca



Fonte: Autoria própria

ERRO DE DIMENSÃO

➤ Entrada

Nas Tabelas 28 e 29 são apresentados os resultados das análises de variância para laminados sem e com adição de nanotubo de carbono, respectivamente. Observa-se dos fatores principais o único que foi significativo para ambos os materiais foi o avanço. Além disso, nota-se uma grande diferença no comportamento dos dois materiais, visto os fatores e as interações que influenciam em cada um deles, bem como pelo ajuste do modelo.

Tabela 28- Análise de variância para o diâmetro na entrada, para os laminados sem CNT

Fator	DF	Seq SS	Contribuição	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Broca	1	0,000341	0,14%	0,000341	0,000341	0,4	0,526
Suporte	1	0,000233	0,1%	0,000233	0,000233	0,28	0,60
Rotação	2	0,002934	1,2%	0,002934	0,001467	1,74	0,18
Avanço	4	0,059283	24,26%	0,059283	0,014821	17,54	0,00
Broca*Suporte	1	0,020348	8,33%	0,020348	0,020348	24,09	0,00
Broca*Rotação	2	0,002724	1,11%	0,002724	0,001362	1,61	0,203
Broca*Avanço	4	0,020008	8,19%	0,020008	0,005002	5,92	0,000
Suporte*Rotação	2	0,000339	0,14%	0,000339	0,000169	0,2	0,819
Suporte*Avanço	4	0,005962	2,44%	0,005962	0,001491	1,76	0,139
Rotação*Avanço	8	0,005443	2,23%	0,005443	0,00068	0,81	0,599
Erro	150	0,126719	51,86%	0,126719	0,000845		
Teste de ajuste	30	0,027237	11,15%	0,027237	0,000908	1,1	0,354
Erro puro	120	0,099482	40,72%	0,099482	0,000829		
Total	179	0,244332	100%				

Resumo do Modelo

S	R ²	R ² (adj)	PRESS	R ² (pred)
0,0290653	48,18%	38,11%	0,182475	25,32%

Tabela 29- Análise de variância para o diâmetro na entrada, para os laminados com CNT

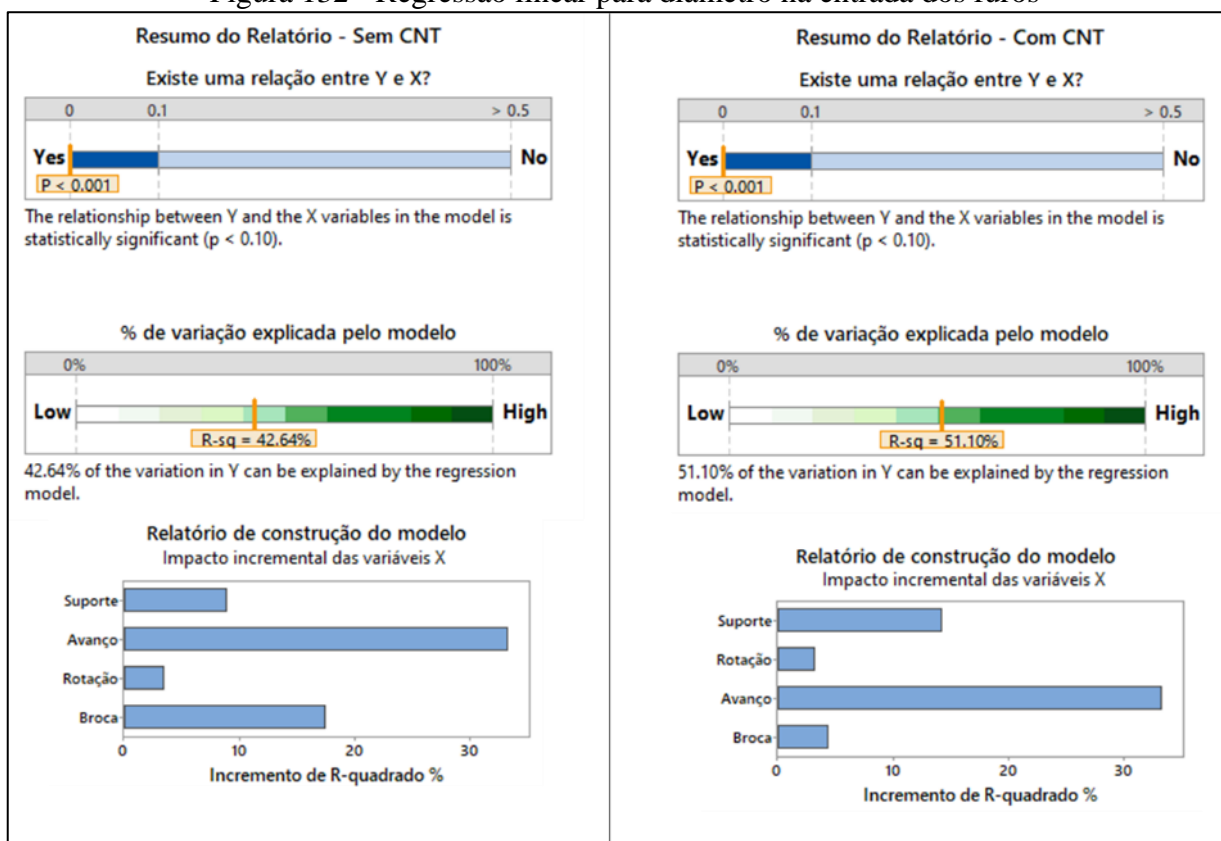
Fator	DF	Seq SS	Contribuição	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Broca	1	0,007006	2,38%	0,007006	0,007006	8,25	0,005
Suporte	1	0,038749	13,16%	0,038749	0,038749	45,65	0,000
Rotação	2	0,006806	2,31%	0,006806	0,003403	4,01	0,02
Avanço	4	0,093262	31,68%	0,093262	0,023315	27,47	0,000
Broca*Suporte	1	0,000095	0,03%	0,000095	0,000095	0,11	0,738
Broca*Rotação	2	0,002885	0,98%	0,002885	0,001443	1,7	0,186
Broca*Avanço	4	0,004992	1,7%	0,004992	0,001248	1,47	0,214
Suporte*Rotação	2	0,002286	0,78%	0,002286	0,001143	1,35	0,263
Suporte*Avanço	4	0,005938	2,02%	0,005938	0,001485	1,75	0,142
Rotação*Avanço	8	0,005065	1,72%	0,005065	0,000633	0,75	0,651
Erro	150	0,127318	43,25%	0,127318	0,000849		
Teste de ajuste	30	0,028081	9,54%	0,028081	0,000936	1,13	0,312
Erro puro	120	0,099237	33,71%	0,099237	0,000827		
Total	179	0,294403	100%				

Resumo do Modelo

S	R ²	R ² (adj)	PRESS	R ² (pred)
0,0291339	56,75%	48,39%	0,183338	37,73%

Na Figura 132 é apresentado os principais resultados da regressão linear múltipla, sendo Y o diâmetro e X as variáveis broca, suporte, rotação e avanço. De acordo com a regressão linear observa-se que as variáveis estudadas o avanço é o mais influente no incremento do R².

Figura 132 - Regressão linear para diâmetro na entrada dos furos



Fonte: Autoria própria

➤ Saída

Nas Tabelas 30 e 31 são apresentados os resultados das análises de variância para os laminados. Observa-se que em ambos os materiais os fatores principais em comum foram os mesmos, sendo eles broca, suporte e avanço. Além disso, nota-se que nenhuma interação se mostrou significativa

Tabela 30- Análise de variância para o diâmetro na saída, para os laminados sem CNT

Fator	DF	Seq SS	Contribuição	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Broca	1	0,08359	7,33%	0,083592	0,083592	16,77	0,000
Suporte	1	0,06647	5,83%	0,06647	0,06647	13,33	0,000
Rotação	2	0,02281	2,00%	0,022808	0,011404	2,29	0,105
Avanço	4	0,07021	6,16%	0,070212	0,017553	3,52	0,009
Broca*Suporte	1	0,00987	0,87%	0,009872	0,009872	1,98	0,161
Broca*Rotação	2	0,00411	0,36%	0,004114	0,002057	0,41	0,663
Broca*Avanço	4	0,04313	3,78%	0,04313	0,010783	2,16	0,076
Suporte*Rotação	2	0,00395	0,35%	0,003948	0,001974	0,4	0,674
Suporte*Avanço	4	0,02866	2,51%	0,028661	0,007165	1,44	0,224
Rotação*Avanço	8	0,05931	5,20%	0,059312	0,007414	1,49	0,166
Erro	150	0,74781	65,6%	0,747814	0,004985		
Teste de ajuste	30	0,26665	23,39%	0,266652	0,008888	2,22	0,001
Erro puro	120	0,48116	42,21%	0,481162	0,00401		
Total	179	113,993	100%				

Resumo do Modelo

S	R ²	R ² (adj)	PRESS	R ² (pred)
0,0706075	36,40%	24,72%	1.07685	5,53%

Tabela 31- Análise de variância para o diâmetro na saída, para os laminados com CNT

Fator	DF	Seq SS	Contribuição	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Broca	1	0,019615	2,99%	0,019615	0,019615	6,29	0,013
Suporte	1	0,041072	6,26%	0,041072	0,041072	13,17	0,000
Rotação	2	0,004555	0,69%	0,004555	0,002277	0,73	0,484
Avanço	4	0,03052	4,65%	0,03052	0,00763	2,45	0,049
Broca*Suporte	1	0,000832	0,13%	0,000832	0,000832	0,27	0,606
Broca*Rotação	2	0,011442	1,74%	0,011442	0,005721	1,83	0,163
Broca*Avanço	4	0,002427	0,37%	0,002427	0,000607	0,19	0,941
Suporte*Rotação	2	0,018211	2,78%	0,018211	0,009105	2,92	0,057
Suporte*Avanço	4	0,025411	3,87%	0,025411	0,006353	2,04	0,092
Rotação*Avanço	8	0,03426	5,22%	0,03426	0,004283	1,37	0,213
Erro	150	0,467824	71,3%	0,467824	0,003119		
Teste de ajuste	30	0,073518	11,2%	0,073518	0,002451	0,75	0,822
Erro puro	120	0,394307	60,09%	0,394307	0,003286		
Total	179	0,656169	100%				

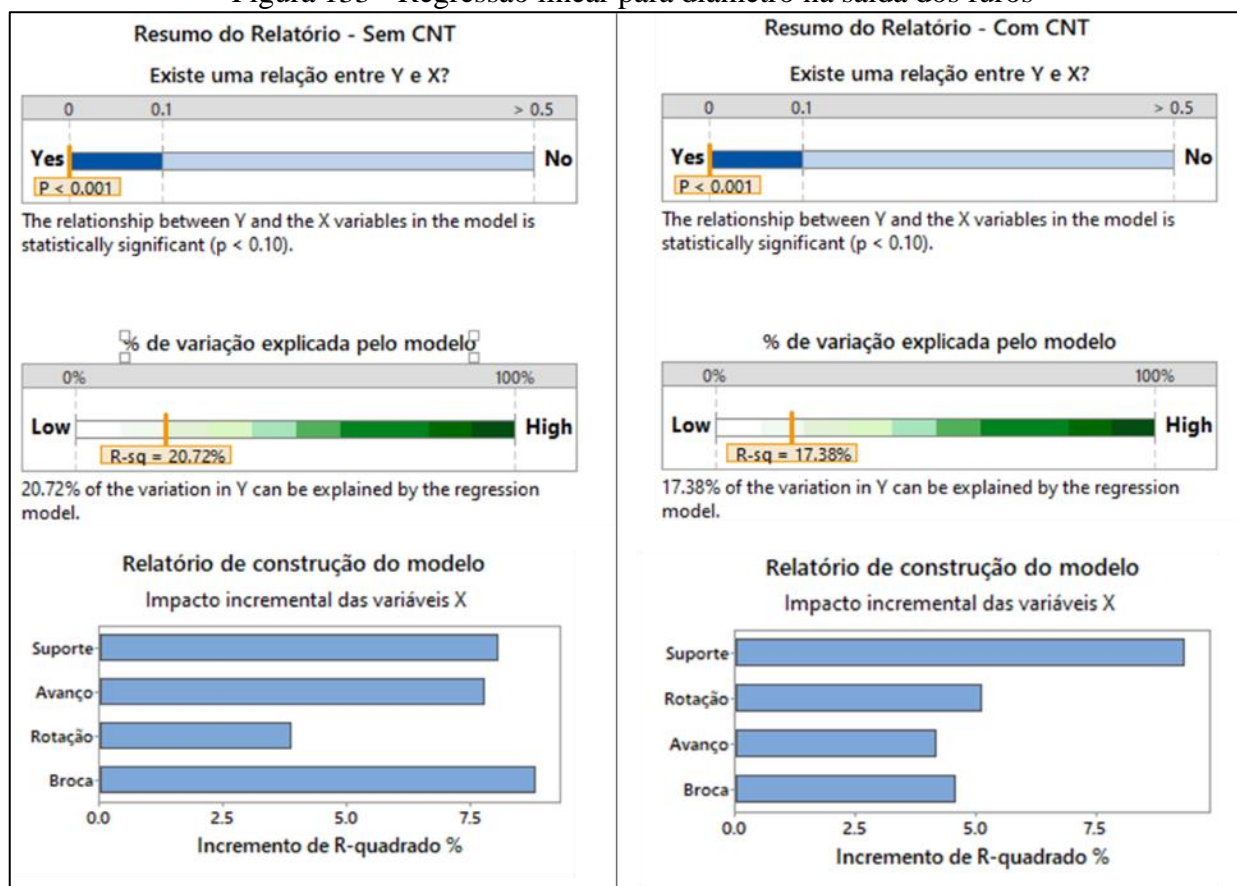
Resumo do Modelo

S	R ²	R ² (adj)	PRESS	R ² (pred)
0,0558465	28,7%	14,92%	0,673667	0,00%

Na Figura 133 é apresentado os principais resultados da regressão linear múltipla, sendo Y o diâmetro e X as variáveis broca, suporte, rotação e avanço. De acordo com a regressão linear

observa-se que as variáveis estudadas, apesar de terem relação com o diâmetro, não explicam muito bem os resultados obtidos. Além disso, nota-se um comportamento diferente entre os materiais.

Figura 133 - Regressão linear para diâmetro na saída dos furos



Fonte: Autoria própria

CIRCULARIDADE

Nas Tabelas 32 e 33 são apresentados os resultados das análises de variância dos laminados sem e com adição de nanotubo de carbono, respectivamente. Verifica-se que o tipo de suporte é o fator de maior contribuição, para ambos os materiais. Porém nota-se uma variação no comportamento dos materiais.

Tabela 32- Análise de variância para a circularidade, para os laminados sem CNT

Fator	DF	Seq SS	Contribuição	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Broca	1	0,00863	0,47%	0,00863	0,00863	2,68	0,103
Suporte	1	118,098	64,06%	118,098	118,098	367,49	0,00
Rotação	2	0,00287	0,16%	0,00287	0,00144	0,45	0,64
Avanço	4	0,04732	2,57%	0,04732	0,01183	3,68	0,007
Broca*Suporte	1	0,01494	0,81%	0,01494	0,01494	4,65	0,033
Broca*Rotação	2	0,00128	0,07%	0,00128	0,00064	0,2	0,82
Broca*Avanço	4	0,03486	1,89%	0,03486	0,00871	2,71	0,032
Suporte*Rotação	2	0,00308	0,17%	0,00308	0,00154	0,48	0,62
Suporte*Avanço	4	0,03077	1,67%	0,03077	0,00769	2,39	0,053
Rotação*Avanço	8	0,0369	2,00%	0,0369	0,00461	1,44	0,186
Erro	150	0,48205	26,15%	0,48205	0,00321		
Teste de ajuste	30	0,10465	5,68%	0,10465	0,00349	1,11	0,338
Erro puro	120	0,3774	20,47%	0,3774	0,00315		
Total	179	184,367	100%				

Resumo do Modelo

S	R ²	R ² (adj)	PRESS	R ² (pred)
0,0566893	73,85%	68,80%	0,694155	62,35%

Tabela 33- Análise de variância para a circularidade, para os laminados com CNT

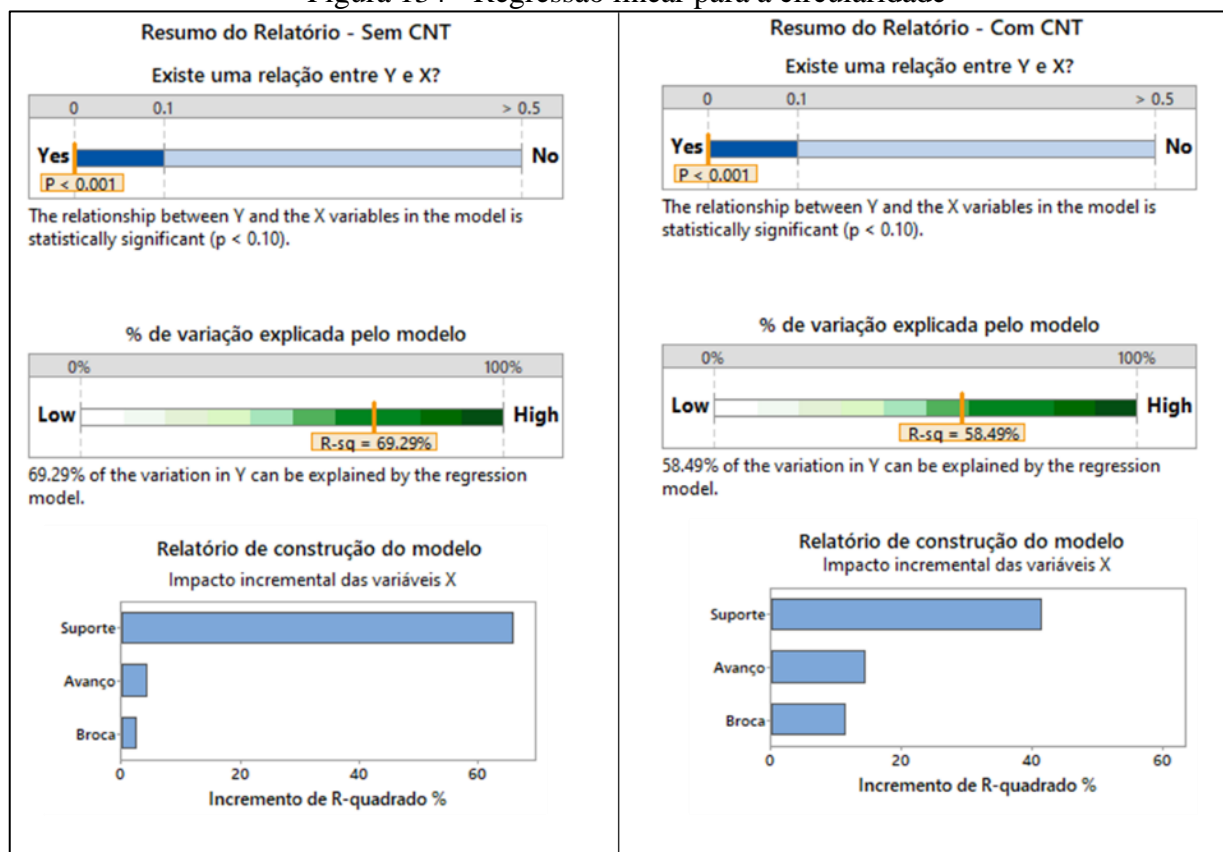
Fator	DF	Seq SS	Contribuição	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Broca	1	0,033511	5,54%	0,033511	0,033511	23,34	0,000
Suporte	1	0,20402	33,73%	0,20402	0,20402	142,13	0,000
Rotação	2	0,001472	0,24%	0,001472	0,000736	0,51	0,600
Avanço	4	0,077974	12,89%	0,077974	0,019493	13,58	0,000
Broca*Suporte	1	0,032805	5,42%	0,032805	0,032805	22,85	0,000
Broca*Rotação	2	0,001464	0,24%	0,001464	0,000732	0,51	0,602
Broca*Avanço	4	0,002924	0,48%	0,002924	0,000731	0,51	0,729
Suporte*Rotação	2	0,003994	0,66%	0,003994	0,001997	1,39	0,252
Suporte*Avanço	4	0,016631	2,75%	0,016631	0,004158	2,9	0,024
Rotação*Avanço	8	0,014673	2,43%	0,014673	0,001834	1,28	0,259
Erro	150	0,215324	35,6%	0,215324	0,001435		
Teste de ajuste	30	0,037612	6,22%	0,037612	0,001254	0,85	0,694
Erro puro	120	0,177713	29,38%	0,177713	0,001481		
Total	179	0,604791	100%				

Resumo do Modelo

S	R ²	R ² (adj)	PRESS	R ² (pred)
0,0378879	64,40%	57,51%	0,310067	48,73%

Na Figura 134 apresentado os principais resultados da regressão linear múltipla, sendo Y a circularidade X as variáveis broca, avanço e suporte. De acordo com a regressão linear verifica-se que há uma diferença de comportamento entre os materiais, devido a porcentagem de influência no incremento do R², sendo o tipo de suporte o mais significativo.

Figura 134 - Regressão linear para a circularidade



Fonte: Autoria própria