

**UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ**

**ALESSANDRO ELLENBERGER**

**FURAÇÃO EM COMPÓSITO DE FIBRAS DO CAULE DA BANANEIRA E  
POLIURETANO DERIVADO DO ÓLEO DE MAMONA**

**CURITIBA**

**2022**

**ALESSANDRO ELLENBERGER**

**FURAÇÃO EM COMPÓSITO DE FIBRAS DO CAULE DA BANANEIRA E  
POLIURETANO DERIVADO DO ÓLEO DE MAMONA**

**Drilling of banana stem fibers and polyurethane derived from castor oil  
composite**

Tese apresentada como requisito para obtenção do título de Doutor em Engenharia do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica e de Materiais da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).

Área de concentração: Engenharia de Manufatura

Orientador: Prof. Dr. Milton Luiz Polli.

Coorientadora: Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup> Elaine Cristina de Oliveira.

**CURITIBA**

**2022**



[4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

Esta licença permite compartilhamento, remixe, adaptação e criação a partir do trabalho, mesmo para fins comerciais, desde que sejam atribuídos créditos ao(s) autor(es). Conteúdos elaborados por terceiros, citados e referenciados nesta obra não são cobertos pela licença.



ALESSANDRO ELLENBERGER

**FURAÇÃO EM COMPÓSITO DE FIBRAS DO CAULE DA BANANEIRA E POLIURETANO DERIVADO DO ÓLEO DE MAMONA**

Trabalho de pesquisa de doutorado apresentado como requisito para obtenção do título de Doutor Em Engenharia da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR). Área de concentração: Engenharia De Manufatura.

Data de aprovação: 21 de Setembro de 2022

Dr. Milton Luiz Polli, Doutorado - Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Dr. Lucas Freitas Berti, Doutorado - Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Dr. Marcio Pereira Da Rocha, Doutorado - Universidade Federal do Paraná (Ufpr)

Dr. Paulo Andre De Camargo Beltrao, Doutorado - Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Dr. Rolf Bertrand Schroeter, Doutorado - Universidade Federal de Santa Catarina (Ufsc)

Documento gerado pelo Sistema Acadêmico da UTFPR a partir dos dados da Ata de Defesa em 31/10/2022.

Dedico este trabalho à minha esposa Silvia Ines e ao meu filho Vicente, a quem compartilho os conhecimentos obtidos em todos os desafios.

## **AGRADECIMENTOS**

Primeiramente aos professores Milton Luiz Polli e Elaine Cristina de Azevedo, por todas as orientações, confiança na minha proposta e disponibilidade durante todo o desenvolvimento deste trabalho.

A todos os alunos e professores do PPGEM – UTFPR, em especial aos professores Milton Borsato, Ugo Leandro Belini e Neri Volpato, e aos professores do PPGTE-UTFPR, em especial aos professores Silvestre Labiak Jr., Dario Eduardo Amaral Dergint e Eloy Fassi Casagrande Júnior, pelos conhecimentos e contribuições proporcionados.

Aos professores do DADIN-UTFPR, em especial aos professores Alexandre Pelegrine e Cristiane Maria Ogg Nascimento Gonçalves Costa, pelos conhecimentos compartilhados durante o estágio docência.

Um especial agradecimento à doutoranda do PPGEM Caroline Rodrigues Pereira de Paula, pela fundamental ajuda com a fabricação e caracterização dos compósitos.

Ao Laboratório de Polímeros e Compósitos – LAPOC, da UTFPR.

A Embrapa Florestas, em especial ao professor Washington Luiz Esteves Magalhães, por disponibilizar os laboratórios e equipamentos para fabricação dos compósitos.

Ao Centro Multiusuário de Caracterização de Materiais – CMCM da UTFPR-CT e ao técnico Alexandre José Gonçalves, pelo MEV.

Ao Departamento Acadêmico de Desenho Industrial - DADIN UTFPR, pela disponibilização da fresadora CNC e do laboratório de modelos para realização das pesquisas.

Ao Laboratório de Usinagem da UTFPR, em especial ao doutorando Adriano Perpétuo de Lara e ao Doutor Carlos Eduardo Costa, pela contribuição na utilização dos equipamentos de medições de forças na usinagem e pela parceria durante a pesquisa.

Ao Instituto Carlos Chagas/Fiocruz Paraná - Plataforma de Microscopia Confocal e Eletrônica, em especial as técnicas Anny Kulig e Bruna Hilzendeger Marcon pelo processo de metalização das amostras para o MEV.

Ao Laboratório de Física da UTFPR, em especial ao técnico Ricardo Ricetti, pela disponibilização das balanças digitais.

Ao Laboratório Multiusuário de Materiais da UTFPR – Guarapuava, em especial ao professor Aldo Przybysz e ao técnico de laboratório Lucas Franco Wrege, pelo auxílio com os testes de flexão nos materiais.

A minha mãe Luci, meu pai Roberto (in memoriam), meu irmão Thiago, minha avó Veronica (in memoriam) e a meus tios Rosana e Ciro, sempre incentivadores pelos meus caminhos da educação e auxílio em meus desafios.

A Capes, CNPq e Fundação Araucária, pelo auxílio financeiro aos laboratórios envolvidos.

A todos que de alguma forma contribuíram e incentivaram durante a realização deste trabalho.

“A ciência permanecerá sempre a satisfação do desejo mais alto da nossa natureza, a curiosidade; fornecerá sempre ao homem o único meio que ele possui de melhorar a própria sorte.”

(Ernest Renan)

## RESUMO

Compósitos com fibras naturais obtidos a partir dos resíduos de processos agrícolas surgem como alternativa aos materiais de fontes não renováveis. A combinação das fibras de bananeira e poliuretano derivado do óleo de mamona origina um compósito biodegradável, de fontes renováveis e com boas propriedades físico-mecânicas. A furação em compósitos com fibras naturais é considerada um desafio devido à estrutura não homogênea do material e ao comportamento das fibras e da matriz polimérica. Este trabalho investigou o processo de furação em compósitos com fibras do caule da bananeira e poliuretano derivado do óleo de mamona desenvolvidos a partir de processos mecanizados e manuais, utilizando diferentes modelos de broca e parâmetros de corte. Foram avaliados a qualidade dos furos, medidas as forças envolvidas na usinagem, observadas as condições das brocas após o processo, tipos de cavacos gerados e um pós-processamento foi proposto. Os resultados mostraram que a broca helicoidal com velocidade de corte de 19 m/min e avanço de 0,1 mm foi a mais adequada para a furação no compósito com fibras mecanicamente trituradas. Para o compósito com fibras cortadas manualmente a broca modelo três pontas utilizando velocidade de corte de 38 m/min e avanço de 0,1 mm foi a mais adequada. O modelo da broca com o movimento de entrada e saída no material, o comportamento das fibras da bananeira e o avanço mostraram influenciar a geração de avarias na furação destes compósitos.

**Palavras-chave:** compósitos; fibras naturais; fontes renováveis; qualidade de furação



## ABSTRACT

Natural fibers composites obtained from agricultural waste processes appear as an alternative to materials from non-renewable sources. The combination of banana fibers and polyurethane derived from castor oil originates a biodegradable composite, from renewable sources and with good physical-mechanical properties. Drilling of composites with natural fibers is challenging due to the non-homogeneous structure of the material and the behavior of the fibers and polymer matrix. This work investigated the drilling process in composites with banana stem fibers and polyurethane derived from castor oil developed from mechanized and manual processes, using different drill models and cutting parameters. The quality of the holes were evaluated, the forces involved in the machining were measured, the conditions of the drills after the process were observed, the types of chips generated and a post-processing was proposed. The results showed that the twist drill with a cutting speed of 19 m/min and a feed of 0.1 mm was the most suitable for drilling in the composite with mechanically process. For the composite with manually cut fibers, the three-point drill using a cutting speed of 38 m/min and a feed of 0.1 mm was the most suitable. The drill model with the movement of entry and exit in the material, the behavior of the banana fibers and feed rate showed to influence the generation of damages in the drilling of these composites.

**Keywords:** composites; natural fibers; renewable sources; drilling quality

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Classificação dos compósitos poliméricos em relação à fase reforço.....	19
Figura 2 - Grupo uretano formado na reação do isocianato e álcool.....	20
Figura 3 - Reação de obtenção do pré-polímero de uretano.....	21
Figura 4 - Molécula da triglicéride do ácido ricinoleico.....	21
Figura 5 - Estrutura básica de uma fibra vegetal.....	25
Figura 6 - Principais partes da bananeira.....	27
Figura 7 - Corte do pseudocaule e aparência das bainhas foliares.....	28
Figura 8 - Exemplos de produtos obtidos a partir de fibras do caule da bananeira: (a) embalagens, (b) tecidos, (c) papéis e (d) vestuário.....	29
Figura 9 - Exemplos de aplicações de compósitos com fibras vegetais (CFV): (a) peças decorativas, estruturais e de mobiliário em fibras de cana de açúcar; (b) caixa para computadores portáteis em fibras de cânhamo; (c) peças internas de automóveis em fibras de sisal, juta e linho.....	30
Figura 10 - Mesa fabricada com fibras de bananeira e resina epóxi.....	34
Figura 11 - Capa de caderno com fibras de bananeira (a); revestimento com fibras de bananeira (b); exemplo de utilização do revestimento em mobiliário (c).....	34
Figura 12 - Micrografia de MEV dos compósitos com fibras de bananeira e matriz de borracha natural: (a) fibras não tratadas e (b) fibras tratadas.....	36
Figura 13 - Modelos de brocas utilizadas na furação de CFV: (a) helicoidal; (b) escalonada; (c) três pontas ( <i>brad point</i> ); (d) formão ( <i>dagger</i> ); (e) multifacetadas; (f) trepanação.....	41
Figura 14 - Geometria de uma broca do tipo helicoidal.....	42
Figura 15 – Tipos especiais de afiações de ponta em brocas helicoidais.....	43
Figura 16 - Defeitos relacionados a furação dos CFV.....	44
Figura 17 - Delaminação na furação de compósitos: (a) entrada ( <i>pell-up</i> ); (b) saída ( <i>push-down</i> ).....	45
Figura 18 - Mecanismo do corte das fibras nos CFV: (a) cisalhamento ideal; (b) cisalhamento real das fibras; (c) cisalhamento real das fibras mostrando a quebra das interfaces.....	46
Figura 19 - Esquema de avaliação do fator de delaminação.....	46
Figura 20 - Operação de processamento da imagem para determinar a área danificada: (a) imagem digital; (b) processamento inicial; (c) imagem final.....	47
Figura 21 - Métodos utilizados na literatura para cálculo do fator de delaminação...	48
Figura 22 - Forças envolvidas no processo de furação.....	52
Figura 23 - Forças envolvidas na furação de compósitos com fibras vegetais: (a) força de avanço em relação à velocidade de avanço com 1400 rpm; (b) torque em relação à velocidade de avanço com 710 rpm; (c) força de avanço em relação à rotação com avanço de 22,4 mm/min; (d) torque em relação à rotação com avanço de 22,4 mm/min.....	54

Figura 24 - Variação de temperatura nos diferentes estágios do processo de furação em um compósito com fibras vegetais utilizando diferentes modelos de brocas.....	56
Figura 25 – Cavacos gerados na furação de compósito com fibras vegetais: (a-c) matriz polipropileno/sisal; (d-e) matriz epóxi/sisal .....	57
Figura 26 - Compósito com fibras de bananeira e poliéster: (a) medição da zona de delaminação e (b) aparência da superfície do compósito .....	59
Figura 27 - Imagem escaneada de um furo para detecção da área delaminada .....	60
Figura 28 - Detalhe de fibras não cortadas na furação de compósito com fibras de bananeira .....	61
Figura 29 - Etapas da retirada das fibras do pseudocaulo da bananeira: (a) corte do pseudocaulo; (b) retirada e corte das bainhas; (c) retirada da renda; (d) secagem.....	64
Figura 30 – Painel do compósito com fibras cortadas manualmente .....	66
Figura 31 – Painel do compósito com fibras trituradas mecanicamente .....	67
Figura 32 – Sistema de fixação da plataforma piezométrica e dos compósitos para realização das furações.....	69
Figura 33 - Fresadora CNC 3 eixos utilizada.....	70
Figura 34 – Modelos das brocas utilizadas: (a) helicoidal; (b) três pontas; (c) formão .....	71
Figura 35 – Processo de medição das avarias nos furos: (a) microscopia do furo; (b) imagem do furo tratada no software com a detecção das avarias; (c) imagem da área avariada em relação à área nominal do furo após tratamento no software .....	72
Figura 36 – Exemplo dos valores das avarias ( $F_a$ ) medidos na furação de entrada do compósito com fibras mecanicamente trituradas com a broca três pontas ( $v_c = 19$ m/min; $f = 100$ mm/min).....	73
Figura 37 - Equipamentos para medição das forças durante a furação: (a) plataforma piezométrica; (b) amplificador de carga multicanal; (c) placa de aquisição dos dados; (d) computador com software de análise dos dados.....	74
Figura 38 - Micrografia de MEV da fibra de bananeira: (a) cortada manualmente; (b) triturada mecanicamente .....	79
Figura 39 – Micrografia de MEV do compósito com fibras cortadas manualmente após furação.....	80
Figura 40 – Micrografia de MEV da superfície do compósito com fibras mecanicamente trituradas após furação.....	81
Figura 41 – Parâmetros de furação e aparência na entrada e saída dos furos realizados no compósito com fibras trituradas mecanicamente .....	82
Figura 42 – Avarias nos furos do compósito com fibras mecanicamente trituradas em função dos diferentes parâmetros e brocas utilizadas.....	83
Figura 43 – Variação dos valores das avarias em função das velocidades de corte e avanço com broca helicoidal no compósito de fibras trituradas mecanicamente .....	85
Figura 44 - Variação das avarias em função das velocidades de corte e avanço com broca três pontas no compósito de fibras trituradas mecanicamente.....	87

Figura 45 - Variação das avarias em função das velocidades de corte e avanço com broca formão no compósito de fibras trituradas mecanicamente .....	89
Figura 46 - Parâmetros de furação e aparência na entrada e saída dos furos realizados no compósito com fibras trituradas manualmente .....	91
Figura 47 - Avarias nos furos do compósito com fibras cortadas manualmente em função dos diferentes parâmetros e brocas utilizadas.....	92
Figura 48 - Variação das avarias em função das velocidades de corte e avanço com broca helicoidal no compósito de fibras cortadas manualmente .....	94
Figura 49 - Variação das avarias em função das velocidades de corte e avanço com broca três pontas no compósito de fibras cortadas manualmente .....	96
Figura 50 - Variação das avarias em função das velocidades de corte e avanço com broca formão no compósito de fibras cortadas manualmente .....	98
Figura 51 – Micrografia de MEV da entrada na furação no compósito com fibras mecanicamente trituradas utilizando broca helicoidal ( $v_c = 19$ m/min; $f = 0,1$ mm): (a) fibras não cortadas e dobradas; (b) fibras não completamente cortadas; (c) arrancamento de fibras .....	102
Figura 52 – Micrografia de MEV da entrada na furação no compósito com fibras cortadas manualmente com a broca helicoidal ( $v_c = 19$ m/min; $f = 0,2$ mm): (a) fibras não cortadas e arrancamento da matriz; (b) fibra não cortada e dobrada pela ação da aresta cortante da broca .....	104
Figura 53 – Micrografia de MEV da saída na furação no compósito com fibras cortadas manualmente utilizando broca helicoidal ( $v_c = 19$ m/min; $f = 0,2$ mm) .....	105
Figura 54 – Posicionamento das fibras em função da direção do movimento de corte da broca: (a) menor que $90^\circ$ ; (b) perpendicular ou $90^\circ$ ; (c) maior que $90^\circ$ ; (d) paralela ou $180^\circ$ .....	105
Figura 55 – Micrografia de MEV da entrada na furação no compósito com fibras mecanicamente trituradas utilizando broca três pontas ( $v_c = 19$ m/min; $f = 0,1$ mm): (a) corte com arrancamento da matriz; (b) arrancamento de matriz e separação fibra/matriz .....	106
Figura 56 – Micrografia de MEV da entrada na furação no compósito com fibras cortadas manualmente utilizando broca três pontas .....	107
Figura 57 – Micrografia de MEV da borda de (a) entrada e (b) saída da broca com o aspecto da parede do furo no compósito com fibras mecanicamente trituradas utilizando broca helicoidal ( $v_c = 19$ m/min; $f = 0,2$ mm).....	108
Figura 58 – Micrografia de MEV da borda de (a) entrada e (b) saída da broca com o aspecto da parede do furo no compósito com fibras manualmente trituradas utilizando broca helicoidal ( $v_c = 19$ m/min; $f = 0,2$ mm).....	110
Figura 59 – Transpasse das brocas ( $v_c = 19$ m/min e $f = 0,1$ mm): compósitos com fibras cortadas manualmente usando a broca (a) formão, (b) três pontas e (c) helicoidal; compósito com fibras trituradas mecanicamente usando a broca (d) formão, (e) três pontas e (f) helicoidal; PU sem fibras usando a broca (g) formão, (h) três pontas e (i) helicoidal .....	113
Figura 60 – Ação da entrada e saída da ferramenta no material e os tipos característicos de avarias observadas .....	115

Figura 61 – Comparação do comportamento das brocas na furação do compósito com fibras cortadas manualmente e aspecto do furo ( $v_c = 38$ m/min; $f = 0,1$ mm): (a) broca modelo três pontas; (b) broca modelo helicoidal.....	116
Figura 62 - Comparação do comportamento das brocas na furação do compósito com fibras trituradas mecanicamente e aspecto do furo ( $v_c = 38$ m/min; $f = 0,1$ mm): (a) broca modelo helicoidal; (b) broca modelo três pontas.....	118
Figura 63 – Torque medido durante a furação do compósito com fibras mecanicamente trituradas nos diferentes parâmetros utilizados.....	119
Figura 64 – Força de avanço medida durante a furação do compósito com fibras mecanicamente trituradas nos diferentes parâmetros utilizados.....	122
Figura 65 – Torque e força de avanço em função do tempo na furação do compósito com fibras trituradas mecanicamente para velocidade de corte de 19 m/min e avanço de 0,1 mm.....	123
Figura 66 - Torque medido durante a furação do compósito com fibras cortadas manualmente nos diferentes parâmetros utilizados.....	125
Figura 67 - Força de avanço medida durante a furação do compósito com fibras cortadas manualmente nos diferentes parâmetros utilizados.....	126
Figura 68 – Torque e força de avanço em função do tempo de furação no compósito com fibras cortadas manualmente para velocidade de corte de 19 m/min e avanço de 0,1 mm.....	127
Figura 69 - Relação entre avarias e forças no compósito com fibras mecanicamente trituradas.....	132
Figura 70 - Relação entre avarias e forças no compósito com fibras cortadas manualmente.....	134
Figura 71 – Aparência das brocas sem uso e após as furações nos compósitos com fibras mecanicamente trituradas e cortadas manualmente.....	136
Figura 72 – Cavacos da furação no compósito com fibras mecanicamente trituradas.....	139
Figura 73 - Cavacos da furação no compósito com fibras cortadas manualmente.....	139
Figura 74 – Aspecto dos furos realizados no compósito de fibras mecanicamente trituradas com broca três pontas ( $v_c = 57$ m/min; $f = 0,3$ mm): (a) entrada sem lixamento; (b) entrada com o lixamento; (c) saída sem o lixamento; (d) saída com o lixamento.....	141
Figura 75 - Aspecto dos furos realizados no compósito de fibras cortadas manualmente com broca formão ( $v_c = 57$ m/min; $f = 0,3$ mm): (a) entrada sem lixamento; (b) entrada com o lixamento; (c) saída sem o lixamento; (d) saída com o lixamento.....	142

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Produção de plantas com geração de biomassa nos principais países produtores .....	24
Tabela 2 - Valores e propriedades físicas das fibras vegetais e sintéticas .....	26
Tabela 3 - Valores das propriedades de compósitos com fibras de bananeira encontradas na literatura com matrizes naturais e sintéticas .....	39
Tabela 4 - Parâmetros da velocidade do fuso (rpm), velocidade de corte ( $v_c$ ), velocidade de avanço ( $v_f$ ) e avanço (f ) para a furação dos testes .....	70
Tabela 5 – Resultados das análises de densidade, inchamento, absorção de água, tensão máxima e módulo de elasticidade dos compósitos .....	76
Tabela 6 – Comparativo entre as forças mínimas e máximas de avanço e torque encontrados neste estudo com trabalhos encontrados na literatura .....	129

## LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Comparação entre aspectos técnicos e ambientais das fibras naturais e sintéticas .....	23
Quadro 2 - Especificações e resultados de pesquisas na furação dos CFV .....	50
Quadro 3 - Especificações e resultados de pesquisas na furação de compósitos com fibras de bananeira encontradas na literatura .....	61
Quadro 4 - Comparativo de valores mínimos e máximos de avarias medidos neste trabalho com valores encontrados na literatura utilizando broca modelo helicoidal .....	99
Quadro 5 - Comparativo de valores mínimos e máximos de avarias obtidos neste trabalho com valores encontrados na literatura utilizando broca modelo formão .....	100
Quadro 6 - Comparativo de valores mínimos e máximos de avarias obtidos neste trabalho com valores encontrados na literatura utilizando broca modelo três pontas.....	101

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

CFV	Compósito com fibras vegetais
CNC	Comando Numérico Computadorizado
MEV	Microscopia Eletrônica de Varredura
PU	Poliuretano
UTFPR	Universidade Tecnológica Federal do Paraná



## LISTA DE SÍMBOLOS

$\varnothing$	Diâmetro
$^{\circ}$	Ângulo
$^{\circ}\text{C}$	Graus Celcius
A	Área
d	Densidade
f	Avanço (mm)
$F_f$	Força de avanço (N)
$F_a$	Fator de avaria (%)
$F_{da}$	Fator de delaminação ajustado
$F_d$	Fator de delaminação
Gt	Gigatoneladas
ha	Hectare
kHz	Quilohertz
kN	Quilonewton
Hz	Hertz
$M_z$	Momento torçor/torque (Nm)
Mt	Megatonelada
N	Newton
Nm	Newton metro
pC/Nm	Picocoulumb / Newton metro
pC/N	Picocoulumb / Newton
$T_g$	Transição vítrea
t	Tonelada
$v_c$	Velocidade de corte (m/min)
$v_f$	Velocidade de avanço (mm/min)
$\text{W/m}^2 \text{ K}$	Coefficiente de transferência de calor

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b> .....	<b>13</b>
<b>1.1</b>	<b>Justificativa</b> .....	<b>16</b>
<b>1.2</b>	<b>Objetivos</b> .....	<b>17</b>
1.2.1	Objetivos específicos.....	17
<b>2</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....	<b>18</b>
<b>2.1</b>	<b>Compósitos</b> .....	<b>18</b>
<b>2.2</b>	<b>Poliuretano</b> .....	<b>20</b>
2.2.1	Poliuretano derivado do óleo de mamona .....	21
<b>2.3</b>	<b>Fibras naturais</b> .....	<b>22</b>
2.3.1	Fibra da bananeira .....	26
<b>2.4</b>	<b>Compósitos com fibras vegetais</b> .....	<b>30</b>
2.4.1	Compósitos com fibras de bananeira .....	33
<b>2.5</b>	<b>Usinabilidade de compósitos com fibras vegetais</b> .....	<b>39</b>
2.5.1	Furação em compósitos com fibras vegetais .....	40
2.5.2	Furação em compósitos com fibras de bananeira .....	58
<b>3</b>	<b>MATERIAIS E MÉTODOS</b> .....	<b>63</b>
<b>3.1</b>	<b>Fabricação dos compósitos</b> .....	<b>63</b>
3.1.1	Preparação das fibras da bananeira.....	64
3.1.2	PU derivado do óleo de mamona .....	65
3.1.3	Moldagem dos painéis compósitos.....	65
3.1.4	Determinação da densidade da amostra .....	67
3.1.5	Inchamento e absorção de água .....	67
3.1.6	Ensaio mecânicos.....	68
<b>3.2</b>	<b>Usinagem</b> .....	<b>68</b>
3.2.1	Preparação das amostras .....	68
3.2.2	Furações .....	69
<b>3.3</b>	<b>Medições das avarias</b> .....	<b>72</b>
<b>3.4</b>	<b>Medições das forças de usinagem</b> .....	<b>73</b>
<b>3.5</b>	<b>Aspecto das brocas após o processo de furação</b> .....	<b>74</b>
<b>3.6</b>	<b>Análise dos cavacos</b> .....	<b>75</b>
<b>4</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÕES</b> .....	<b>76</b>
<b>4.1</b>	<b>Caracterização dos materiais</b> .....	<b>76</b>

<b>4.2</b>	<b>Avaliação das avarias nos furos do compósito com fibras trituradas mecanicamente</b> .....	<b>81</b>
4.2.1	Avarias nos furos do compósito com fibras mecanicamente trituradas utilizando broca modelo helicoidal.....	84
4.2.2	Avarias nos furos do compósito com fibras mecanicamente trituradas utilizando broca modelo três pontas .....	86
4.2.3	Avarias nos furos do compósito com fibras mecanicamente trituradas utilizando broca modelo formão .....	88
<b>4.3</b>	<b>Avaliação das avarias nos furos do compósito com fibras cortadas manualmente</b> .....	<b>90</b>
4.3.1	Avarias nos furos do compósito com fibras cortadas manualmente utilizando broca modelo helicoidal.....	93
4.3.2	Avarias nos furos do compósito com fibras cortadas manualmente utilizando broca modelo três pontas .....	95
4.3.3	Avarias nos furos do compósito com fibras cortadas manualmente utilizando broca modelo formão .....	97
<b>4.4</b>	<b>Comparação de valores das avarias</b> .....	<b>99</b>
<b>4.5</b>	<b>Análise das avarias através de micrografia de MEV</b> .....	<b>102</b>
<b>4.6</b>	<b>Forças na usinagem</b> .....	<b>119</b>
4.6.1	Torque gerado na furação do compósito com fibras mecanicamente trituradas .....	119
4.6.2	Força de avanço gerada na furação do compósito com fibras mecanicamente trituradas .....	121
4.6.3	Torque gerado na furação do compósito com fibras cortadas manualmente.....	124
4.6.4	Força de avanço gerada na furação do compósito com fibras cortadas manualmente.....	125
<b>4.7</b>	<b>Análise da influência das forças na qualidade dos furos</b> .....	<b>131</b>
4.7.1	Análise das avarias em relação às forças .....	131
<b>4.8</b>	<b>Aspecto das brocas antes e após as furações</b> .....	<b>135</b>
<b>4.9</b>	<b>Análise dos tipos e formas dos cavacos</b> .....	<b>138</b>
<b>4.10</b>	<b>Pós-processamento das amostras</b> .....	<b>140</b>
<b>5</b>	<b>CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS</b> .....	<b>143</b>
	<b>REFERÊNCIAS</b> .....	<b>146</b>
	<b>PUBLICAÇÕES</b> .....	<b>164</b>

## 1 INTRODUÇÃO

A sustentabilidade, definida por HART *et al.* (2013) como a capacidade de atender às necessidades do presente sem comprometer a capacidade das gerações futuras de atender às suas necessidades, assim como a crescente consciência ambiental dos consumidores em relação ao esgotamento de recursos naturais e da criação de legislações restritivas por parte dos governos no uso e descarte de determinados materiais estão levando empresas a rever seus produtos, serviços e processos (SEZEN e CANKAYA, 2013). Grande parte da atividade econômica mundial é dependente dos recursos extraídos da natureza, estimados em US\$ 125 trilhões ao ano (WORLD WILDLIFE FUND, 2018). O aumento do consumo humano por produtos e serviços trazem impactos sem precedentes na natureza pela ação da sua cadeia de suprimentos, materiais utilizados e de que forma eles são extraídos e processados, levando à destruição de ecossistemas que afetam diretamente a qualidade de vida no planeta. A biocapacidade, que é a capacidade de renovação dos ecossistemas, aumentou 27% nos últimos 50 anos com o auxílio de tecnologias, porém a quantidade do consumo humano sobre os recursos naturais aumentou 190% no mesmo período (WORLD WILDLIFE FUND, 2018). Segundo pesquisas, em 2018 apenas um quarto das terras no planeta estão livres dos impactos das atividades humanas e projeta-se que esta fração diminua para um décimo em 2050, diretamente influenciados pela demanda de recursos retirados de ecossistemas (INTERGOVERNMENTAL SCIENCE-POLICY PLATFORM ON BIODIVERSITY AND ECOSYSTEM SERVICES, 2018).

O contínuo crescimento populacional, em nível mundial, tem aumentado a demanda por alimentos e outros recursos, levando a um aumento na necessidade do uso de áreas cultiváveis que afetam os ecossistemas (WORLD WILDLIFE FUND, 2018). Processos agrícolas e florestais geram enormes quantidades de outros produtos, denominados biomassa, que foram estimados na ordem de 140 Gt ao ano (UNITED NATIONS ENVIRONMENT PROGRAMME, 2015). Ao longo da história da humanidade, a biomassa foi utilizada como material de construção, alimentação animal e como fertilizante. Porém, no início de século XX, materiais sintéticos derivados do petróleo substituíram em muito sua utilização principalmente em produtos de consumo devido ao seu baixo preço, fácil manufaturabilidade e melhor aparência visual (WONG *et al.*, 2015). Todos os anos milhões de toneladas de

materiais poliméricos derivados do petróleo são produzidos, utilizados por um curto período e se tornam resíduos. Além da origem de fonte não renovável, a maioria destes polímeros não é biodegradável, causando a chamada poluição branca, que junto com o esgotamento e a elevação dos preços dos recursos de origem fósseis, tem se tornado um desafio para a cadeia produtiva e aumentado o interesse por materiais renováveis (WANG *et al.*, 2017).

Grande parte da biomassa é eliminada através da combustão, que emite gases com grande influência no efeito estufa, ou é utilizada como fertilizante. Mas estes resíduos podem ser utilizados como matéria-prima na obtenção de produtos como combustíveis, polímeros e materiais de construção, contribuindo na redução do uso de recursos não renováveis e evitando a destruição dos ecossistemas (TRIPATHI *et al.*, 2019; WANG *et al.*, 2017; ZHU *et al.*, 2016, MOHANTY *et al.*, 2018).

A partir dos restos da colheita de determinadas plantas, como arroz, milho, algodão, cana de açúcar e banana, podem ser obtidas fibras celulósicas que, combinadas com outros materiais aglutinantes, formam os compósitos (DUNGANI *et al.*, 2016). Compósitos são definidos como um material formado por dois ou mais constituintes, insolúveis um ao outro, que combinados formam um material com propriedades não encontradas nos constituintes separadamente (AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIAL, 2016). A utilização de fibras naturais em compósitos se justifica pela quantidade disponível, baixo peso, baixa abrasividade, baixo custo e principalmente por serem materiais renováveis e biodegradáveis (DUNGANI *et al.*, 2016).

Os materiais compósitos são utilizados nos setores automobilístico, aeroespacial, eletrônico, construção, mobiliário, entre outros. Em utilizações que requerem maiores propriedades mecânicas, são utilizadas tradicionalmente fibras e matrizes sintéticas, como as fibras de vidro e resinas epóxi, como também formulações híbridas que misturam materiais sintéticos e naturais, dependendo da utilização proposta (MOHANTY *et al.*, 2018). Os compósitos totalmente biodegradáveis, ou seja, compostos por matriz e fibras de fontes renováveis e biodegradáveis, encontram utilização principalmente em setores como construção e decoração, apesar do custo mais alto e durabilidade menor. Estes materiais são considerados como uma alternativa sustentável para os problemas ambientais causados pelo uso de recursos de fontes não renováveis (MOHANTY *et al.*, 2018).

As fibras obtidas a partir do caule da bananeira podem ser utilizadas como reforço em compósitos (SUBAGYO e CHAFIDZ, 2018). O Brasil é um dos maiores produtores mundiais, com plantações distribuídas em todo seu território, principalmente nas regiões litorâneas. O Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (2020) apontou que no ano 2019 foram produzidos no Brasil em torno de 6,8 Mt da fruta, com uma área cultivada de aproximadamente 460.000 ha. Após a colheita do fruto, as folhas e o pseudocaule não possuem aproveitamento comercial e são deixados no solo como forma de adubação e para mantê-lo úmido (PATEL *et al.*, 2015). Para cada tonelada de banana colhida são geradas aproximadamente quatro toneladas de resíduos, e destes, 75% são do pseudocaule (SILVA, 2016). Estima-se que para cada hectare de plantação são geradas 220 t de resíduos (AHMAD *et al.*, 2018), que podem ser usados como fonte alternativa de renda para os produtores através de fibras para compósitos.

Entre os diferentes tipos de matrizes, o poliuretano (PU) derivado do óleo de mamona pode ser usado como matriz polimérica na fabricação de compósitos com fibras naturais. Além de ser obtido a partir de fontes renováveis é biodegradável (CANGEMI *et al.*, 2010; MERLINI, 2011; PROTZEK *et al.*, 2016).

Apesar da maioria dos compósitos com fibras naturais utilizados atualmente serem fabricados próximos da forma final (*near net shape*), algumas operações de usinagem são necessárias, como o fresamento para retirada de excessos e furações para possibilitar a montagem de peças através de diferentes sistemas de fixação. Os parâmetros destes processos devem ser devidamente selecionados para evitar o comprometimento funcional e estético da peça (NASSAR *et al.*, 2017).

Processos de usinagem em compósitos com fibras naturais se diferenciam de outros materiais tradicionais devido a fatores como o comportamento das fibras e da matriz, estrutura não homogênea e anisotropia que podem levar a diferentes tipos de defeitos, comprometendo o desempenho do material no uso proposto (BABU *et al.*, 2017; LOTFI *et al.* 2019).

Entre as operações de usinagem realizadas em compósitos com fibras naturais, a furação é uma das mais executadas (LOTFI *et al.*, 2019; NASSAR *et al.*, 2017; REZGHI MALEKI *et al.*, 2019). Nas pesquisas encontradas na literatura sobre o processo de furação neste tipo de material, os principais métodos utilizados para avaliar a qualidade do processo são a medição dos danos causados pela entrada e saída da ferramenta no material e as forças de usinagem envolvidas no processo,

utilizando diferentes parâmetros de corte e modelos de ferramentas (NASSAR *et al.*, 2017). A furação em materiais compósitos é considerada crítica principalmente pela tendência da delaminação de camadas quando submetidos às forças de usinagem envolvidas no processo (ABRÃO *et al.*, 2007). Estudos sobre furação em compósitos de fibras naturais com matrizes sintéticas são encontrados na literatura, porém com matrizes biodegradáveis ainda são escassos (DÍAZ-ÁLVAREZ *et al.*, 2018).

## 1.1 Justificativa

Os compósitos, resultado da combinação de dois ou mais materiais, são utilizados por diversos setores devido às possibilidades de se obter um material com propriedades adaptadas às necessidades exigidas nos produtos, muitas vezes superiores àquelas obtidas com seus compostos individualmente. Porém, grande parte dos compósitos utilizados é obtida a partir de fontes não renováveis.

A biomassa proveniente do cultivo de determinadas espécies e aglutinantes de fontes naturais podem ser utilizados para a obtenção de materiais compósitos, tornando-se uma alternativa aos materiais de fontes não renováveis, contribuindo na conservação dos ecossistemas do planeta. Entre as fibras naturais obtidas de resíduos do cultivo, as provenientes do caule da bananeira justificam seu aproveitamento pelas quantidades disponíveis a níveis nacional e mundial.

Os diferentes materiais utilizados na manufatura de produtos, entre eles os compósitos, precisam de operações de usinagem para fornecer qualidade dimensional as peças e possibilitar a montagem. Entre estas operações de usinagem destaca-se a furação, utilizada para permitir que as peças de diferentes produtos possam ser montadas através de diferentes sistemas de fixação.

Para avaliar a possibilidade de uso de um compósito obtido a partir das fibras do caule da bananeira com poliuretano derivado do óleo de mamona em setores como construção ou mobiliário é necessário verificar seu comportamento através dos processos de usinagem existentes, em especial a furação. Na literatura são encontrados estudos sobre a furação em diferentes compósitos com fibras vegetais e matrizes sintéticas ou de fontes naturais. Porém, não foi encontrado um consenso entre os autores de quais são os parâmetros mais adequados para usinagem destes materiais, devido principalmente às diferentes características e

comportamento das fibras naturais utilizadas e os diferentes processos de fabricação destes compósitos.

As informações obtidas com a pesquisa ajudarão na compreensão do processo de furação dos compósitos com fibras naturais, material que vem se tornando muito utilizado pela indústria devido às questões ambientais apontadas.

## **1.2 Objetivos**

O trabalho tem como objetivo investigar os efeitos de diferentes parâmetros de corte e tipos de broca no processo de furação em compósitos com fibras do caule da bananeira e poliuretano derivado do óleo de mamona.

### **1.2.1 Objetivos específicos**

O objetivo geral foi alcançado a partir dos seguintes objetivos específicos:

a) Fabricação e caracterização de dois tipos de compósitos com fibras do caule da bananeira e matriz poliuretano derivado do óleo de mamona através de processos mecânico e manual.

b) Análise da qualidade de furação nos compósitos através da medição das avarias nos furos.

c) Análise da força de avanço e torque com seus efeitos no processo.

d) Análise do aspecto das brocas e dos cavacos gerados após a furação.

e) Comparação dos resultados com pesquisas sobre o processo de furação em diferentes compósitos com fibras vegetais existentes na literatura.



## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo estão descritas as informações encontradas na literatura sobre compósitos, poliuretanos, poliuretano derivado do óleo de mamona, fibras naturais, fibras da bananeira, compósitos reforçados com fibras vegetais e os estudos sobre a usinabilidade de compósitos com fibras vegetais, especificamente no processo de furação.

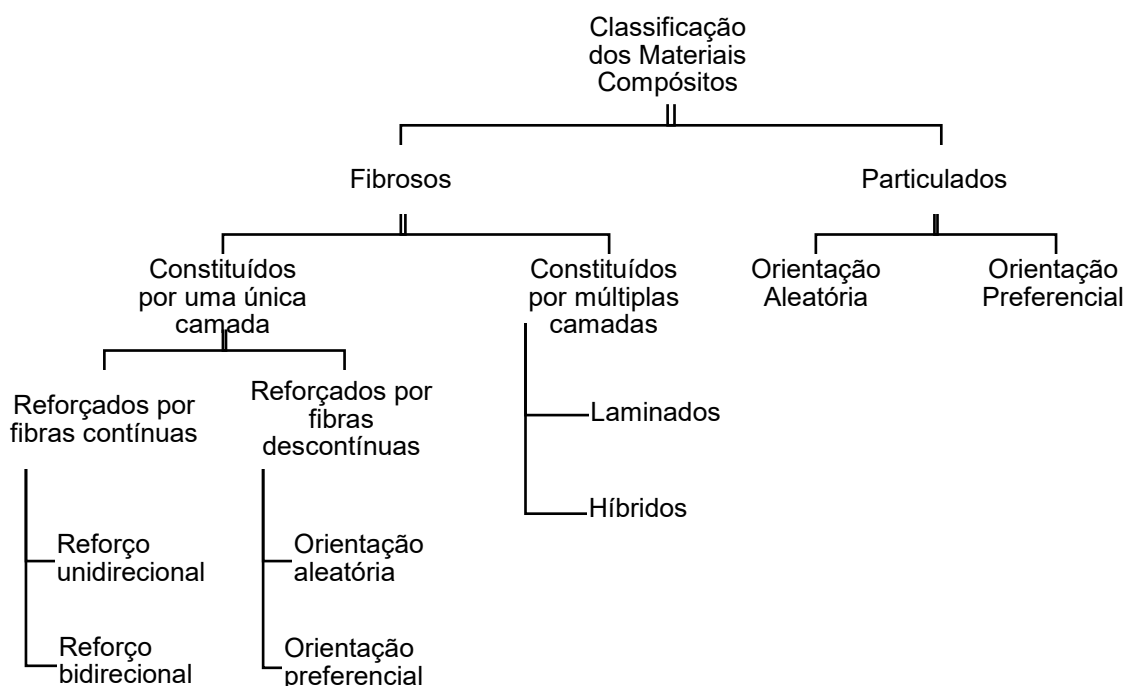
### 2.1 Compósitos

A combinação de dois ou mais materiais com a intenção de obter um material com propriedades superiores às obtidas nos constituintes individualmente caracterizam os materiais compósitos. Para sua obtenção um dos materiais ou fases é denominada matriz, que pode ser polimérica, metálica ou cerâmica, e a outra fase é o reforço (CALLISTER, 2008). A matriz estrutura o material e transfere esforços enquanto o reforço é a fase responsável pela resistência ao esforço (GAY, 2014). Os materiais compósitos vêm sendo usados ao longo dos séculos pela humanidade para construção e fabricação de diferentes utensílios através da combinação de diferentes materiais (VENTURA, 2009). No final do século XIX, o desenvolvimento da área química trouxe o conhecimento das técnicas de polimerização e a criação de materiais poliméricos. Porém, para aplicações estruturais, estes materiais não apresentavam boas propriedades, até que em meados do século XX surgiram materiais como a fibra de vidro e resinas que, combinados, proporcionaram materiais com excelente resistência estrutural (KEYA *et al.*, 2019).

Entre os compósitos mais utilizados estão os constituídos por matriz polimérica reforçados com fibras sintéticas ou naturais (VENTURA, 2009). As vantagens na utilização da matriz polimérica são o baixo custo, facilidade de moldagem e a leveza, tendo como função principal a união das fibras (YASHAS GOWDA *et al.*, 2018; CALLISTER, 2016). As propriedades mecânicas destes compósitos são influenciadas por fatores como dispersão, orientação e comprimento das fibras, distribuição, propriedades e fração volumétrica dos materiais e a interface da fibra com a matriz (MERLINI, 2011).

A Figura 1 mostra a classificação dos compósitos poliméricos em relação ao reforço (VENTURA, 2009). Os reforços particulados servem como enchimento para diminuição de custos e não alteram significativamente as propriedades em relação à matriz polimérica. Compósitos reforçados por fibras possuem melhores propriedades mecânicas por transferirem melhor as tensões e suportarem melhor os esforços mecânicos (SILVESTRE FILHO, 2001).

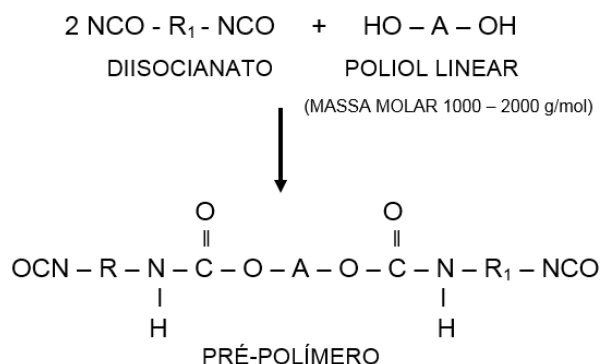
**Figura 1 - Classificação dos compósitos poliméricos em relação à fase reforço**



Fonte: adaptado de Ventura (2009)

A combinação dos constituintes nos compósitos fornecem características de desempenho superiores ao que se alcançaria com eles individualmente, podendo se obter peças leves e com alta resistência, além da possibilidade de se obter um material com características funcionais dimensionadas e adequadas ao uso proposto. Em função destas características, os compósitos encontram utilizações em diferentes setores como o automobilístico, aeroespacial, petroquímico, naval, eletroeletrônica, construção civil, energética, biomédica, esportiva, entre outros, em substituição a materiais como o aço ou ligas de alumínio (MÜZEL, 2017).

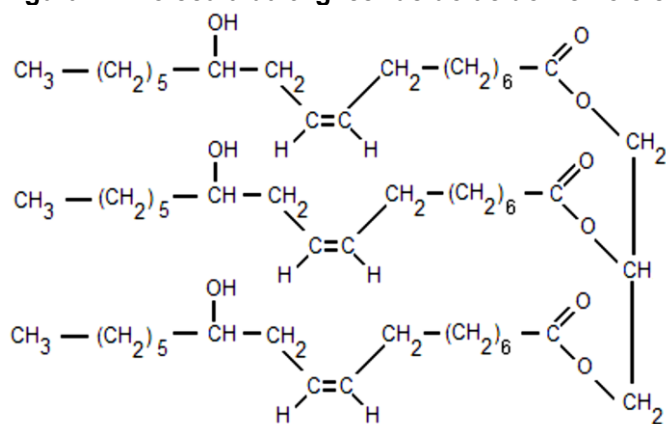


**Figura 3 - Reação de obtenção do pré-polímero de uretano**

Fonte: Azevedo (2009)

### 2.2.1 Poliuretano derivado do óleo de mamona

A planta *Ricinus communis*, popularmente conhecida como mamona chegou ao Brasil trazida pelos portugueses para utilizar seu óleo na iluminação e lubrificação. Devido ao clima tropical espalhou-se por toda a extensão do país. O óleo extraído de suas sementes é utilizado em produtos como o biodiesel, plásticos, fibras sintéticas, esmaltes, resinas, lubrificantes e também pode ser utilizado na área médica para produção de órgãos artificiais com os biopolímeros (CANGEMI *et al.* 2010). Este óleo possui ácido ricinoleico, um poliálcool poliéster que possui em sua estrutura química três grupos funcionais reativos utilizados na síntese de poliuretanos (CANGEMI, 2006). Portanto, estas características o tornam um poliálcool poliéster natural, trifuncional, composto por 89% de triglicéride do ácido ricinoleico (Figura 4) (CLARO NETO, 1997).

**Figura 4 - Molécula da triglicéride do ácido ricinoleico**

Fonte: Azevedo (2009)

O PU derivado do óleo de mamona foi pesquisado a partir do ano de 1984 pelo Grupo de Química Analítica e Tecnologia de Polímeros (GQATP – USP - São Carlos), especialmente para o uso na medicina. As pesquisas foram voltadas principalmente para a fabricação de próteses, pois o material é biocompatível, não sendo rejeitado pelo corpo humano. Os trabalhos de CLARO NETO (1997) e SILVESTRE FILHO (2001) mostraram a viabilidade de utilização do material em implantes ósseos. Resultados satisfatórios foram apontados por AZEVEDO *et al.* (2013) no estudo sobre o efeito da radiação UVA, UVC e gama no PU derivado de óleo de mamona.

Diferentes trabalhos avaliaram as propriedades de painéis compensados (DIAS *et al.*, 2004), particulados (AMSTALDEN *et al.*, 2014) e MDF (*Medium Density Fiberboard*) (CAMPOS *et al.*, 2014) fabricados com o PU derivado do óleo de mamona. Os resultados mostraram valores satisfatórios e superiores aos especificados pelas normas utilizadas nos testes.

O PU derivado do óleo da mamona além de biodegradável não possui solventes na sua composição (CANGEMI *et al.*, 2010). A biodegradação foi estudada por CANGEMI *et al.* (2008), utilizando colônias de microorganismos provenientes de agentes biológicos degradadores de gordura. Os resultados mostraram que, por ser um material de origem vegetal, sofre o mesmo processo de biodegradação das gorduras. No estudo, foram realizadas comparações com o PU derivado do petróleo, o qual apresentou resultados inferiores ao derivado da mamona. Análises térmicas foram efetuadas no material para avaliar sua estabilidade através de técnicas como termogravimetria (TG), termogravimetria derivada (DTG) e análise térmica diferencial (DTA). Os resultados apontaram três estágios de decomposição. O primeiro em torno de 230°C com perda mássica de 23%, o segundo em torno de 330°C com perda de 20% e o terceiro em torno de 380°C com perda de 57%. Aproximadamente 5% de cinzas foram observados a 800°C (MOTHÉ *et al.*, 2004; NELSON *et al.*, 2013).

### **2.3 Fibras naturais**

Fibras naturais são fontes renováveis e biodegradáveis de reforços para compósitos poliméricos. A disponibilidade por todo planeta, baixo preço, baixa

densidade e propriedades mecânicas satisfatórias levam as fibras naturais a se tornarem uma alternativa às fibras sintéticas em diferentes setores (RAMESH *et al.*, 2017) como o automobilístico (KORONIS *et al.*, 2013), mobiliário (CIUPAN *et al.* 2018), médico (LUZI *et al.*, 2019), têxtil (RANI *et al.*, 2019), construção (KESIKIDOU *et al.*, 2019) e embalagem (SYDOW e BIENCZAK, 2019). Entre as vantagens estão também a neutralidade na emissão de dióxido de carbono, ao contrário de materiais de origem fóssil onde a emissão é alta durante o processo produtivo, baixa massa específica, boas propriedades termo acústicas, menor desgaste das ferramentas em relação às fibras sintéticas e a manipulação destas fibras se tornar menos insalubre comparadas às fibras sintéticas, como a fibra de vidro (CHANDRAMOHAN *et al.*, 2011; MOHAMMED *et al.*, 2015; SARAVANA BAVAN e MOHAN KUMAR, 2010).

CHANDRAMOHAN *et al.* (2011b) compararam alguns aspectos técnicos e ambientais entre fibras naturais e sintéticas (Quadro 1). As fibras naturais são hidrofílicas, portanto apresentam maior capacidade de absorção de água em relação às fibras sintéticas, essencialmente hidrofóbicas. As propriedades mecânicas das fibras naturais apresentaram resultados inferiores ou similares quando comparados aos valores observados em fibras sintéticas. Os autores citam que apesar destas características, fibras naturais possuem melhores aspectos ambientais na sua utilização, principalmente por serem recursos de fontes renováveis.

**Quadro 1 - Comparação entre aspectos técnicos e ambientais das fibras naturais e sintéticas**

Aspectos	Propriedades	Fibras naturais	Fibras sintéticas
Técnicos	Mecânicas	Moderada	Alta
	Absorção de água	Alta	Baixa
	Degradação térmica	Alta	Baixa
Ambientais	Recursos	Infinitos	Limitados
	Produção	Baixa	Alta
	Reciclabilidade	Boa	Moderada

**Fonte: Chandramohan (2011b)**

As fibras naturais podem ser classificadas de acordo com sua origem em vegetais, animais ou minerais. Levando em consideração a questão da sustentabilidade, as fibras vegetais são uma alternativa interessante de utilização (RAMESH *et al.*, 2017), principalmente as provenientes de restos de culturas como da banana, coco, abacaxi, arroz e cana (DUNGANI *et al.*, 2016).

Na Tabela 1 são apresentados os valores da produção de plantas com geração de biomassa, fonte de fibras celulósicas, em alguns dos principais países produtores (FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS, 2018). Segundo DUNGANI *et al.*, (2016), assumindo-se que 40% destas quantidades produzidas são biomassa e 10% desta biomassa são fibras celulósicas, uma quantidade considerável de material está disponível todos os anos como alternativa para utilização no reforço de compósitos.

**Tabela 1 - Produção de plantas com geração de biomassa nos principais países produtores**

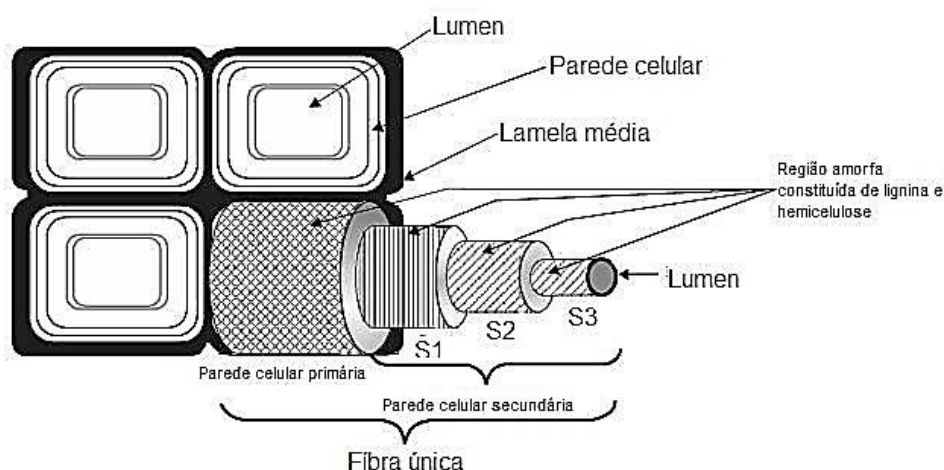
País	Produção em milhões de toneladas				
	Banana	Coco	Abacaxi	Arroz	Cana
Brasil	6,76	2,34	2,65	11,74	746,72
China	11,57	0,40	2,00	214,07	108,71
Índia	30,80	11,70	1,70	152,58	376,90
EUA	0,04	N/I	0,15	10,17	31,33
Indonésia	7,26	18,55	1,80	83,03	21,74
Malásia	0,37	0,51	0,32	2,71	0,02
Filipinas	6,14	14,72	2,73	19,06	24,73
Tailândia	1,04	0,88	2,11	32,19	104,36
Vietnam	2,08	1,57	0,65	44,04	17,94

**Fonte: Food and Agriculture Organization of the United Nations (2018)**

O uso das fibras sintéticas, como de vidro ou de carbono, ainda é dominante na fabricação de compósitos, porém as fibras vegetais surgem como alternativa para determinadas aplicações por apresentarem propriedades comparáveis e até superiores (SANJAY *et al.*, 2016). Estas fibras podem ser obtidas a partir do caule, folha, fruto ou semente, raiz, gramíneas e da madeira (RAMESH *et al.*, 2017).

A Figura 5, observa-se a estrutura básica de uma fibra vegetal, composta por uma parede celular primária e outras secundárias, não homogêneas, lúmen e lamela média. As paredes são compostas de celulose impregnadas em uma matriz de lignina e hemicelulose. Cada fibra possui uma fina parede celular primária que recobre a segunda parede, composta de três camadas, sendo a do meio composta por microfibrilas com cadeias de moléculas de celulose (HO *et al.*, 2012).

**Figura 5 - Estrutura básica de uma fibra vegetal**



**Fonte: Dungani *et al.* (2016)**

As propriedades físicas e mecânicas são influenciadas pela sua estrutura, ângulo das microfibrilas, composição química e dimensões da célula, como comprimento e largura. A origem da planta, idade, condições climáticas durante o cultivo e o método de extração são fatores que influenciam estas propriedades (DUNGANI *et al.*, 2016; FUQUA *et al.*, 2012).

Fibras vegetais podem ser consideradas um compósito natural constituído principalmente por celulose, hemicelulose e lignina, responsável por estruturar a fibra. Devido a isto são conhecidas também como fibras celulósicas ou lignocelulósicas (AZWA *et al.*, 2013).

Uma das desvantagens na utilização de fibras vegetais é o comportamento hidrofílico devido à presença dos grupos hidroxila da celulose, promovendo uma alta absorção de água, bem como a ligação de hidrogênio existente em seus componentes químicos que pode impedir a dispersão das fibras, comprometendo a interface fibra/matriz. Para melhorar esta condição tratamentos químicos e físicos são propostos (CALEGARI *et al.*, 2016; FUQUA *et al.*, 2012; GIRIJAPPA *et al.*, 2019. MOCHANE *et al.*, 2019).

Fibras vegetais também estão suscetíveis à deterioração biológica, química, mecânica, térmica, fotoquímica e aquosa, dependendo de seus constituintes. A lignina presente é comburente e pode sofrer deterioração por raios ultravioletas, enquanto a hemicelulose é responsável pela deterioração biológica, térmica e absorção de água (AZWA *et al.*, 2013; MARQUES *et al.*, 2014). Fibras vegetais, por



serem materiais orgânicos, estão suscetíveis a alterações térmicas e não possuem boa resistência a flamaabilidade (MOHAMMED *et al.*, 2015).

A Tabela 2 mostra uma comparação entre as propriedades e preços de algumas fibras vegetais e sintéticas. Os preços menores, propriedades comparáveis, e as questões ecológicas e governamentais levam um grande número de empresas a buscar utilizar fibras vegetais em seus produtos em substituição às fibras sintéticas (VÄISÄNEN *et al.*, 2016).

**Tabela 2 - Valores e propriedades físicas das fibras vegetais e sintéticas**

Planta	Preço kg (US\$)	Densidade (g/cm <sup>3</sup> )	Resistência à tração (MPa)	Módulo Young (GPa)	Alongamento na ruptura (%)
Banana	0,1-0,75	1,35	529-914	27-32	2,6-5,9
Cana	0,2	0,89	350	22	5,5
Coco	0,2-0,4	1,15-1,25	131-220	4-6	15-40
Abacaxi	0,1-0,18	1,44	413-1627	60-82	14,5
Sisal	0,65	1,3-1,4	390-450	12-41	2,3-2,5
Fibra de vidro	2	2,55	3 – 3,5	63-67	2,5
Fibra de carbono	8-14	1,4	400	230-240	1,4-1,8

Fonte: Mochane *et al.* (2019)

### 2.3.1 Fibra da bananeira

A bananeira é uma planta da família das Musáceas, originária do sudoeste asiático e sua evolução derivou das espécies *Musa acuminata Colla* e a *Musa balbisiana Colla*, gerando subgrupos como as espécies Cavendish, Gros Michel, Prata, Terra e Figo. No planeta, são encontradas aproximadamente 300 espécies com somente 20 usadas para o consumo humano, principalmente as derivadas da espécie *acuminata* (VENKATESHWARAN e PERUMAL, 2010; SUBAGYO e CHAFIDZ, 2018). O seu cultivo é mais adequado em regiões tipicamente tropicais, com calor constante, alta umidade e boa distribuição de chuvas (TOCK *et al.*, 2010).

O Brasil é um dos maiores produtores mundiais da fruta, podendo ser encontrada em todo seu território. No ano de 2020, foram produzidos no país em

torno de 6,6 milhões de toneladas da fruta em uma área cultivada de aproximadamente 460 mil hectares (INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA, 2020). As principais espécies encontradas no país são a Ouro, Nanica, Nanicão, Grande Naine, Maçã, Mysore, Prata, Pacovan, Prata Anã, Terra, D'angola e Figo (LIMA *et al.*, 2012).

Para cada tonelada de banana colhida são geradas aproximadamente quatro toneladas de resíduos, e destes, 75% são do pseudocaule (SILVA, 2016; ABDULLAH *et al.* 2014). Estima-se que para cada hectare de plantação são geradas 220 toneladas de resíduos (AHMAD *et al.*, 2018). Estes resíduos, denominados cobertura morta, são utilizados pelos produtores para controle de erosão, redução da evaporação da água do solo, adubação e redução do crescimento de plantas daninhas. Podem também ser queimados ou deixados para decomposição em locais abertos nas propriedades. Todas estas práticas tem como desvantagem a geração de gases nocivos ao meio ambiente e a proliferação de insetos que podem comprometer a saúde humana e o próprio cultivo. Entre as alternativas para o uso destes resíduos está a utilização das fibras como reforço em compósitos (LIMA *et al.*, 2012; SUBAGYO e CHAFIDZ, 2018; TOCK *et al.*, 2010).

A Figura 6 mostra a localização das principais partes de uma bananeira, entre elas o sistema radicular, o caule subterrâneo (rizoma), o pseudocaule constituído de bainhas foliares (tronco), folhas e o cacho (LIMA *et al.*, 2012).

**Figura 6 - Principais partes da bananeira**



**Fonte: Lima *et al.* (2012)**

No Brasil, a planta pode atingir entre 3 a 9 m de altura com diâmetros entre 200 a 370 mm no pseudocaule. As fibras são obtidas do pseudocaule, que é formado por diferentes camadas de fibras longitudinais, chamadas bainhas foliares, podendo chegar à quantidade de 25. Estas camadas possuem cores e larguras diferentes da parte externa para a interna, apresentando diferenças nas suas propriedades (SATYANARAYANA *et al.*, 2007). Em geral, as onze camadas externas do pseudocaule são mais adequadas para obtenção de fibras porque as mais internas apresentam baixa resistência, dificultando a retirada (SUBAGYO e CHAFIDZ, 2018). A extração das fibras pode ser através de técnicas manuais ou mecânicas (PAPPU *et al.*, 2015). A Figura 7 mostra o corte do pseudocaule onde podem ser observadas as camadas das bainhas foliares.

**Figura 7 - Corte do pseudocaule e aparência das bainhas foliares**



**Fonte: A autoria própria (2020)**

Como em outras fibras vegetais, a variabilidade das propriedades das fibras pode levar a dificuldades na fabricação de componentes em setores que necessitam de confiabilidade estrutural em seus produtos (LOTFI *et al.*, 2019). O diâmetro de uma fibra de bananeira varia de 13 a 400  $\mu\text{m}$ . A densidade pode variar de 1,3 a 1,4  $\text{g}/\text{cm}^3$ , mais baixa que a fibra de vidro, com valores de 2,5 – 2,56  $\text{g}/\text{cm}^3$ . Na sua composição química encontra-se a celulose, que pode variar de 23 a 65%,

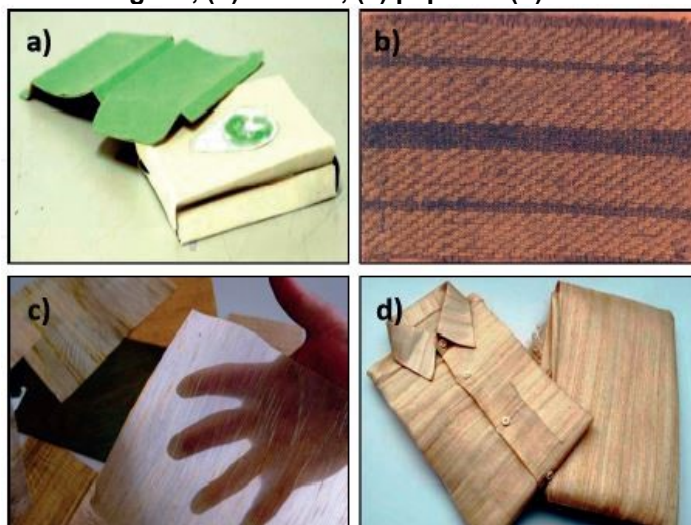
hemicelulose entre 1 a 19%, lignina entre 5 a 27%, extrativos entre 4,24 a 10,6%, cera e pectina, em menores proporções (PAPPU *et al.*, 2015). O teor de umidade é de aproximadamente 12% (SUBAGYO e CHAFIDZ, 2018).

RAO *et al.* (2007) avaliaram a resistência de diferentes fibras vegetais. Para a fibra de bananeira apontaram valores de resistência à tração em torno de 560 MPa e para deformação de 3,5%, valores comparados à fibra de sisal (*agave sisalana*).

GUIMARÃES *et al.* (2009) descreveram valores da estabilidade térmica das fibras da bananeira em torno de 200°C, com a decomposição da celulose e da hemicelulose em torno de 300°C e a deterioração acima dos 400°C. SUBAGYO e CHAFIDZ (2018) avaliaram que a condutividade térmica encontrada na fibra de bananeira foi baixa (0,0253 W/m<sup>2</sup> K), sugerindo sua aplicação como isolante térmico.

Diversos produtos podem ser obtidos a partir de fibras do caule da bananeira como papéis, tecidos e embalagens, conforme exemplos da Figura 8. A resistência à água do mar e a característica de flutuação natural fazem com que ela seja usada em cordas para embarcações e redes de pesca (SUBAGYO e CHAFIDZ, 2018). Devido a sua leveza e conforto, é utilizada para produção de capas de almofadas, bolsas, toalhas de mesa, cortinas, entre outros (MOHAPATRA *et al.*, 2010). PAPPU *et al.* (2015), BASAK *et al.* (2016) e PRIYADARSHANA *et al.* (2022) realizaram revisões na literatura sobre a utilização de fibras de bananeira em compósitos poliméricos, descrevendo diferentes resultados obtidos em pesquisas com esta fibra.

**Figura 8 - Exemplos de produtos obtidos a partir de fibras do caule da bananeira: (a) embalagens, (b) tecidos, (c) papéis e (d) vestuário**



Fonte: Subagyo *et al.* (2018)

## 2.4 Compósitos com fibras vegetais

Setores como da aviação, automobilístico, construção, decoração, entre outros, pesquisam e utilizam as fibras vegetais em substituição às fibras sintéticas para fabricação de compósitos em seus produtos (SUN, 2018; KEYA *et al.*, 2019; KHARTY *et al.*, 2020). Entre os fatores que influenciam nesta substituição estão a redução no desgaste das ferramentas para a usinagem, redução da irritação respiratória nas pessoas envolvidas nos processos de fabricação ou usinagem do material e principalmente por ser uma alternativa aos compósitos sintéticos de fontes não renováveis em um cenário de crescente crise energética global e de impactos no meio ambiente (RAMESH *et al.*, 2017; JÚNIOR *et al.*, 2020). A Figura 9 ilustra alguns exemplos da aplicação de compósitos com fibras vegetais (CFV) pela indústria para fabricação de diferentes componentes de produtos.

**Figura 9 - Exemplos de aplicações de compósitos com fibras vegetais (CFV): (a) peças decorativas, estruturais e de mobiliário em fibras de cana de açúcar; (b) caixa para computadores portáteis em fibras de cânhamo; (c) peças internas de automóveis em fibras de sisal, juta e linho**



Fonte: (a) Godavari Biorefineries Ltd (2020); (b) Keya *et al.* (2019); (c) Monteiro *et al.* (2010)

Além dos fatores citados, outras vantagens estão na sua menor massa devido à menor densidade comparada às fibras sintéticas dependendo do tipo de planta, custo mais baixo e a capacidade de absorver vibrações (ZIMNIEWSKA *et al.*, 2012). Apesar das propriedades mecânicas não serem tão elevadas, os valores são aproximados e podem ser comparados aos obtidos em compósitos reforçados com fibras sintéticas, como a fibra de vidro (WESTMAN *et al.*, 2010; PICKERING *et al.*, 2016; SHAH, 2014).

Os CFV podem ser obtidos a partir de matrizes sintéticas ou biodegradáveis (ZHU *et al.* 2016; SUN, 2018; MOCHANE *et al.*, 2019), podendo ser termofixas ou

termoplásticas (YASHAS GOWDA *et al.*, 2018). A utilização de uma matriz de fonte renovável ou reciclada e biodegradável na sua fabricação denomina o material como “compósito verde” (LA MANTIA e MORREALE, 2011; MOCHANE *et al.*, 2019) ou “biocompósito” (SARAVANA BAVAN e MOHAN KUMAR, 2010).

Processos de fabricação dos CFV levam em consideração critérios como a forma, tamanho, custo, tempo de produção, propriedades desejadas e as propriedades dos constituintes. Entre os principais processos citados na literatura estão o manual, moldagem por compressão, moldagem por transferência de resina (RTM), extrusão e processos automatizados de colocação das fibras (LOTFI *et al.*, 2019; MOCHANE *et al.*, 2019).

Os principais objetivos na fabricação de CFV devem levar em consideração a homogeneidade na dispersão entre os componentes, uma boa interface fibra/matriz, baixa porosidade na matriz e uma porcentagem otimizada de fibras garantindo o reforço do material. Estes objetivos buscam obter um compósito com propriedades mecânicas adequadas ao uso proposto (ARDANUY *et al.*, 2015).

A falta de adesão entre os componentes é considerada um dos maiores desafios na produção dos CFV, uma vez que esta interface é responsável por transferir as cargas mecânicas da matriz para as fibras, influenciando na resistência do material (FARUK *et al.*, 2012). Este comportamento é motivado pela natureza hidrofílica das fibras vegetais que não possuem boa adesão com polímeros, essencialmente hidrofóbicos (ZINI e SCANDOLA, 2011). Tratamentos químicos e físicos aplicados nas fibras ou o uso de agentes de acoplamento na matriz buscam melhorar esta condição e também aumentar a resistência à umidade das fibras (VASCO *et al.*, 2017; MOHAMMED *et al.*, 2015; SANJAY *et al.*, 2019). Em matrizes PU, a interação química entre os isocianatos e a lignina das fibras vegetais pode reforçar a interação fibra/matriz, melhorando a distribuição de carregamento no compósito durante um esforço e evitando o uso de agentes de acoplamento ou tratamentos prévios nas fibras (VASCO *et al.*, 2017).

As propriedades também são influenciadas por outros fatores como o sentido de orientação, comprimento, fração de volume, e as propriedades físicas das fibras (SHALWAN e YOUSIF, 2013; LOTFI *et al.*, 2019; MOHAMMED *et al.*, 2015).

DAS *et al.* (2015) avaliaram as propriedades físico-mecânicas de compósitos obtidos com fibras de bananeira obtidas por processos mecânicos e físicos com matriz polietileno de baixa densidade (*LDPE – Low density polyethylen*) em

diferentes proporções. Os resultados apontaram valores de resistência à tração de 15,84 MPa e flexão de 24,38 MPa para as fibras extraídas por processos químicos. Para processos mecânicos foram encontrados valores de resistência à tração de 10,85 MPa e flexão de 20,31 MPa. Estes melhores resultados foram encontrados nos compósitos que utilizaram 70% de fibras e 30% de LDPE.

PRAKASHREDDY *et al.* (2014) avaliaram as propriedades de um compósito com fibras de coco tratadas e matriz poliéster, em diferentes proporções e comprimentos de fibras. Foram encontrados valores de 252 MPa para resistência à tração e de aproximadamente 90 MPa para flexão, ambos com a proporção de 25% de fibras com dimensões de 40 mm. Eles afirmaram que o comprimento e a proporção de fibras influenciam fortemente as propriedades do material.

CAO *et al.* (2006) investigaram as propriedades mecânicas do compósito obtido a partir das fibras do bagaço da cana de açúcar não tratadas e tratadas com solução alcalina, aglutinadas com matriz poliéster em diferentes proporções. Foram encontrados valores para resistência a tração de 23,47 MPa no compósito com fibras não tratadas e 26,77 MPa para as fibras tratadas. Para flexão, foram encontrados valores de 43,87 MPa para fibras não tratadas e 50,86 MPa para as fibras tratadas. Os valores foram encontrados para 65% de fibras na proporção do material.

DEVI *et al.* (2011) avaliaram as propriedades mecânicas do compósito com fibras da folha do abacaxi e matriz poliéster em diferentes proporções. Foram apontados valores para resistência a tração de 65 MPa e flexão de 70 MPa, na proporção de 40% de fibras.

MAYA *et al.* (2017) investigaram as propriedades do compósito obtido a partir das fibras de sisal e matriz fenol-formaldeído, em diferentes proporções e comprimentos das fibras. Foram encontrados valores de 62 MPa para resistência à tração e de 116,82 MPa para resistência a flexão, com fibras de 40 mm de comprimento e na proporção de 54%.

Entre as limitações ao uso de CFV está a deterioração do material, principalmente com matrizes poliméricas biodegradáveis. Em determinados ambientes, a deterioração é influenciada pela umidade atmosférica, temperatura, luz ultravioleta e atividades de organismos microscópicos, decompondo a hemicelulose, lignina e celulose da fibra, podendo causar danos à ligação fibra/matriz e piorando as propriedades mecânicas do material. Apesar do processo de biodegradação ser

interessante para questões ambientais, existe uma preocupação no seu controle para não comprometer sua aplicação em determinadas utilizações (GIRIJAPPA *et al.*, 2019).

Outra limitação é a deterioração térmica. Os CFV normalmente são fabricados com temperaturas abaixo de 200°C. Acima desta temperatura a hemicelulose, celulose e lignina presentes nas fibras começam a deteriorar e perder suas propriedades, comprometendo a resistência do material (VÄISÄNEN *et al.*, 2016). Para melhorar esta condição, SUN (2018) propôs a adição de materiais retardantes na composição de um CFV para aprimorar o retardamento de chamas no material.

#### 2.4.1 Compósitos com fibras de bananeira

Os trabalhos que propõem a utilização da fibra de bananeira em compósitos com matrizes sintéticas ou naturais avaliam principalmente as propriedades físicas e mecânicas do material, utilizando fibras com ou sem tratamento de superfície. A preocupação com o meio ambiente é citada em grande parte destes trabalhos como motivação dos estudos, destacando que fibras da bananeira são materiais renováveis. A preocupação com a fonte da matriz utilizada para obtenção destes compósitos também é abordada.

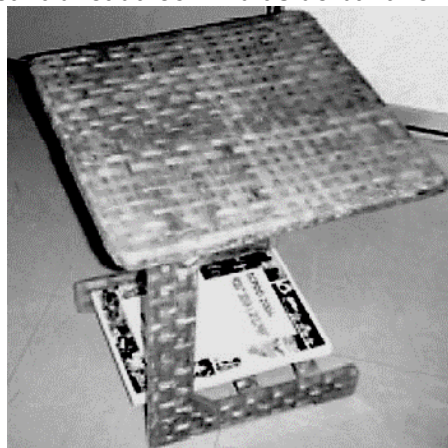
THANGAMANI e SOMASUNDARAM (2014) desenvolveram materiais denominados “compósitos verdes” a partir de resíduos da produção agrícola, entre eles fibras de bananeira, com matrizes de fontes naturais renováveis. Os autores afirmam que se a fabricação, o processamento e a disposição final de um compósito não criam nenhum impacto negativo ao usuário e ao meio ambiente, ele pode ser denominado um “compósito natural verde”.

A possibilidade de o material ser uma alternativa aos materiais tradicionais utilizados por diferentes setores foi citada no trabalho de SAPUAN *et al.* (2008), que desenvolveram uma mesa de compósitos obtidos com fibras de bananeira e resina epóxi, ilustrada na Figura 10. Os autores afirmaram que as fibras da bananeira são consideradas resíduos, mas podem tornar-se uma matéria-prima para a produção de compósitos. O material obtido pode ser utilizado na fabricação de mobiliário como



alternativa a materiais como a madeira, metal e o plástico, levando-se em consideração as exigências funcionais do produto.

**Figura 10 - Mesa fabricada com fibras de bananeira e resina epóxi**



Fonte: Sapuan *et al.* (2008)

Algumas empresas utilizam as fibras do pseudocaule da bananeira para fabricação de materiais com diferentes finalidades. A Tamoios Tecnologia, localizada em Itariri, São Paulo, fabrica e comercializa materiais a partir dos resíduos do cultivo da bananeira. Em seu portfólio são encontrados produtos para as áreas de decoração, embalagens, construção civil, entre outros. A Figura 11a mostra uma capa de caderno produzida pela empresa. A empresa FIBandCO, localizada em Ducos, na Martinica, fabrica e comercializa revestimentos para painéis utilizados em móveis e decoração a partir das fibras do pseudocaule da bananeira. Na Figura 11b é mostrado um painel de revestimento com as fibras e na Figura 11c é mostrada sua aplicação no mobiliário. As empresas citadas destacam a utilização dos resíduos da cultura da banana como uma alternativa aos materiais de fontes não renováveis.

**Figura 11 - Capa de caderno com fibras de bananeira (a); revestimento com fibras de bananeira (b); exemplo de utilização do revestimento em mobiliário (c)**

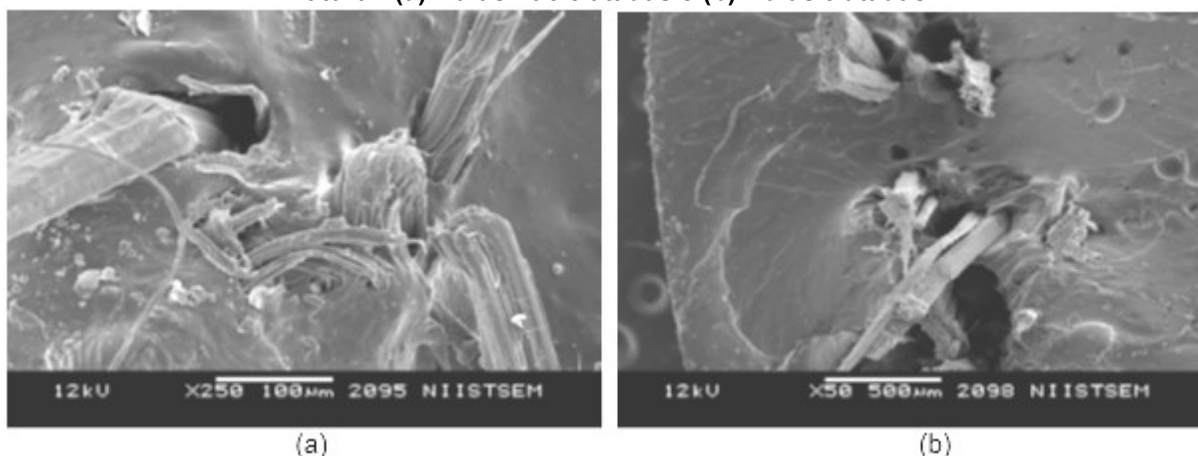


Fonte: (a) Tamoios Tecnologia (2020); (b) FIBandCO (2020)

MERLINI *et al.* (2011) avaliaram as propriedades de compósitos com matriz de poliuretano derivado do óleo de mamona com diferentes frações e comprimentos de fibras de bananeira, com e sem tratamento. Os resultados apontaram que os compósitos com fibras tratadas apresentaram melhores propriedades mecânicas em relação às fibras não tratadas devido às alterações químicas nas superfícies das fibras tratadas, que promoveram uma melhor interface entre fibras e a matriz de poliuretano. Fibras com 30 mm de comprimento e proporção de 15% na mistura com a matriz foi a combinação que apresentou melhores propriedades mecânicas tanto em fibras tratadas como não tratadas. Os valores encontrados para tensão máxima e módulo de elasticidade nesta combinação foi de  $4,80 \pm 0,19$  MPa e  $50,99 \pm 1,00$  MPa respectivamente para o compósito com fibras não tratadas. Para o compósito com fibras tratadas os valores foram de  $10,12 \pm 0,36$  MPa para tensão e  $53,98 \pm 2,77$  MPa para elasticidade.

EZEMA *et al.* (2014) desenvolveram compósitos com fibras tratadas e não tratadas de bananeira utilizando matriz de borracha natural, avaliando as propriedades mecânicas do material. Os resultados mostraram melhores propriedades no material com as fibras tratadas. A Figura 12 mostra as micrografias de MEV dos compósitos desenvolvidos por EZEMA *et al.* (2014). Na Figura 12a podem ser observadas as fibras sem tratamento e na Figura 12b fibras com tratamento. Segundo os autores, as fibras sem o tratamento ficaram segregadas após o rompimento, e fibras com tratamento ficaram unidas e sofreram uma fratura, indicando uma melhor resistência. Os autores também avaliaram a resistência à tração, falha e alongamento na ruptura em função de uma orientação unidirecional das fibras durante a fabricação dos compósitos estudados. As fibras foram orientadas em ângulos de  $0^\circ$ ,  $45^\circ$  e  $90^\circ$  nos painéis. As fibras orientadas a  $0^\circ$  obtiveram melhores resultados de resistência em relação às fibras orientadas a  $45^\circ$  e  $90^\circ$  em função dos testes aplicados. Para fibras orientadas a  $0^\circ$  foram encontrados valores de 3,12 MPa para tensão máxima e 84,3 MPa no módulo de elasticidade no compósito com fibras não tratadas e 4,03 MPa de tensão e 147,34 MPa na elasticidade para o compósito com fibras tratadas. Os autores concluem que em função dos valores medidos o material não é indicado para aplicações com altas cargas de tração, porém pode ser utilizado em situações de maiores cargas de compressão, como pisos ou forros para habitações.

**Figura 12 - Micrografia de MEV dos compósitos com fibras de bananeira e matriz de borracha natural: (a) fibras não tratadas e (b) fibras tratadas**



Fonte: Ezema *et al.* (2014)

KIRUTHIKA *et al.* (2012) desenvolveram um compósito biodegradável com fibras de diferentes variedades de bananeira e utilizaram como matriz a goma da semente de tamarindo extraída a várias temperaturas, avaliando resistência à tração, absorção e resistência ao fogo. A pesquisa avaliou também a interferência da aplicação de revestimento com verniz nas propriedades. Os resultados mostraram valores similares para tração, tendendo a ser melhores no compósito revestido com verniz. Foi observado também que o material possui boas condições como retardante de fogo.

PAUL *et al.* (2015) desenvolveram e caracterizaram um “biocompósito” utilizando fibras de bananeira e matriz obtida a partir da seiva da bananeira, comparando com outra matriz sem a seiva. Os testes mecânicos mostraram um aumento significativo na resistência à tração e flexão, comparado ao compósito sem a seiva de bananeira. Os autores também descrevem a tendência de biodegradação do material.

RAI *et al.* (2015) desenvolveram um compósito biodegradável com látex natural obtido de plantas do gênero *euphorbia* utilizando fibras de bananeira com e sem tratamento alcalino em diferentes proporções. Entre os resultados foi observado um aumento da absorção de água com o aumento na proporção de fibras, obtidas propriedades físico-mecânicas e interface fibra/matriz superiores nos compósitos com as fibras que sofreram tratamento alcalino e a comprovação da biodegradação do material.

PANNU *et al.* (2019) desenvolveram um compósito biodegradável com fibras de bananeira em diferentes proporções e matriz de ácido polilático (PLA), obtido a partir do amido de plantas como o milho, beterraba e mandioca. Foi verificado um aumento das propriedades mecânicas comparando o PLA puro ao PLA com a adição das fibras e também um aumento no ponto de fusão do material.

LALY *et al.* (2003) desenvolveram compósitos com fibras de bananeira em diferentes proporções e matriz poliéster. Foram avaliadas as propriedades mecânicas através da influência de proporções de fibras, onde o material com proporção de 40% do peso apresentou os melhores resultados para os parâmetros avaliados.

VENKATESHWARAN *et al.* (2011) analisaram as propriedades mecânicas e absorção de água em compósitos com matriz epóxi utilizando fibras de bananeira com diferentes comprimentos e diferentes proporções em peso nos compósitos. Os melhores resultados foram obtidos nas fibras com comprimento de 15 mm e proporção de 16%. O aumento da proporção acima de 16% comprometeu a interface fibra/matriz. A absorção de água, para todos os parâmetros utilizados, apresentou valores de 5% em média. SUMAILA *et al.* (2013) em pesquisa similar concluíram que a absorção de água e as propriedades mecânicas melhoram com o aumento do comprimento das fibras, piorando a densidade.

VENKATESHWARAN *et al.* (2013) avaliaram as propriedades mecânicas de compósitos com e sem tratamento alcalino nas fibras de bananeira em várias proporções, utilizando matriz epóxi. Fibras tratadas na proporção de 1% com a solução alcalina obtiveram melhores resultados nas propriedades mecânicas, com uma melhoria de aproximadamente 50% das propriedades em relação a fibras não tratadas. Maiores concentrações da solução causaram danos à superfície das fibras.

ANIL *et al.* (2016) avaliaram as propriedades térmicas e mecânicas do compósito com matriz de polipropileno utilizando um processo anaeróbico de extração das fibras de bananeira e tratamento de superfície. Foi observada uma melhora na estabilidade térmica, dureza e propriedades elásticas nos compósitos com as fibras tratadas, porém a resistência ao impacto decresceu.

VIKASDHAWAN *et al.* (2017) desenvolveram e avaliaram as propriedades mecânicas de compósitos com matriz epóxi e diferentes tipos de fibras vegetais,

entre elas a de bananeira, com e sem tratamento de superfície e uma proporção constante de 40% de fibras no material. Os resultados mostraram uma melhoria das propriedades mecânicas com o tratamento e diminuição da resistência ao impacto.

D'SOUZA *et al.* (2017) avaliaram propriedades mecânicas, desgaste e absorção de água em compósitos com matriz epóxi, fibras de bananeira nas proporções de 4 e 5% em peso e 0,1% de carga de nano sílica. Os resultados mostraram que a adição da nano sílica melhorou a resistência ao desgaste do material, porém piorou sua dureza.

SOUZA *et al.* (2017) avaliaram a substituição de fibras de vidro por bananeira com matriz poliéster, propondo a utilização em elementos estruturais não submetidos a grandes esforços mecânicos como tanques para lavar roupas, calhas e tubulações de esgoto. Os autores avaliaram as propriedades térmicas e densidade, concluindo que o material obtido pode ser uma opção viável para o uso proposto.

A Tabela 3 mostra os valores de algumas propriedades de compósitos com fibras de bananeira, divididos entre matrizes naturais e sintéticas. Assim como em outros compósitos com fibras vegetais, as propriedades dos compósitos com fibras de bananeira também podem ser influenciadas por fatores como o tipo de matriz, sentido de orientação das fibras, comprimento, fração de volume, propriedades físicas e tratamentos das fibras. Comparando alguns dos resultados encontrados, percebe-se que os valores para os testes de flexão, tração a absorção de água apresentados em compósitos com matrizes de origem natural podem apresentar resultados similares ou até mesmo superiores comparados aos alcançados por matrizes de origem sintética.

**Tabela 3 - Valores das propriedades de compósitos com fibras de bananeira encontradas na literatura com matrizes naturais e sintéticas**

Origem	Matriz	Flexão (MPa)	Tração (MPa)	Absorção	Referência
Natural	Latéx <i>euphorbia</i>	7,2 - 19	3,8 – 7,2	6 - 56%	RAI <i>et al.</i> (2015)
	Borracha natural	-	3,6 – 4,1	-	GOPAKUMAR <i>et al.</i> (2016)
	Borracha natural	-	3,3 - 4	-	EZEMA <i>et al.</i> (2014)
	Seiva de bananeira	32,3	26,1	-	PAUL <i>et al.</i> (2015)
	Semente de tamarindo	-	3,97	6,9 – 7,8%	KIRUTHIKA <i>et al.</i> (2012)
	Ácido polilático (PLA)	17,65 – 24,67	19,31 – 28,37	-	PANNU <i>et al.</i> (2019)
	PU de mamona	13,65 – 53,98	1,92 – 10,12	-	MERLINI <i>et al.</i> (2011)
Sintética	Epóxi	≈20 - 60	16,39 – 57,53	5%	VENKATESHWARA N <i>et al.</i> (2011)
	Epóxi e nano sílica	-	-	≈ 3 - 7%	D'SOUZA <i>et al.</i> (2017)
	Poliéster	-	18,5 – 23,4	-	KALIDASS <i>et al.</i> (2015)
	Epóxi	≈ 35 - 70	≈ 10 - 35	-	VENKATESHWARA N <i>et al.</i> (2013)
	Epóxi	-	8,61 – 12,02	-	NAIDU <i>et al.</i> (2017)
	Epóxi	12,09 – 20,93	19,04 – 34,12	1,1 – 1,5%	MASROL <i>et al.</i> (2013)
	Polipropileno	-	32,8 – 41,7	-	ANIL <i>et al.</i> (2016)

Fonte: Autoria própria (2020)

## 2.5 Usinabilidade de compósitos com fibras vegetais

O conhecimento sobre a usinagem em compósitos poliméricos reforçados com fibras sintéticas é utilizado como ponto inicial para a aplicação nos compósitos reforçados com fibras vegetais (CFV), entretanto devido à variedade de fibras

vegetais existentes possíveis de serem utilizadas, com diferentes propriedades mecânicas, físicas, químicas e térmicas, não é possível uma aplicação direta destes conhecimentos. Características inerentes a estes materiais, como a anisotropia, não homogeneidade e a ligação fibra/matriz diferenciam sua usinagem de materiais homogêneos, como o metal. Os parâmetros e tipos de ferramentas a serem utilizados nas operações de usinagem devem levar em conta estes fatores para garantir a qualidade do produto final (NASSAR *et al.*, 2017).

Grande parte da fabricação dos CFV é realizada próximo da forma final (*near net shape*) do produto ou da peça. Projetos mais complexos criam a necessidade de separar o produto em partes para posteriormente efetuar montagens através de diferentes sistemas de fixação como parafusos e rebites. Em ambos os casos, a usinagem é utilizada para garantir a exatidão dimensional da peça ou para efetuar operações, como furação ou fresamento, que possibilitem a montagem e garantam a integridade estrutural do produto final (BABU *et al.*, 2013).

A qualidade final das peças ou produtos com CFV são influenciadas por fatores ligados aos seus processos de fabricação como imperfeições da matriz, vazios, regiões sobrecarregadas ou com pouca resina, rachaduras, bolhas e defeitos, e também a fatores associados à usinagem, como delaminação de camadas, deslocamento, arrancamento de fibras e avarias térmicas (GOHIL *et al.*, 2015).

Para a avaliação da usinabilidade de materiais compósitos, naturais ou sintéticos, podem ser utilizados parâmetros como as forças de corte, desgaste da ferramenta, tempo de vida da ferramenta, rugosidade, condições de corte, material e geometria da ferramenta (DAVIM *et al.*, 2010).

### 2.5.1 Furação em compósitos com fibras vegetais

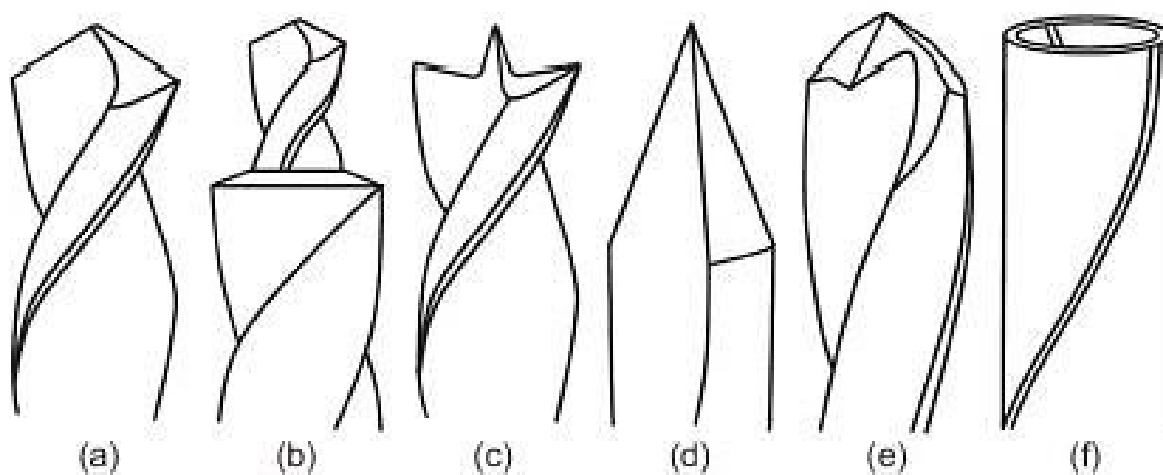
A furação é definida pela norma DIN 8589 (2003) como um processo de usinagem de remoção com movimento de corte circular onde a ferramenta possui um avanço no sentido do seu eixo de rotação (KLOCKE e KUCHLE, 2011). A furação apresenta características peculiares como a variação na velocidade de corte e do ângulo de inclinação ao longo da aresta de corte da ferramenta, denominada

broca. A velocidade é máxima na quina e se aproxima de zero na parte central da broca, denominada aresta transversal. (TRENT e WRIGHT, 2000).

Entre as operações de usinagem nos CFV, a furação convencional é uma das mais utilizadas, motivada principalmente pelo custo em relação a outros processos disponíveis como a furação com altas velocidades (*high-speed drilling*) ou furação por vibração assistida (*vibration-assisted twist drilling*). Devido às características específicas dos CFV, a furação é considerada uma operação crítica (NASSAR *et al.*, 2017; LOTFI *et al.*, 2019).

A Figura 13 ilustra os diferentes modelos de brocas que são utilizados em pesquisas de furação nos CFV, entre elas a helicoidal (Figura 13a), escalonada (Figura 13b), três pontas (*brad point*) (Figura 13c), formão (*dagger*) (Figura 13d), multifacetada (Figura 13e) e trepanação (Figura 13f), com diferentes ângulos de ponta e fabricadas com diferentes materiais, como o aço rápido, metal duro com e sem revestimento e diamante policristalino (LOTFI *et al.*, 2019). Na literatura não são encontrados estudos sobre os materiais e revestimentos das brocas utilizadas na furação de CFV. Devido à natureza experimental das pesquisas e de recursos disponíveis, a maioria destes trabalhos utilizam brocas de aço rápido e metal duro sem revestimentos, em função da disponibilidade e por serem modelos de ferramentas utilizados para furação de diferentes materiais (NASSAR *et al.*, 2017).

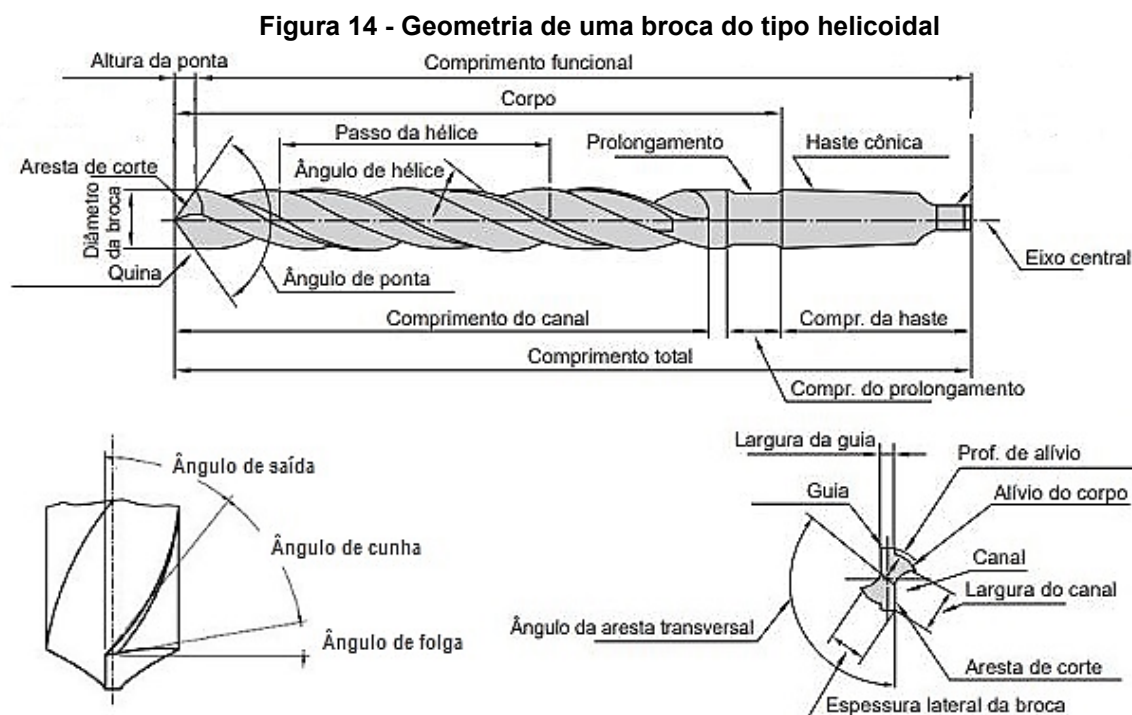
**Figura 13 - Modelos de brocas utilizadas na furação de CFV: (a) helicoidal; (b) escalonada; (c) três pontas (*brad point*); (d) formão (*dagger*); (e) multifacetadas; (f) trepanação**



Fonte: Schulze *et al.* (2011)



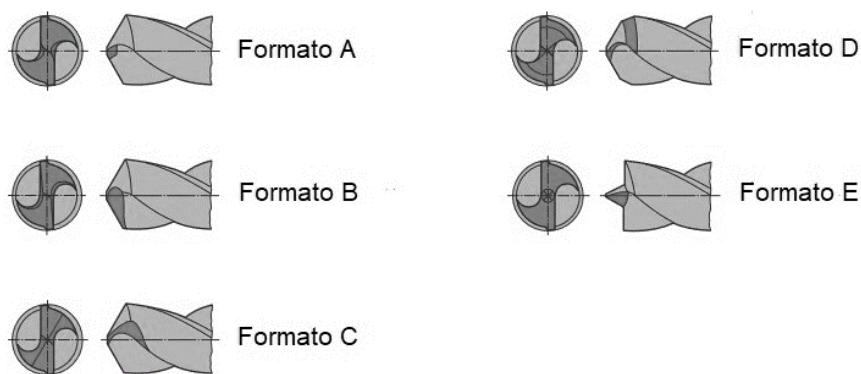
As brocas helicoidais convencionais são ferramentas que possuem duas ou mais arestas cortantes que operam com diferentes ângulos e possuem canais para saída dos cavacos orientados pelo ângulo de hélice (SHAW, 2005). Os diferentes tipos e definições geométricas deste modelo de broca (Figura 14) são descritos pelas normas ABNT NBR ISO 5419 (2009), ABNT NBR ISO 3002-1 (2013), DIN 1836 (1984) e DIN 1412 (2001).



Fonte: adaptado de Mitsubishi Materials (2021) e ABNT NBR ISO 3002-1 (2013)

Segundo o ângulo de hélice, as brocas podem ser classificadas em três tipos (N, H e W), que podem variar de 18 até 45°. O ângulo de ponta é obtido através de diferentes afiações, representadas por letras conforme Figura 15. Estes formatos são utilizados em função do material a ser furado visando reduzir principalmente os esforços de corte. Nas furações em CFV, é encontrada na literatura utilização de brocas com ângulos de ponta de 80° até 130° (LOTFI *et al.*, 2019).

**Figura 15 – Tipos especiais de afiações de ponta em brocas helicoidais**



**Fonte: adaptado de Guhring, Inc. (2022)**

Na furação de compósitos com fibras vegetais ou sintéticas, o ângulo de ponta e a aresta transversal influenciam na qualidade do furo. Em função destes ângulos a parte central da broca (aresta transversal) pode não executar o corte criando um processo de arrancamento ou extrusão do material, aumentando as forças envolvidas e influenciando na delaminação dos compósitos (GEIER, 2019; PATEL *et al.*, 2015; KHASHABA, 2013).

As brocas helicoidais parabólicas se diferenciam das convencionais nas dimensões dos espaços para saída dos cavacos, melhorando sua retirada. Estas brocas com ângulos de hélice maiores que  $30^\circ$  tendem a melhorar ainda mais esta condição (STEPHENSON e AGAPIOU, 2016).

Brocas escalonadas possuem diferentes diâmetros ao longo do seu corpo, iniciando por uma medida menor seguida pela maior. O diâmetro menor termina nas arestas de corte do maior, compartilhando o mesmo ângulo de hélice e núcleo (STEPHENSON e AGAPIOU, 2016). Este formato proporciona uma redução na força axial da furação por reduzir o efeito de indentação causada pela ponta das brocas convencionais (DURÃO *et al.*, 2010).

As brocas de três pontas (*brad point*) ou em “w” seguem as normas DIN 1412 (2001) com o formato “E”. Elas possuem um ponto central com ângulo de geralmente  $90^\circ$  e arestas de corte ligeiramente côncavas. As quinas funcionam como uma ferramenta de trepanação. O comprimento do ponto central é geralmente igual a 20% a 30% do diâmetro da broca (STEPHENSON e AGAPIOU, 2016). Em materiais reforçados com fibras apresentam excelentes resultados na delaminação devido ao processo denominado “corta e empurra” da ferramenta. As quinas

primeiramente cortam as fibras da camada e as arestas de corte empurram esta camada, minimizando o número de fibras não cortadas e o efeito de delaminação (GEIER *et al.*, 2019).

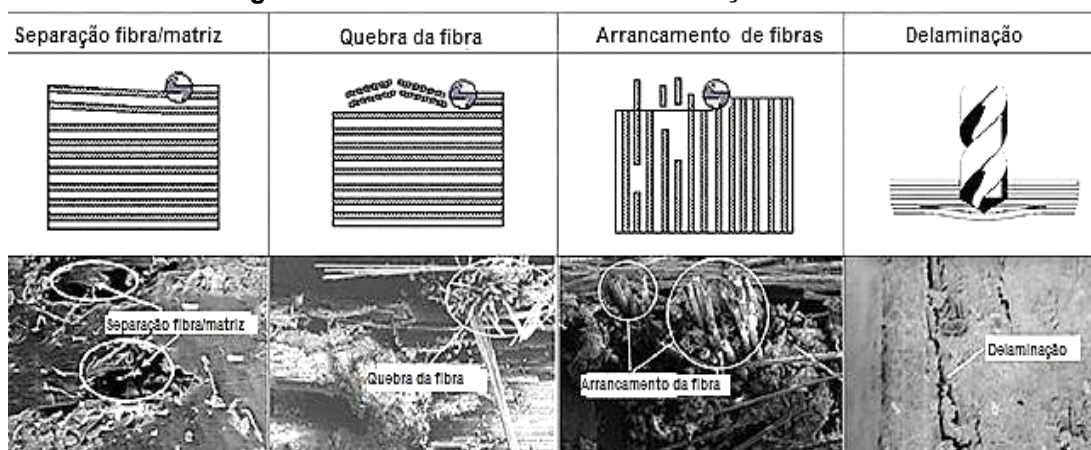
As brocas com afiação de corte tipo formão (*dagger*) são ferramentas especiais com ângulo de ponta duplo e canais de saída de cavaco retos (GEIER *et al.*, 2019). Possuem a ponta afiada normalmente a 30°, executando o corte logo após o contato com a superfície do material. Não são adequadas para uso em situações com espaço limitado na saída da furação e a capacidade de remoção dos cavacos é deficiente (DE ALBUQUERQUE *et al.*, 2008).

Nas brocas multifacetadas são criadas facetas ou superfícies de alívio nas arestas de corte para reduzir os esforços de corte e a delaminação. Podem ser criados diferentes números de facetas, porém uma quantidade muito grande pode comprometer a capacidade de corte da ferramenta (STEPHENSON e AGAPIOU, 2016; RAJ *et al.*, 2013).

As brocas de trepanação executam o corte apenas na periferia do furo, preservando o núcleo do centro. Podem ser consideradas mais eficientes do que outros modelos porque em geral cortam menos quantidade de material e conseqüentemente requerem menores capacidades de potência. São usadas com mais frequência em furos maiores que 40 mm de diâmetro, mas estão disponíveis em brocas de até 12 mm de diâmetro (STEPHENSON e AGAPIOU, 2016).

Entre os defeitos mais frequentes que afetam a qualidade na usinagem dos furos estão a separação da fibra/matriz, quebra ou lascamento das fibras (*splintering*), arrancamento das fibras e a delaminação de camadas (Figura 16).

**Figura 16 - Defeitos relacionados a furação dos CFV**



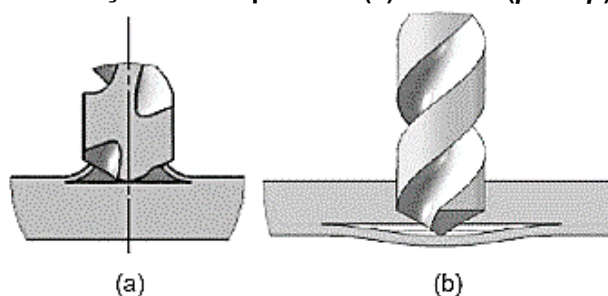
Fonte: Lotfi *et al.* (2019)

A quebra ou lascamento de fibras pode comprometer a qualidade interna do furo e interferir na passagem de dispositivos de montagem, dependendo do grau da avaria (NASSAR *et al.*, 2017).

A delaminação é considerada o problema mais crítico na furação de compósitos poliméricos, sejam eles com fibras sintéticas ou naturais (DURÃO *et al.*, 2014; PATEL *et al.*, 2015). Pode acontecer tanto na entrada (*pell-up*) quanto na saída (*push-down*) do compósito e ser relacionada com as forças de usinagem envolvidas no processo da furação no material (CHANDRAMOHAN *et al.*, 2011). A Figura 17 demonstra de que forma ocorre este processo na furação de um compósito pela ação da broca. A delaminação na camada superior (*pell-up*) acontece quando a broca inicia a penetração no material e suas arestas cortantes entram em contato com a superfície (Figura 17a). Uma força de delaminação (*peeling force*) é gerada na direção axial da broca através de suas ranhuras, resultando na separação das camadas de fibras e na criação de uma zona de delaminação na superfície superior, comprometendo a qualidade de corte nas bordas da entrada do furo. A intensidade deste processo é influenciada principalmente pela velocidade de corte e do ângulo de ponta da broca.

Na camada inferior (*push-down*) a delaminação acontece quando a broca se aproxima da saída (Figura 17b). Com esta aproximação, a espessura vai se tornando mais fina e sua resistência à deformação piora, até que em determinado momento a força de avanço excede a força de ligação fibra/matriz causando a delaminação. Isto acontece em função principalmente da força de avanço e diâmetro da broca utilizada (CHANDRAMOHAN *et al.*, 2011; DURÃO *et al.* 2014).

**Figura 17 - Delaminação na furação de compósitos: (a) entrada (*pell-up*); (b) saída (*push-down*)**

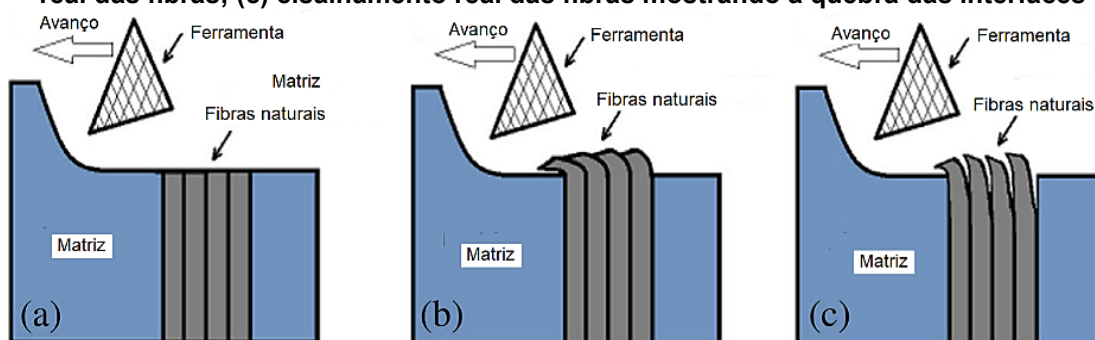


**Fonte: Durao *et al.* (2014)**

A delaminação e o lascamento das fibras (*splintering*) durante os processos de usinagem em CFV também são influenciados pelo comportamento viscoelástico

das fibras vegetais, conforme ilustrado na Figura 18. Quando as fibras entram em contato com a aresta de corte deformam-se e impedem a fratura adequada, frequentemente quebrando a interface fibra/matriz. Ao retornarem à posição podem forçar o deslocamento das camadas externas do compósito e resultar em fibras não fraturadas adequadamente sobre a área usinada (CHEGDANI *et al.*, 2015).

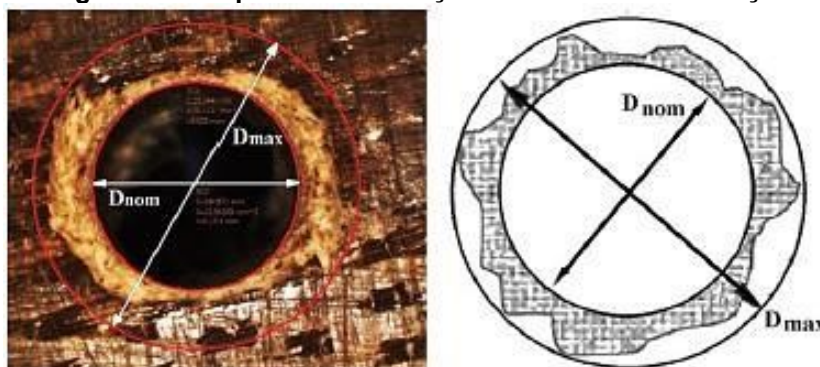
**Figura 18 - Mecanismo do corte das fibras nos CFV: (a) cisalhamento ideal; (b) cisalhamento real das fibras; (c) cisalhamento real das fibras mostrando a quebra das interfaces**



Fonte: Chegdani *et al.* (2015)

A avaliação da delaminação em CFV é considerada um processo complexo, principalmente devido à coloração similar das fibras e da matriz, que dificultam a inspeção visual da furação executada. Diferentes abordagens dimensionais e não dimensionais são encontradas na literatura para avaliar o grau de delaminação, entre elas o fator de delaminação unidimensional ( $F_d$ ), que utiliza as medidas dos danos causados no furo em relação às medidas nominais do mesmo (Figura 19). Entre as técnicas mais acessíveis utilizadas para as medições estão as projeções de perfil, microscopia e escaneamento (NASSAR *et al.*, 2017).

**Figura 19 - Esquema de avaliação do fator de delaminação**



Fonte: Lotfi *et al.* (2019)

As equações que utilizam somente a extensão da delaminação podem apresentar valores mais altos porque apenas algumas fibras delaminadas podem aumentar o raio ou o diâmetro utilizado no cálculo (LIU *et al.*, 2012). Métodos que utilizam a área das avarias são mais precisos em termos de resultados, conforme proposto por DAVIM *et al.* (2007), VENKATESHWARAN e PERUMAL (2013) e ELLENBERGER *et al.* (2022) em seus trabalhos, onde a área danificada foi obtida através de diferentes técnicas de processamento das imagens dos furos.

A Figura 20 mostra o processo de determinação da área avariada na furação de um compósito através de processamento de imagens utilizado por DAVIM *et al.* (2007). A imagem foi tratada em um software gráfico através de diferentes parâmetros disponíveis como a intensidade do brilho, aprimoramento da imagem, filtro limite e detecção de bordas até que a área pudesse ser medida.

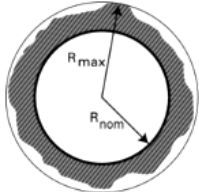
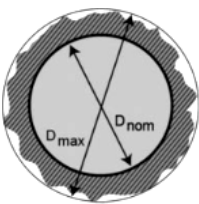
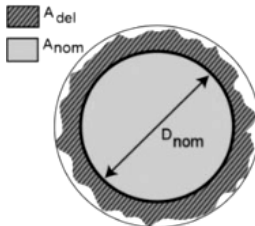
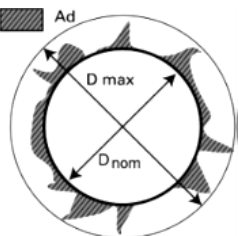
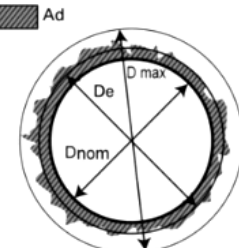
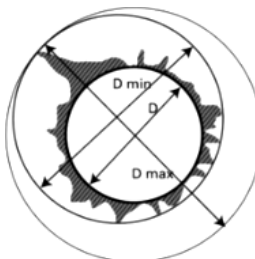
**Figura 20 - Operação de processamento da imagem para determinar a área danificada: (a) imagem digital; (b) processamento inicial; (c) imagem final**



Fonte: Davim *et al.* (2007)

Na literatura são encontradas diferentes equações e métodos utilizados por pesquisadores para medir a delaminação na furação dos CFV. A Figura 21 mostra algumas equações propostas por pesquisadores para esta medição (BABU *et al.*, 2016).

**Figura 21 - Métodos utilizados na literatura para cálculo do fator de delaminação**

Métodos de avaliação	Fórmula	Esquema gráfico
Tamanho da delaminação ( $S_d$ )	$S_d = R_{\max} - R_{\text{nom}}$ <p>onde:  <math>R_{\max}</math> = raio máximo da delaminação  <math>R_{\text{nom}}</math> = raio nominal do furo</p>	
Fator de delaminação unidimensional ( $F_d$ )	$F_d = \frac{D_{\max}}{D_{\text{nom}}} \text{ ou } F_d = \frac{A_{\max}}{A_{\text{nom}}}$ <p>onde:  <math>F_d</math> = fator de delaminação  <math>D_{\max}</math> = diâmetro máximo da avaria  <math>D_{\text{nom}}</math> = diâmetro nominal do furo  <math>A_{\max}</math> = área máxima da avaria  <math>A_{\text{nom}}</math> = área nominal do furo</p>	
Fator de delaminação bidimensional ( $F_a$ )	$F_a = \left( \frac{A_{\text{del}} - A_{\text{nom}}}{A_{\text{nom}}} \right) \%$ <p>onde:  <math>A_{\text{del}}</math> = área delaminada  <math>A_{\text{nom}}</math> = área nominal do furo</p>	
Fator de delaminação ajustado ( $F_{da}$ )	$F_{da} = F_d + \frac{A_d (F_d^2 - F_d)}{A_{\max} - A_{\text{nom}}}$ <p>onde:  <math>F_d</math> = fator de delaminação  <math>A_d</math> = área delaminada  <math>A_{\max}</math> = área máxima  <math>A_{\text{nom}}</math> = área nominal do furo</p>	
Fator de delaminação equivalente ( $F_{ed}$ )	$F_{ed} = \left( \frac{4 (A_d + A_{\text{nom}})}{\pi (D_{\text{nom}})^2} \right)^{0.5}$ <p>onde:  <math>A_d</math> = área delaminada  <math>A_{\text{nom}}</math> = área nominal do furo  <math>D_{\text{nom}}</math> = diâmetro nominal do furo</p>	
Fator de delaminação refinado ( $F_{dr}$ )	$F_{dr} = \frac{D_{\max}}{D_{\text{nom}}} + 1.783 \left( \frac{A_H}{A_{\text{nom}}} \right) + 0.7156 \left( \frac{A_M}{A_{\text{nom}}} \right)^2 + 0.03692 \left( \frac{A_L}{A_{\text{nom}}} \right)^3$ <p>onde:  <math>D_{\max}</math> = diâmetro máximo da avaria  <math>D_{\text{nom}}</math> = diâmetro nominal do furo  <math>A_{\text{nom}}</math> = área nominal do furo  <math>A_H</math> = área de avarias pesadas  <math>A_M</math> = área de avarias médias  <math>A_L</math> = área de avarias baixas</p>	

Fonte: Babu et al. (2016)

Estas equações levam em consideração as medições do diâmetro ou raio da avaria em relação à medida do diâmetro do furo ou analisam a área delaminada. Um

método proposto para determinar o fator de delaminação denominado fator de delaminação refinado leva em consideração diferentes áreas de avarias, consideradas de danos baixos, médios ou pesados. A partir destas informações é utilizado o teorema de Buckingham com parâmetros obtidos a partir de análise de imagens das avarias capturadas por algoritmos envolvendo redes neurais no software *MATLAB* (NAGARAJAN e RAJADURAI, 2012).

A delaminação na furação dos CFV é fortemente influenciada pelos parâmetros de usinagem e pelo modelo da broca utilizada. Pesquisas mostram que a delaminação tem uma relação direta com diferentes avanços e velocidades de corte, devido à influência das forças envolvidas (LOTFI *et al.*, 2019).

REZGHI MALEKI *et al.* (2019) afirmaram em seu trabalho que existe uma relação entre uma redução na delaminação com o aumento da velocidade de corte, e conseqüentemente menores forças de avanço. Os autores afirmaram que as velocidades mais altas levaram a forças mais baixas, de acordo com o princípio geral da usinagem em altas velocidades (*high-speed machining*). Estas forças de avanço inferiores resultaram em menores valores de delaminação e avarias na furação do compósito pesquisado no trabalho. No entanto, outras pesquisas mostraram que a delaminação aumenta com o aumento da velocidade de corte. Essas diferenças estão ligadas a diferentes questões como um maior desgaste da ferramenta em velocidades de corte mais altas como também elevação das forças de corte envolvidas principalmente no sentido axial e o aumento do volume da retirada de cavacos pelos canais da broca, que pode até ficar bloqueada (BABU *et al.*, 2012; VENKATESHWARAN e PERUMAL, 2013; RAMESH *et al.*, 2014).

NASSAR *et al.* (2017) afirmam que em geral velocidades de corte mais altas, avanço mais baixo, diâmetros de brocas menores e com ângulo de ponta de 118° resultam em furos com menos delaminações ou defeitos.

LOTFI *et al.* (2019) em seu trabalho descreve a dificuldade na seleção de parâmetros específicos para a furação de compósitos com fibras vegetais devido à utilização de diferentes tipos e origens das fibras e aos diferentes processos de fabricação utilizados pelos autores em suas pesquisas.

O Quadro 2 mostra resultados de pesquisas encontrados na literatura sobre a furação em CFV. Este quadro descreve o tipo da fibra e da matriz utilizado na fabricação do compósito, modelos e especificações das brocas utilizados e as principais conclusões dos autores sobre os resultados obtidos.



**Quadro 2 - Especificações e resultados de pesquisas na furacão dos CFV**

Fibra/Matriz	Manufatura	Geometria	Ângulo ponta	∅	Material	Conclusões da pesquisa	Fonte
Juta / Epóxi	Manual	Helicoidal	118°	8	Aço rápido	Avanço de 0,15 mm e 1250 rpm com a broca helicoidal resultou em menor delaminação	REZGHI MALEKI <i>et al.</i> (2019)
		<i>CoroDrill</i> 854	130°		Metal duro		
		<i>CoroDrill</i> 856	130°		Metal duro		
Bambu/Epóxi	Moldagem por compressão	Helicoidal	103° 108° 113° 118°	8	Aço rápido	A menor força de avanço foi obtida com 0,02 mm de avanço e 1500 rpm. Com a broca de ponta 118°	MAZUMDER <i>et al.</i> (2016)
Cânhamo/PCL (Policaprolactona)	Extrusão	Helicoidal	118°	5, 10	Aço rápido	Menor delaminação para velocidade de corte de 20 m/min, avanço de 0,10 mm e diâmetro da broca de 5 mm	ISMAIL <i>et al.</i> (2016)
Juta/Polipropileno	Moldagem por compressão	Helicoidal, Parabólica e Escalonada	118°	8	Metal duro	Broca parabólica mostrou o melhor comportamento de corte	YALLEW <i>et al.</i> (2016)
Sisal/Epóxi	Molde de transferência (RTM)	Parabólica 4 facetas, parabólica e escalonada	NI *	8	Metal duro	Menor força de avanço e delaminação com a broca parabólica	DEBNATH <i>et al.</i> (2014)
Sisal / PLA (Ácido polilático)	Moldagem por compressão	Parabólica, helicoidal, escalonada	118°	8	Metal duro	Delaminação máxima com a broca escalonada	BAJPAI <i>et al.</i> (2017)
Coco / Poliéster	Manual	Helicoidal	118°	6, 8, 10	Aço rápido	Broca com 8 mm diâmetro, avanço de 0,35 mm e 600 rpm para otimizar força de corte, avanço e desgaste da ferramenta	KUMAR <i>et al.</i> (2017)
Casca de arroz/poliéster	Manual	Helicoidal, Três pontas, Fresa de topo	118°	6	Metal duro	Menor delaminação foi observada com a broca helicoidal	AZUAN <i>et al.</i> (2012)
Juta, linho e algodão/PLA	Moldagem por compressão	Helicoidal	80° e 118°	3, 5, 6	Aço rápido	Ângulo de ponta menor resultou em menores avarias. Aumento da velocidade de corte e avanço diminuíram os defeitos	DÍAZ-ÁLVAREZ <i>et al.</i> (2018)
Linho / PLA	Moldagem por compressão	Helicoidal	118°	4, 8	Aço rápido	Melhor qualidade de furo com 3000 rpm,, avanço de 0,11 mm/rrot e broca com diâmetro 5 mm. Força de avanço e a delaminação aumentam com a elevação do avanço	LOTFI <i>et al.</i> (2018)

Fonte: Lotfi *et al.* (2019)

A rugosidade também é utilizada para avaliação da qualidade na furação dos CFV. Este parâmetro mostra o nível de irregularidade das paredes após o processo e pode influenciar os mecanismos de fluência, desgaste, fadiga e corrosão, influenciando no desempenho do produto final (ISMAIL *et al.*, 2016b).

Diversos estudos avaliaram a influência dos parâmetros de usinagem para a melhoria da rugosidade, verificando-se um melhor acabamento de superfície para velocidades de corte mais altas com velocidades de avanço mais baixas. Os resultados também indicam que, em baixo avanço, os valores da rugosidade sobem com o aumento do diâmetro da broca, devido a um aumento na força de avanço e do torque, bem como na temperatura gerada ao redor da aresta da ferramenta, que compromete a estabilidade da matriz e cria cortes irregulares (LOTFI *et al.*, 2019). Porém, este aumento de temperatura pode resultar em uma melhor rugosidade quando ela atingir a temperatura de transição do compósito ( $T_g$ ), na qual o compósito passará de um estado vítreo para um estado borrachoso. Nesta fase a matriz pode deformar-se facilmente criando uma melhor superfície de corte (ELSONBATY *et al.*, 2004).

No trabalho de REZGHI MALEKI *et al.* (2019) foram avaliados os valores da rugosidade na furação de um compósito com fibras de juta e matriz epóxi, comparando três diferentes tipos de brocas helicoidais com diferentes avanços e velocidade de corte. Os autores afirmam que a geometria da ferramenta é o fator que mais influencia na rugosidade da superfície e que a força de avanço não influencia este parâmetro. Também foi observado o aumento da geração de calor com o aumento da velocidade de corte devido à baixa condutividade térmica dos compósitos poliméricos. Este calor se concentra ao redor da parede do furo gerando uma deformação plástica da matriz e reduz as forças de usinagem envolvidas.

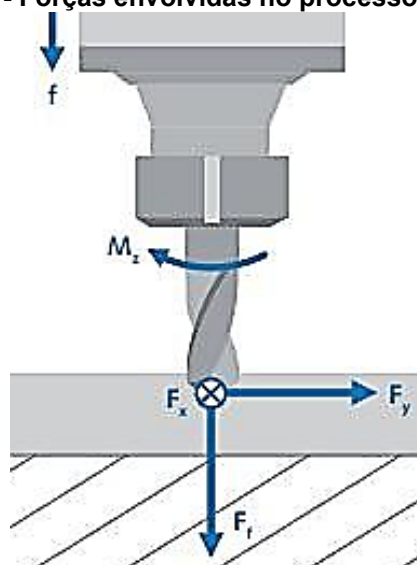
Em geral, velocidades de corte mais altas, avanços mais baixos, brocas com diâmetros menores e ângulos de ponta menores apresentam melhores resultados em termos de rugosidade (KHASHABA *et al.*, 2010). A menor homogeneidade dos CFV em relação a materiais como os metálicos, devido à diferença entre a fibra e a matriz, também deve ser levada em consideração. Esta característica leva à formação de superfícies mais rugosas no processo de furação (REZGHI MALEKI *et al.*, 2019).

Entre as principais forças atuantes nos processos de furação dos CFV investigadas na literatura estão a força de avanço e o torque, relacionadas aos

parâmetros de usinagem como a velocidade de corte e o avanço, geometria da broca, rigidez da ferramenta e do tipo de equipamento utilizado para a furação (NASSAR *et al.*, 2017).

As forças atuantes nas brocas geram esforços de torção devido à rotação da broca e de compressão devido ao seu avanço, podendo-se estimar os esforços de corte no processo de furação através do momento torçor ( $M_z$ ) e da força de avanço ( $F_f$ ) (Figura 22). Estas forças podem ser medidas através de um dinamômetro (DINIZ *et al.*, 2010).

Figura 22 - Forças envolvidas no processo de furação



Fonte: Kistler (2020)

Entre as causas da delaminação em compósitos poliméricos, a força de avanço, que aumenta com a elevação do avanço, é considerada a principal (NASSAR *et al.*, 2017). As diferentes geometrias de brocas utilizadas em pesquisas também afetam as forças envolvidas na furação dos CFV (YALLEW *et al.*, 2016; BAJPAI *et al.*, 2017).

O trabalho de YALLEW *et al.* (2016) investigou a furação em um compósito com tecido de juta e matriz polipropileno utilizando diferentes modelos de brocas, indicando uma significativa diferença na força de avanço entre elas.

CHANDRAMOHAN *et al.* (2011) avaliaram os resultados da furação em diferentes compósitos com fibras naturais. Os autores afirmaram que apesar do incremento nos parâmetros de furação aplicados e o conseqüente aumento nas forças de avanço e desgaste da ferramenta, os valores dos resultados não foram

alterados significativamente, tanto na entrada quanto na saída dos furos. Os autores também citaram a influência do volume de fibras utilizado nos compósitos nas forças de corte. Um volume mais alto de fibras aumenta os valores das propriedades físico-mecânicas do compósito resultando numa maior resistência ao corte.

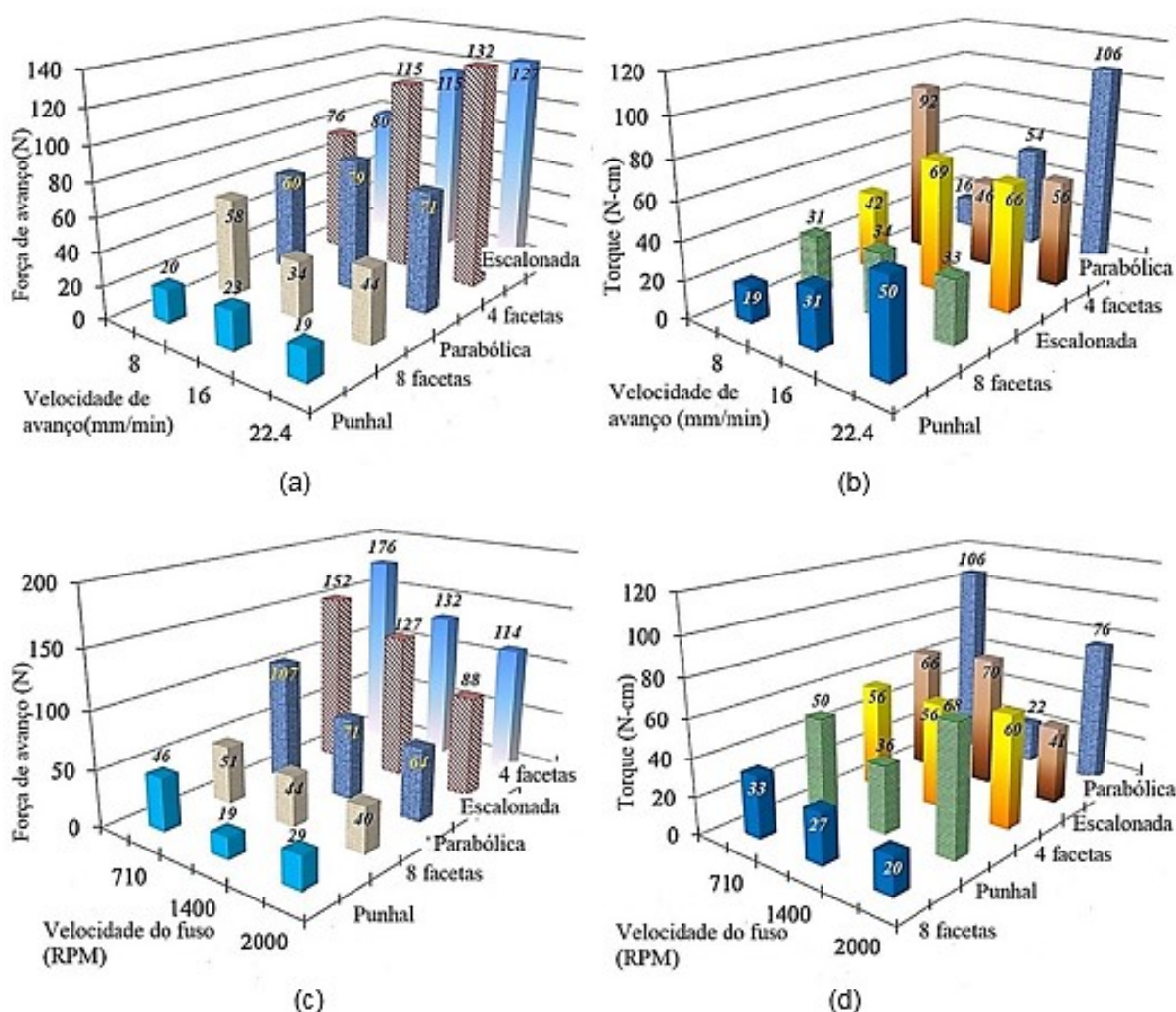
DEBNATH *et al.* (2014) avaliaram a furação em compósitos com fibras de sisal e matrizes epóxi e polipropileno, verificando a influência da geometria de diversas brocas, avanço e velocidade de corte nas forças de usinagem. Como conclusão eles afirmaram que as forças de furação diminuem com a elevação da velocidade de corte e aumentam com o incremento no avanço para todos os modelos de brocas utilizadas. Eles também afirmaram que o tipo da matriz influencia no comportamento da furação.

BAJPAI *et al.* (2013) analisaram a influência da geometria da broca, avanço e velocidade de corte nas forças de furação de um compósito com sisal e polipropileno. Concluíram que a geometria da broca é o fator que mais afetou nas forças envolvidas.

CHOUDHURY *et al.* (2018) investigaram a furação de compósitos com fibras de urtiga (*girardinia diversifolia*) e matriz epóxi utilizando brocas do tipo escalonada e parabólica, já descritas anteriormente e também os modelos punhal, quatro e oito facetas. A broca modelo punhal (dagger) é semelhante ao modelo formão, com ângulo de ponta duplo normalmente à 30° e canais para saída de cavacos retos. As brocas com quatro ou oito facetas seguem os princípios do modelo multifacetado descrito anteriormente buscando-se reduzir a força de avanço com a redução ou eliminação da aresta transversal através de retificações na superfície principal de folga da ferramenta. Diferentes parâmetros de usinagem foram aplicados e foram avaliadas as forças, delaminação, rugosidade e a influência da temperatura no processo. Os resultados mostraram que as maiores velocidades de avanço foram responsáveis pelos maiores valores de forças de avanço e corte. Com o aumento da velocidade de corte a força de avanço reduziu. Os melhores resultados para delaminação e rugosidade foram alcançados com os menores avanços. Os autores explicam que com o aumento do avanço, mantendo a mesma velocidade de corte, os volumes de material a serem cortados aumentam, elevando a resistência ao corte que conseqüentemente aumentam as forças de avanço e de corte necessária para a ação (Figura 23a e 23b). Quando a velocidade de corte é aumentada as forças diminuem devido a um aumento da temperatura na zona de corte que reduz a

dureza da matriz, facilitando e minimizando as forças necessárias para a furação (Figura 23c e 23d). Esta tendência é similar à apontada por DEBNATH *et al.* (2014) na sua pesquisa. Eles também apontam que a combinação de um baixo avanço, velocidade de corte alta e brocas modelo parabólica reduziram as forças de usinagem.

**Figura 23 - Forças envolvidas na furação de compósitos com fibras vegetais: (a) força de avanço em relação à velocidade de avanço com 1400 rpm; (b) torque em relação à velocidade de avanço com 710 rpm; (c) força de avanço em relação à rotação com avanço de 22,4 mm/min; (d) torque em relação à rotação com avanço de 22,4 mm/min**



Fonte: Choudhury *et al.* (2018)

DEBNATH *et al.* (2014) também comparam o processo de furação das brocas helicoidal com ângulo de ponta  $118^\circ$  e do modelo formão com ângulo de ponta  $30^\circ$ , ambas com 8 mm de diâmetro. Segundo eles, as forças de furação são influenciadas pelo efeito de indentação causado pela aresta transversal da broca,

responsável por aproximadamente metade do total das forças de avanço no processo. A broca do tipo formão por possuir um ângulo de ponta menor, reduz este efeito. Outra observação dos autores é de que a broca tipo formão não tem canal helicoidal como a modelo helicoidal tradicional, o que proporciona a este modelo um ângulo de inclinação constante em todo comprimento da aresta de corte, facilitando uma ejeção mais rápida dos cavacos. Na broca helicoidal, devido à geometria das arestas de corte estarem relacionadas com o ângulo de hélice dos canais, existe uma variação de ângulos nestas arestas, o que pode levar ao aumento das forças de corte envolvidas. A influência da geometria da broca também é citada no trabalho de BAJPAI *et al.* (2017). Eles afirmaram que a broca do tipo parabólica gerou menores valores de forças comparadas aos outros modelos utilizados na pesquisa.

GOKUL *et al.* (2018) investigaram as forças de usinagem envolvidas na furação de compósitos com fibras de cana de açúcar e matriz poliéster em diferentes proporções utilizando uma broca helicoidal de aço rápido com diferentes parâmetros de usinagem. Os resultados mostraram que o aumento do avanço elevou as forças de avanço e com o aumento da velocidade de corte estas forças reduziram.

O mecanismo de desgaste da ferramenta durante o processo de usinagem também pode ser utilizado para determinar a usinabilidade de um material, influenciando na qualidade da furação. A escolha do material da ferramenta, sua geometria e os parâmetros de usinagem são fatores que afetam este desgaste. Apesar de poucos estudos na literatura sobre o tipo mais adequado de material das brocas na furação dos CFV, o aço rápido e o metal duro, com diferentes geometrias, têm sido usados pela maioria dos pesquisadores em seus trabalhos devido à disponibilidade comercial e o uso para outros materiais (NASSAR *et al.*, 2017).

Entre as principais causas do comprometimento das brocas estão o aumento da temperatura na região do corte e a abrasividade das fibras naturais, que nos CFV é bem menor comparada às fibras sintéticas. Este comprometimento ocorre principalmente nas arestas de corte na forma de desgaste, lascamento e adesão de material, aumentando forças de corte necessárias e comprometendo a qualidade do furo (LOTFI *et al.*, 2019).

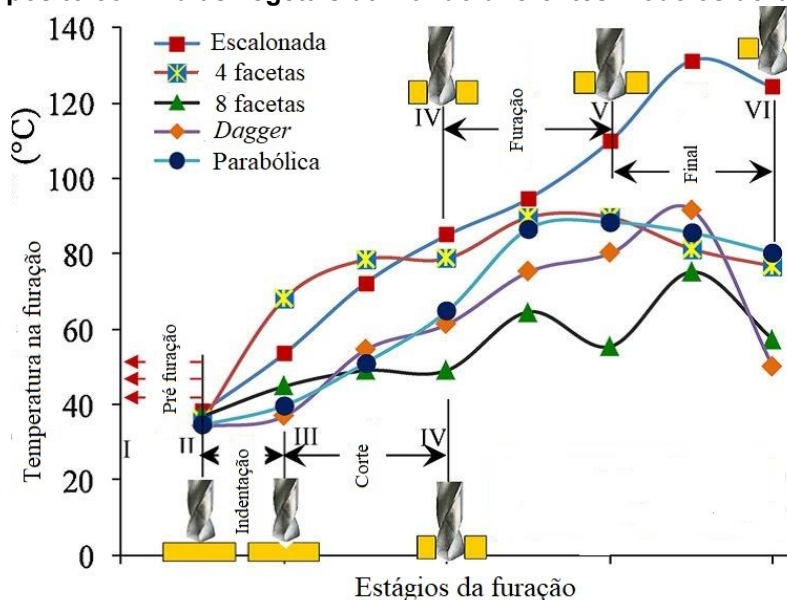
JAYABAL *et al.* (2011) avaliaram o desgaste de brocas na furação de compósitos híbridos de fibras de coco e de vidro. Os autores afirmaram que o avanço é o principal fator que contribui no desgaste das brocas e que estes valores

são menores comparadas a compósitos com fibras sintéticas, mais abrasivas e resistentes ao corte.

DEBNATH *et al.* (2017) investigaram a furação em compósitos da planta urtiga com matriz polipropileno. Eles afirmaram que o uso de ferramentas de metal duro é o mais indicado devido a sua maior resistência ao desgaste. Também afirmaram que os conhecimentos na furação de compósitos com fibras sintéticas não podem ser diretamente utilizados para CFV devido às diferentes propriedades dos materiais.

CHOUDHURY *et al.* (2018) avaliaram em seu trabalho a variação de temperatura no processo de furação com diferentes brocas (Figura 24) em compósitos com fibras de urtiga (*girardinia diversifolia*) e matriz epóxi. Eles afirmaram que quando a temperatura da furação ultrapassa a temperatura de transição vítrea da matriz ocorre um amolecimento do material, fazendo com que a resistência ao corte seja menor comparada à matriz curada. No entanto, pode ocasionar uma adesão de material nas arestas de corte.

**Figura 24 - Variação de temperatura nos diferentes estágios do processo de furação em um compósito com fibras vegetais utilizando diferentes modelos de brocas**



Fonte: Choudhury *et al.* (2018)

Segundo NASSAR *et al.* (2017), os tipos de cavacos gerados na furação de compósitos reforçados com fibras vegetais podem ser utilizados para determinar a sua usinabilidade e estão principalmente relacionados com os parâmetros de usinagem e as propriedades do material, porém ainda são escassos os trabalhos

que analisam estes cavacos. Alguns trabalhos sobre a furação em compósitos com fibras sintéticas citam que a formação de cavacos contínuos oriundos de velocidades de corte mais baixas resultam em um acabamento superficial superior em relação aos cavacos descontínuos (HOECHENG *et al.*, 1992; LOPEZ-ARRAIZA *et al.*, 2012).

NASSAR *et al.* (2017) comentaram que as propriedades relacionadas à matriz do compósito, como a tenacidade e ductibilidade, vão influenciar também na geração do cavaco. Segundo os autores a geração de cavacos contínuos evita a formação de trincas por executar um cisalhamento e cavacos descontínuos comprometem a qualidade do furo por contribuir com o arrancamento ou fratura das fibras.

DEBNATH *et al.* (2014) analisaram os cavacos gerados na furação de compósitos com fibras vegetais utilizando matrizes epóxi e polipropileno com diferentes tipos de brocas (Figura 25). Comparando os cavacos gerados pelo mesmo tipo de broca e parâmetros de corte nos dois tipos de compósitos, os provenientes da matriz polipropileno foram mais longos e contínuos (Figura 25a, 25b e 25c) em relação à matriz epóxi, mais curtos e descontínuos (Figura 25d, 25e e 25f). Os autores afirmaram que o principal fator que influencia nos tipos de cavacos são as propriedades do material utilizado como matriz.

**Figura 25 – Cavacos gerados na furação de compósito com fibras vegetais: (a-c) matriz polipropileno/sisal; (d-e) matriz epóxi/sisal**



Fonte: Debnath *et al.* (2014)



JAYABAL *et al.* (2011) analisaram os cavacos na furação de um compósito com fibras de coco e matriz poliéster. Os autores citam a influência dos parâmetros de corte na geração dos tipos de cavacos, onde cavacos contínuos foram observados nas menores velocidades de corte e avanço.

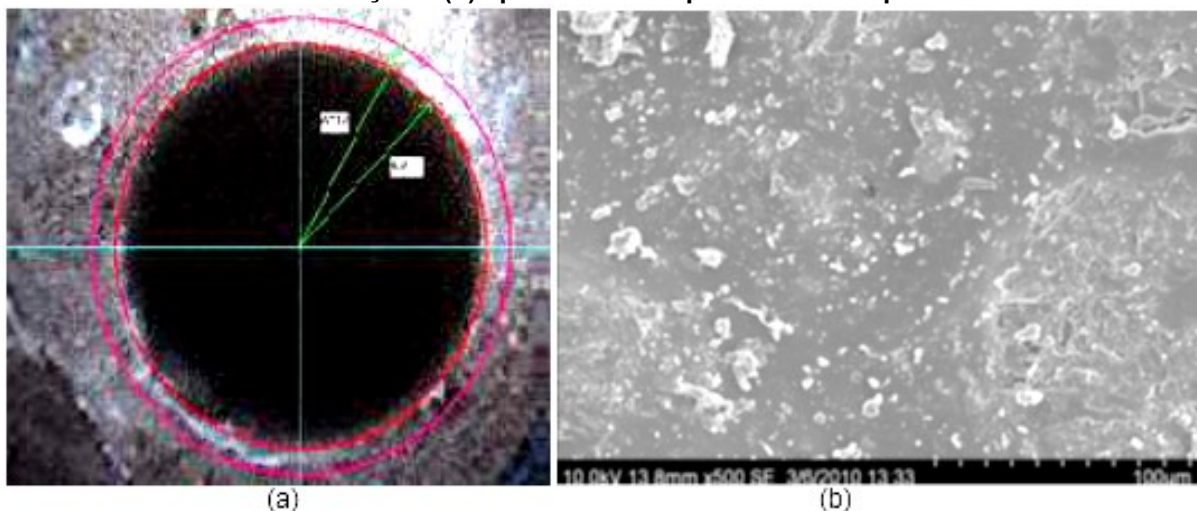
### 2.5.2 Furação em compósitos com fibras de bananeira

Na literatura são encontrados estudos sobre o processo de furação em compósitos poliméricos que utilizam as fibras da bananeira como reforço com diferentes matrizes poliméricas.

CHANDRAMOHAN *et al.* (2011) avaliaram e compararam forças de avanço, torque e delaminação na furação em compósitos de fibras vegetais tratadas da bananeira, sisal e roselle (*Hibiscus sabdariffa*), com matriz poliéster. As brocas utilizadas foram helicoidais de aço rápido sem revestimento e com diâmetros de 3, 4 e 5 milímetros. Diferentes parâmetros de furação foram aplicados e as forças resultantes do processo foram medidas através de um dinamômetro. Para inspeção e avaliação dos furos foram utilizados equipamentos de microscopia eletrônica de varredura (MEV) e de detecção com raios-X. No cálculo das avarias foram utilizados o fator de delaminação ( $F_d$ ) e o fator de delaminação ajustado ( $F_{da}$ ).

No compósito com fibras de bananeira, as forças de avanço variaram de aproximadamente 6N para a broca de 3 mm até 45N para a broca de 5 mm, e o torque variou de aproximadamente 0,5 Nm para a broca de 3 mm até 3 Nm para a broca de 5 mm. As menores delaminações para os três diâmetros de brocas utilizados foram obtidas com as maiores velocidade de corte e avanço utilizados na pesquisa. As Figuras 26 a e b mostram a medição da zona de delaminação no furo do compósito com fibras de bananeira e a aparência da superfície do compósito. Os autores comentam que a relação entre o aumento da força de avanço com o incremento do avanço foi comprovada para a furação neste tipo de compósito assim como a redução da força de avanço com o aumento na velocidade de corte, para o mesmo avanço. Com relação ao torque, foi observado um aumento discreto nos valores com o incremento no avanço, relacionado ao aumento da área do cavaco cizalhado.

**Figura 26 - Compósito com fibras de bananeira e poliéster: (a) medição da zona de delaminação e (b) aparência da superfície do compósito**

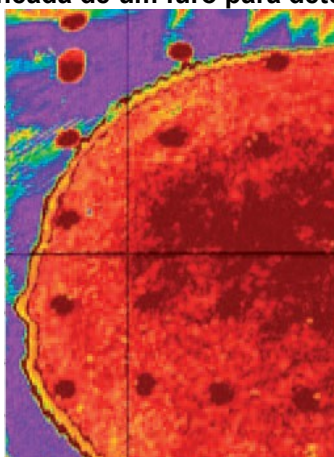


**Fonte: Chandramohan et al. (2011)**

VENKATESHWARAN e PERUMAL (2013) avaliaram a qualidade na entrada e saída dos furos realizados em um compósito com fibras de bananeira e resina epóxi utilizando análise de imagens e escaneamento (Figura 27). Uma broca helicoidal de aço rápido sem revestimento com diâmetro de 10 mm foi utilizada para a furação, com diferentes parâmetros de avanço e velocidade de corte. Foi utilizado o fator de delaminação ( $F_d$ ) para classificação dos furos realizados a partir das medidas obtidas nas imagens escaneadas. Os autores afirmaram que tanto o aumento da velocidade de corte quanto do avanço contribuem com o aumento do fator de delaminação e também comentaram que diferentes abordagens na literatura são usadas para compreender a influência dos parâmetros de furação no processo da delaminação em compósitos com fibras vegetais.

Entre estas abordagens, os autores afirmaram que as experimentais, com tratamento estatístico, são mais utilizadas em relação a modelos matemáticos, que são mais complexos em função das diferentes propriedades das fibras naturais e matrizes utilizadas na fabricação do compósito.

**Figura 27 - Imagem escaneada de um furo para detecção da área delaminada**

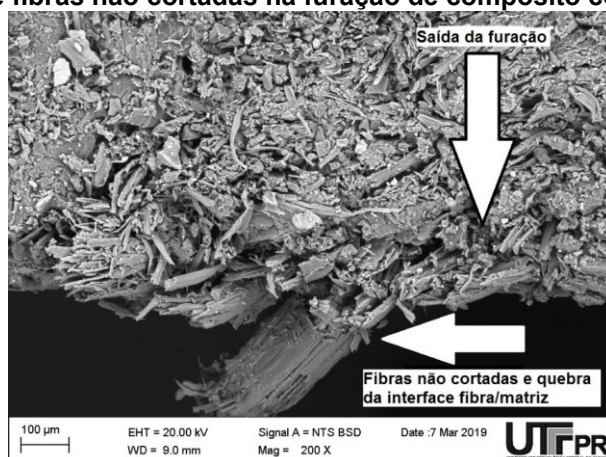


**Fonte: Venkateshwaran e Perumal (2013)**

PATEL *et al.* (2015) também utilizaram técnicas de inspeção através da avaliação de imagens para verificar a qualidade na entrada e saída da furação no compósito com fibras de bananeira e matriz poliéster. Foram utilizados diferentes parâmetros de velocidades de corte e avanço utilizando brocas com ângulos de ponta variados ( $90^\circ$ ,  $104^\circ$  e  $118^\circ$ ). Foram medidos o fator de delaminação ( $F_d$ ) e as forças de avanço envolvidas no processo. Os autores reportaram um aumento das forças de avanço relacionado ao aumento no ângulo de ponta da broca, bem como uma redução na delaminação na entrada do furo com este aumento de ângulo, ou seja, as brocas com ângulo de  $90^\circ$  apresentaram melhores resultados. Na entrada do furo, com o aumento da velocidade de corte e do avanço, a delaminação aumentou. Na saída foi observada uma redução no fator de delaminação com o aumento da velocidade de corte e com o aumento do ângulo de ponta da broca. Entre os valores analisados, os autores apontam que o ângulo de ponta de  $90^\circ$  utilizando 1000 rpm e 0,1 mm de avanço foram os parâmetros mais adequados para a furação do material.

ELLENBERGER *et al.* (2019b) investigaram a qualidade da furação em compósitos com diferentes fibras naturais, entre elas a de bananeira. Nos resultados foram apontadas as influências das dimensões das fibras e seu comportamento viscoelástico na qualidade dos furos realizados (Figura 28), tanto na entrada quanto na saída. Foi também observado o comprometimento da área interna do furo com fibras não cortadas. Maiores velocidades de corte e menores velocidades de avanço apresentaram melhores resultados.

**Figura 28 - Detalhe de fibras não cortadas na furação de compósito com fibras de bananeira**



**Fonte: Ellenberger et al. (2019b)**

O Quadro 3 compara os principais resultados encontrados na literatura sobre a furação em compósitos com fibras de bananeira, mostrando também o tipo de matriz e especificações das brocas usadas. Para todos estes trabalhos, o processo de fabricação dos compósitos foi manual, sem auxílio de equipamento mecânicos.

**Quadro 3 - Especificações e resultados de pesquisas na furação de compósitos com fibras de bananeira encontradas na literatura**

Fibra/matriz	Especificação da broca	Conclusões da pesquisa	Referência
Epóxi	Helicoidal aço rápido 3,4 e 5 mm diâmetro, ângulo de ponta não especificado	Menor delaminação para $f=0,3$ mm e 1200 rpm para os três diâmetros	CHANDRAMOHAN et al. (2011)
Epóxi	Helicoidal aço rápido 10 mm diâmetro, ângulo de ponta não especificado	Menor delaminação na entrada e saída do furo para $f=0,1$ mm e 500 rpm	VENKATSHWARAN et al. (2013)
Poliéster	Helicoidal aço rápido diâmetro não informado com ângulos de ponta de 90, 104 e 118°	Ângulo de ponta 90°, 1000 rpm e $f=0,1$ mm foram os parâmetros mais adequados	PATEL et al. (2015)
PU mamona	Helicoidal aço rápido 5 mm diâmetro com ângulo de ponta 118°	Menor delaminação na entrada do furo para $f=0,13$ mm e 1500 rpm e na saída para $f=0,2$ mm e rpm	ELLENBERGER et al. (2019b)

**Fonte: Autoria própria (2020)**

Nos trabalhos citados anteriormente, foi observado um consenso entre os diferentes autores que pesquisaram sobre a furação de compósitos com fibras da bananeira de que o processo de entrada e saída da broca no material é um dos

principais responsáveis por induzir a delaminação e a consequente geração de danos aos furos. CHANDRAMOHAN *et al.* (2011) comentam que a delaminação está correlacionada com as forças envolvidas no processo durante a aproximação da face de entrada e da saída do furo. Segundo os autores as forças envolvidas, influenciadas principalmente pelo avanço e velocidade de corte, contribuem com o levantamento das fibras da primeira camada no sentido axial e deslocamento das fibras da última camada, criando as denominadas áreas de delaminação. VENKATESHWARAN *et al.* (2013) e PATEL *et al.* (2015) citam que o incremento nos parâmetros de avanço e velocidade de corte utilizados na furação, com o consequente aumento das forças envolvidas, influenciaram no aumento de avarias tanto na entrada quanto na saída nos furos.

A delaminação é definida como um fenômeno de falha entre camadas de um compósito induzido pela furação e tem sido considerado como um dos maiores desafios para se obter qualidade neste processo. Este fenômeno contribui com outros tipos de avarias, como arrancamento de fibras, corte incorreto de fibras, quebra da interface fibra/matriz, entre outros. Além disto, reduz drasticamente a tolerância na montagem de peças como pode comprometer a resistência de conjuntos com as tensões de esmagamento criadas por parafusos e rebites (LIU *et al.*, 2012).

### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

#### 3.1 Fabricação dos compósitos

Neste tópico são descritos os processos adotados para a fabricação e caracterização dos painéis compósitos utilizados nos testes.

A fibra da bananeira foi escolhida por ser um resíduo não aproveitado comercialmente pelos envolvidos no cultivo. Após a colheita do fruto, os resíduos (caule e folhas) são cortados e deixados no solo para decomposição, o que pode favorecer a proliferação de animais peçonhentos. A utilização das fibras provenientes do caule pode agregar um rendimento aos envolvidos no cultivo desta planta. Foram fabricados dois tipos de compósitos, um com fibras trituradas em processo mecânico e outro com o corte manual das fibras.

O corte manual das fibras teve a intenção de possibilitar a fabricação do compósito sem utilização de equipamentos mecanizados. O processo manual de obtenção e corte das fibras pode gerar renda aos envolvidos no cultivo como também possibilitar a fabricação de painéis ou artefatos devido à aparência final obtida neste tipo de material, que evidencia as fibras vegetais da planta obtidas de resíduos da produção. A fabricação deste tipo de compósito foi baseada nas pesquisas realizadas por MERLINI (2011) e ELLENBERGER *et al.* (2019).

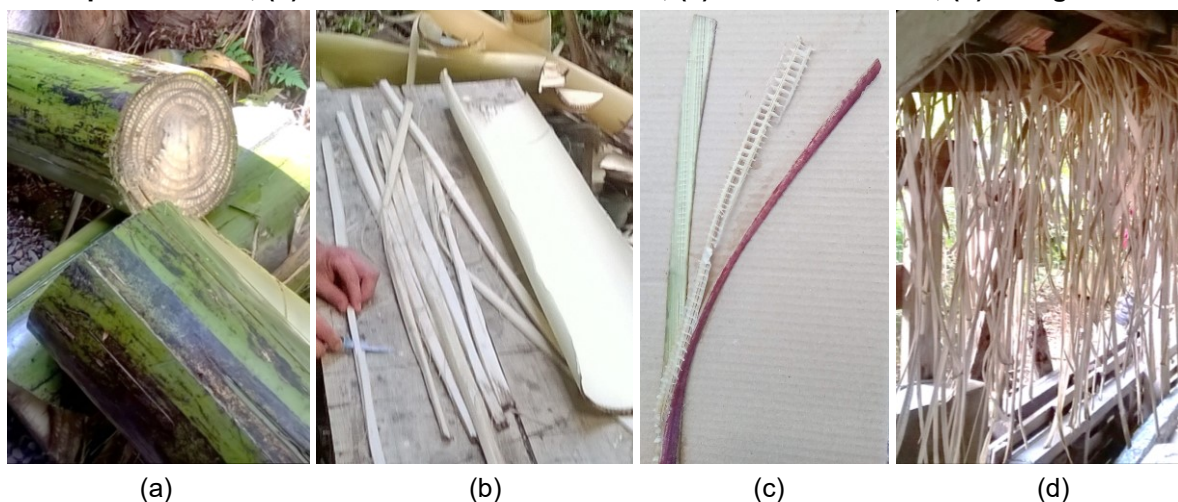
Com o processo mecanizado buscou-se um material com propriedades superiores ao processo manual, que possibilite seu uso em setores como o automotivo ou construção, ou quais necessitam maiores velocidades de produção e um material com propriedades mais regulares. O processo mecanizado de fabricação do compósito foi baseado no trabalho de PROTZEK *et al.* (2016).

Foram realizados testes preliminares com a fabricação de ambos os compósitos, onde foram experimentadas algumas composições variando a quantidade de fibras e da matriz PU. As composições dos painéis utilizados nesta pesquisa foram escolhidas em testes prévios por apresentarem resultados estéticos e propriedades adequadas à pesquisa e utilização proposta.

### 3.1.1 Preparação das fibras da bananeira

As fibras para fabricação dos compósitos foram retiradas do pseudocaule de bananeiras do tipo prata (*Musa AAB* subgrupo Prata) cultivadas na cidade de São José dos Pinhais, no estado do Paraná. Estes pseudocaules foram provenientes de resíduos do cultivo da planta, após a colheita dos frutos. A retirada das fibras foi executada de forma manual conforme ilustrado na Figura 29: a primeira etapa foi o corte do pseudocaule (Figura 29a); a segunda etapa foi a retirada e corte das bainhas (Figura 29b); a terceira etapa foi a retirada da denominada renda localizada entre as duas camadas de fibras (Figura 29c); a última etapa foi o corte das fibras em tiras de aproximadamente 500 mm de comprimento e 10 mm de largura. Estas tiras permaneceram sete dias secando naturalmente ao ar livre, sem auxílio de equipamentos e protegidas das ações do tempo (Figura 29d). Estes processos de preparação das fibras foram baseados nos trabalhos de CARNAUBA (2017) e ELLENBERGER *et al.* (2019).

**Figura 29 - Etapas da retirada das fibras do pseudocaule da bananeira: (a) corte do pseudocaule; (b) retirada e corte das bainhas; (c) retirada da renda; (d) secagem**



**Fonte: Autoria própria (2020)**

Após a secagem natural, foram executados dois processos de corte e separação das fibras para a fabricação dos painéis, um processo de corte manual e outro de trituração com auxílio de equipamentos mecânicos.

No processo manual, as fibras foram cortadas em pedaços de aproximadamente 5 x 5 mm, efetuados manualmente com o auxílio de uma tesoura.

Este processo resultou em uma variação dimensional com valores entre 2 a 6 mm aproximadamente. Os pedaços obtidos se apresentaram como um feixe de fibras ainda unidas naturalmente pela lignina natural da planta.

No processo mecânico as tiras de fibras foram previamente cortadas manualmente e trituradas utilizando um misturador cinético disponibilizado pelo laboratório da Embrapa Florestas, em Colombo – PR, Brasil. Este processo promoveu a desagregação das fibras unidas pela lignina, resultando em fibras individualizadas ou ainda em feixes de fibras, em quantidades consideravelmente menores às obtidas com o corte manual e também partes de fibras quebradas resultantes do processo executado pelo misturador. Foram observadas variações nos comprimentos das fibras obtidas entre aproximadamente 2 e 5 mm e partes com aproximadamente 0,5 mm de comprimento. A espessura, tanto no corte manual quanto no mecânico, variou em função do diâmetro natural das fibras.

As fibras resultantes de ambos os processos foram colocadas em uma estufa elétrica, também disponibilizada pelo laboratório da Embrapa Florestas, por aproximadamente 24 horas a 60°C, para eliminação da umidade que pode interferir na interface fibra/matriz. Ambas as fibras não sofreram tratamentos químicos para melhoria da adesão com a matriz.

### 3.1.2 PU derivado do óleo de mamona

O PU bicomponente, AG101, utilizado neste trabalho foi adquirido junto à empresa Kehl, de São Carlos - SP, Brasil. A preparação do polímero seguiu as instruções do fornecedor na proporção em peso 1:1 de polioli e pré-polímero.

### 3.1.3 Moldagem dos painéis compósitos

Foram utilizados dois processos de mistura e moldagem dos painéis, um para as fibras cortadas manualmente e outro para as fibras trituradas mecanicamente. As fibras em ambos os compósitos ficaram posicionadas de forma aleatória, sem alinhamento preferencial. Pelas dimensões das fibras utilizadas não seria possível um alinhamento preferencial durante a fabricação.



As fibras cortadas manualmente e o PU foram misturados na proporção de 56% de fibras para 44% de PU, ou 90 g de fibras e 70 g de PU para cada painel, homogeneizados manualmente. A mistura foi depositada em um molde de metal e pressionada em prensa quente, modelo MA 098/AR15 da Marconi Equipamentos, a 45 °C e uma pressão de 9 toneladas por 1 hora. Após o desmolde, os painéis aguardaram 23 horas resfriando em temperatura ambiente para a cura completa do material. A Figura 30 mostra o painel finalizado.

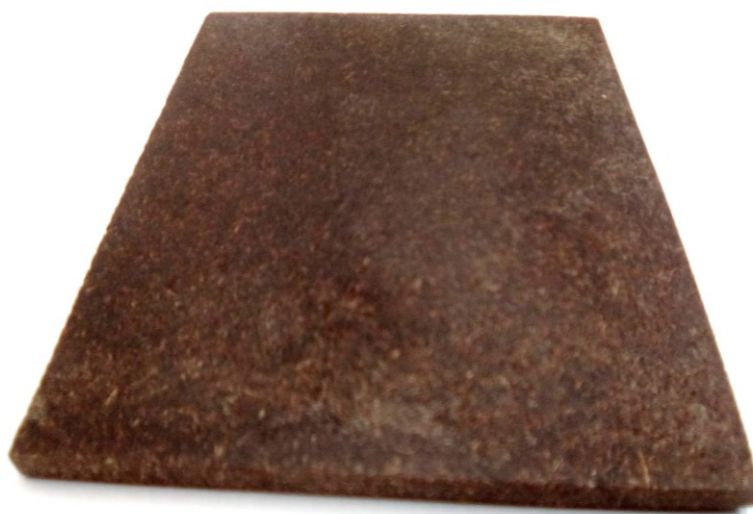
**Figura 30 – Painel do compósito com fibras cortadas manualmente**



**Fonte: Aatoria própria (2020)**

As fibras trituradas mecanicamente primeiramente passaram por uma peneira granulométrica de 60 mesh. Foi utilizada a proporção de 50% de fibras e 50% de PU, ou 60 g de fibras e 60 g de PU para cada painel. O material foi misturado com um homogeneizador modelo MH-100 série 6069 da MH Equipamentos por 30 segundos. Em seguida a mistura foi depositada em um molde de metal e pressionada em uma prensa quente, modelo MA 098/AR15 da Marconi Equipamentos, a 60°C e uma pressão de 9 toneladas por 20 minutos. Os painéis também foram deixados por 23 horas em temperatura ambiente para cura completa do material. A Figura 31 mostra o painel finalizado.

**Figura 31 – Painel do compósito com fibras trituradas mecanicamente**



**Fonte: A autoria própria (2020)**

Os painéis resultantes de ambos os processos ficaram com medidas de aproximadamente 150 x 120 x 6 mm de espessura. As proporções e os processos de fabricação dos compósitos utilizados nos testes foram baseados nas pesquisas em compósitos com fibras vegetais e PU do óleo de mamona executadas por PROTZEK *et al.* (2016) e ELLENBERGER *et al.* (2017).

#### 3.1.4 Determinação da densidade da amostra

A determinação da densidade iniciou com a pesagem dos painéis em uma balança digital e medição das dimensões das amostras. Para os cálculos foi utilizada a Equação 1, onde  $m$  é a massa e  $v$  o volume, realizados de acordo com a norma CEN EN323: 2002, levando em consideração a média e o desvio padrão obtidos na medição de cinco amostras de cada compósito.

$$d = \frac{m}{v} \text{ (kg/m}^3\text{)} \quad (1)$$

#### 3.1.5 Inchamento e absorção de água

Os testes de inchamento e absorção de água para os períodos de 2 e 24 horas foram realizados de acordo com a norma CEN EN317: 2002 submergindo as amostras do compósito em água destilada. A absorção de água foi calculada de acordo com a Equação 2:

$$A(\%) = \frac{m_2 - m_1}{m_2} \times 100 \quad (2)$$

Onde  $m_1$  é o peso (g) antes do teste e  $m_2$  é o peso em gramas depois do teste.

O inchamento foi calculado utilizando a Equação 3:

$$G(\%) = \frac{A_2 - A_1}{A_2} \times 100 \quad (3)$$

Onde  $A_1$  é a espessura (mm) antes do inchamento e  $A_2$  é a espessura (mm) depois do teste. Foram avaliadas cinco peças de cada tipo de compósito e o resultado levou em consideração a média e ao desvio padrão das medições.

### 3.1.6 Ensaio mecânicos

A caracterização mecânica dos compósitos foi realizada no Laboratório Multiusuário de Materiais da UTFPR – Guarapuava – PR, Brasil, através do teste de flexão em três pontos, de acordo com a norma ASTM D790-03 usando uma máquina de teste EMIC DL10000 universal com uma célula de carga de 5 kN e uma velocidade de teste de 2 mm/min. Foram considerados os valores da média e o desvio padrão dos resultados medidos em cinco peças de cada tipo de compósito.

## 3.2 Usinagem

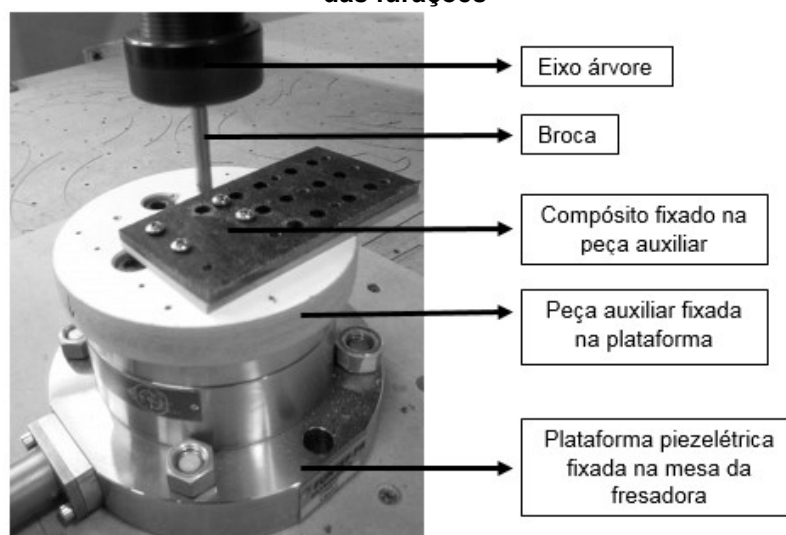
Neste tópico estão descritos os processos da preparação das amostras e das furações executadas nos compósitos com a utilização de uma fresadora CNC.

### 3.2.1 Preparação das amostras

Para o processo de furação, os painéis foram primeiramente recortadas em uma serra circular esquadrejadeira com medidas de 100 x 50 mm, buscando-se assegurar o esquadro, simetria e adequação das dimensões para os testes. Os painéis foram furados para permitir a fixação através de quatro parafusos em diferentes posições, permitindo a realização de 18 furos em cada peça, conforme os parâmetros planejados. Em seguida foram parafusados em uma placa auxiliar

também parafusada na face superior da plataforma piezelétrica, que permaneceu fixada na mesa da fresadora (Figura 32).

**Figura 32 – Sistema de fixação da plataforma piezelétrica e dos compósitos para realização das furações**



**Fonte: Autoria própria (2020)**

A cada parâmetro de furação aplicado as peças foram realocadas em função do funcionamento da plataforma exigir que os furos fossem executados no seu centro, realizando a medição das forças envolvidas de forma adequada.

Os furos realizados foram passantes, sem utilização de uma contra peça na face de saída da furação. Simulações prévias mostraram que a utilização de uma contra peça alteraria os resultados na geração de avarias das saídas dos furos e influenciaria nas medições das forças envolvidas. Os furos transpassaram as placas a uma distância de 15 mm da face de saída garantindo que toda geometria da ponta executasse o processo de corte, com um movimento de entrada e saída do material.

Todas as fixações da plataforma, compósitos e peça auxiliar foram testadas e visaram evitar movimentos indesejados que poderiam interferir nos resultados.

### 3.2.2 Furações

As operações de furação foram executadas em uma fresadora CNC 3 eixos, fabricante Vetor CNC, modelo FR2012 (Figura 33). O planejamento dos furos foi realizado primeiramente no software *Autocad 2016 Student*, para verificar a

disposição dos furos em cada painel e um distanciamento que evitasse o comprometimento da análise após a execução.

**Figura 33 - Fresadora CNC 3 eixos utilizada**



**Fonte: Autoria própria (2020)**

Os valores da velocidade de corte ( $v_c$ ) e do avanço ( $f$ ) seguiram os valores mostrados na Tabela 4, baseados em trabalhos encontrados na literatura sobre a furação de compósitos com fibras de bananeira (CHANDRAMOHAN *et al.*, 2011; VENKATESHWARAN e PERUMAL, 2013; PATEL *et al.*, 2015; ELLENBERGER *et al.*, 2019b), esperando-se que os resultados obtidos nesta pesquisa pudessem ser comparados e analisados.

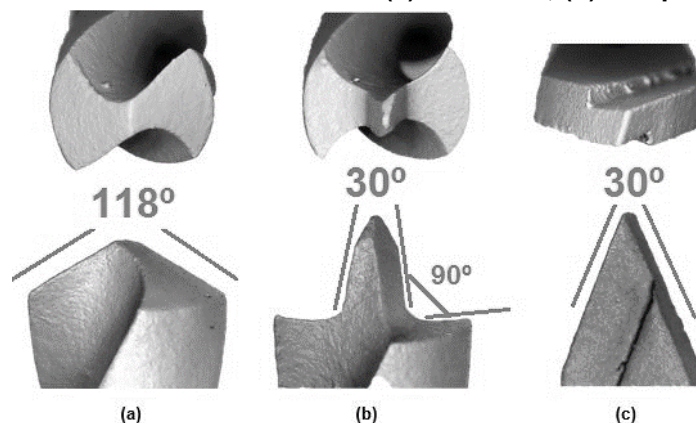
**Tabela 4 - Parâmetros da velocidade do fuso (rpm), velocidade de corte ( $v_c$ ), velocidade de avanço ( $v_f$ ) e avanço ( $f$ ) para a furação dos testes**

Teste	Velocidade do fuso (rpm)	$V_c$ (m/min)	$V_f$ (mm/min)	$f$ (mm)
1	1000	19	100	0,1
2	1000	19	200	0,2
3	1000	19	300	0,3
4	2000	38	200	0,1
5	2000	38	400	0,2
6	2000	38	600	0,3
7	3000	57	300	0,1
8	3000	57	600	0,2
9	3000	57	900	0,3

**Fonte: Autoria própria (2020)**

Foram utilizados três modelos de brocas para as furações em ambos os compósitos (Figura 34): broca modelo helicoidal com 6 mm de diâmetro, material aço rápido com ângulo de ponta  $118^\circ$ , duas arestas de corte e ângulo de hélice  $30^\circ$ , fabricante *Collins* (Figura 34a); broca modelo três pontas (*brad point*) com 6 mm de diâmetro, material aço rápido e ângulo de hélice  $30^\circ$ , fabricante *Collins* (Figura 34b); broca com afiação de corte tipo formão, modelo *Speedbor* do fabricante *Irwin*, material aço rápido, 6 mm de diâmetro e ângulo de ponta  $30^\circ$ , (Figura 34c). Todas as brocas foram fixadas no cone porta-ferramenta com 35 mm de balanço. Os furos foram realizados a seco porque meios lubri-refrigerantes poderiam comprometer as propriedades do material e possíveis acabamentos de superfície.

**Figura 34 – Modelos das brocas utilizadas: (a) helicoidal; (b) três pontas; (c) formão**



Fonte: Autoria própria (2020)

A escolha dos modelos das brocas utilizadas levou em consideração as ferramentas usadas por diferentes autores na literatura em pesquisas sobre a furação de diferentes compósitos com fibras vegetais (CHANDRAMOHAN *et al.*, 2011; AZUAN *et al.*, 2012; PATEL *et al.*, 2015; CHOUDHURY *et al.*, 2018; MALEKI *et al.*, 2019). A utilização destas brocas buscou analisar e comparar os resultados obtidos com aqueles encontrados na literatura para compósitos similares, visto que não foram encontrados na literatura estudos sobre furação em compósitos com fibras de bananeira e matriz PU.

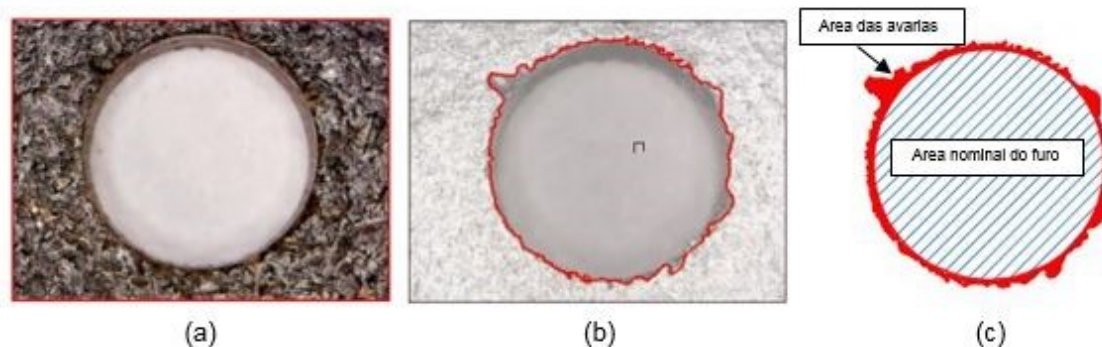
Os ajustes das rotações do eixo árvore da fresadora foram feitos através do inversor de frequência da máquina e aferidos com um tacômetro digital laser, fabricante *Icel*, modelo TC-5010.

As programações das furações com seus diferentes parâmetros foram executadas através do software *ArtCAM Pro 2008*, da *Delcam*. Os programas com os comandos gerados foram gerenciados pelo software *Mach3*, da *Newfangled*, responsável pelo acionamento e movimentação dos motores de passo da fresadora CNC. Para cada parâmetro utilizado foram realizadas três repetições que foram utilizadas posteriormente para a análise dos valores das avarias, forças envolvidas e temperatura gerada no processo.

### 3.3 Medições das avarias

A observação e análise das avarias após o processo de furação foram executadas através de microscopia eletrônica de varredura (MEV), utilizando o aparelho modelo Evo MA15, e microscopia com o microscópio modelo Olympus SZX 10 com ampliação de 10x (Figura 35a), realizadas no Centro Multiusuário de Caracterização de Materiais da UTFPR – Curitiba – PR, Brasil. Uma camada de tinta aerossol na cor alumínio foi aplicada nas superfícies furadas para uma melhor observação das avarias em função da coloração dos compósitos dificultarem esta análise. Foram observadas as avarias na face de entrada e de saída dos furos. As imagens das furações foram tratadas nos softwares de edição gráfica *GIMP 2.10.6* e *Inkscape* para ajuste de cores e detecção das bordas dos furos (Figura 35b). O programa *Autocad 2019 Student* foi utilizado para o ajuste de escala e cálculo da área avariada, após a planificação e tratamento dos vetores obtidos (Figura 35c).

**Figura 35 – Processo de medição das avarias nos furos: (a) microscopia do furo; (b) imagem do furo tratada no software com a detecção das avarias; (c) imagem da área avariada em relação à área nominal do furo após tratamento no software**



Fonte: Autoria própria (2020)

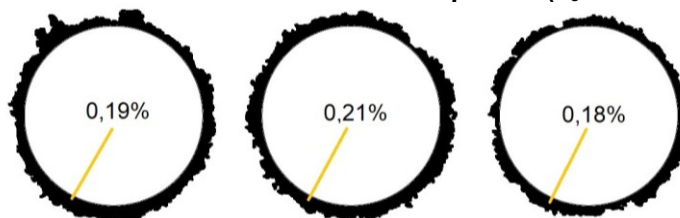
As avarias observadas nos furos foram calculadas utilizando o fator de delaminação ( $F_d$ ), denominado neste trabalho como fator de avaria ( $F_a$ ), conforme abordagem de BAJPAI *et al.* (2017) e FARAZ *et al.* (2009) de acordo com a Equação 4, resultando na porcentagem dos danos em relação à área nominal do furo.

$$F_a = \frac{A_{ava} - A_{nom}}{A_{nom}} \% \quad (4)$$

Onde  $A_{ava}$  é a área avariada e  $A_{nom}$  é a área nominal do furo, ambos em milímetros quadrados.

Os valores em porcentagem da área avariada foram obtidos a partir da medição em três furos executados para cada parâmetro de furação utilizado. Após a obtenção dos valores, foram calculadas a média e o desvio padrão dos resultados. A Figura 36 mostra um exemplo da variação de valores encontrados na furação do compósito com fibras mecanicamente trituradas utilizando a broca três pontas.

**Figura 36 – Exemplo dos valores das avarias ( $F_a$ ) medidos na furação de entrada do compósito com fibras mecanicamente trituradas com a broca três pontas ( $v_c = 19$  m/min;  $f = 100$  mm/min)**



Fonte: Autoria própria (2020)

Este procedimento foi executado para avaliar a furação nos dois tipos de compósitos com todos os parâmetros e tipos de brocas pesquisados. Foram utilizadas brocas novas que somaram um total de 27 furações para cada modelo e tipo de compósito. Foram realizadas previamente algumas furações para testes e verificação dos equipamentos.

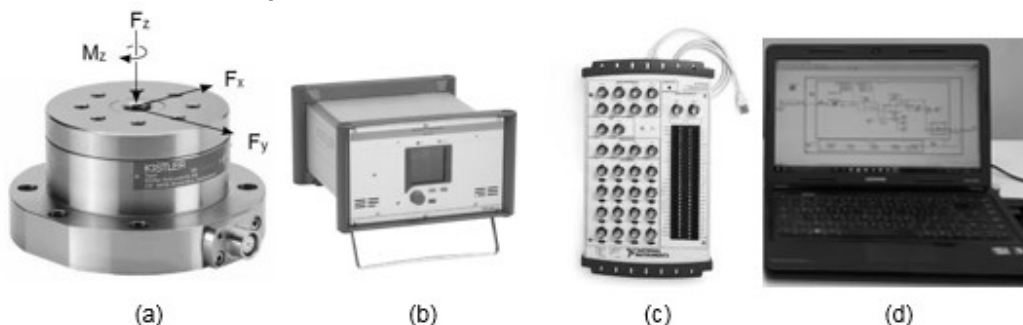
### 3.4 Medições das forças de usinagem

As medições das forças de avanço ( $F_z$ ) e do torque ( $M_z$ ) foram executadas por um conjunto de plataforma piezométrica *Kistler* tipo 9272 (Figura 37a),



amplificador de carga multicanal *Kistler* tipo 5070a (Figura 37b), placa de aquisição de dados USB-6259B (Figura 37c) junto com os softwares *NI Signal Express* 2015 e *Labview* 2017, ambos da *National Instruments* instalados em um computador do Laboratório de Modelos e Protótipos do DADIN-UTFPR (Figura 37d).

**Figura 37 - Equipamentos para medição das forças durante a furação: (a) plataforma piezelétrica; (b) amplificador de carga multicanal; (c) placa de aquisição dos dados; (d) computador com software de análise dos dados**



Fonte: (a e b) Kistler (2020); (c) National Instruments (2020); (d) Autoria própria (2020)

O amplificador de carga multicanal foi configurado para as medições do torque ( $M_z$ ) e da força de avanço ( $F_z$ ), conforme orientações do fabricante para a faixa de medição e sensibilidade. Para o torque foi utilizado o canal 1, com uma faixa de medição de 200 Nm e sensibilidade de  $-1,712 \text{ pC/Ncm}$ . Para a força de avanço foi utilizado o canal 2, com uma faixa de medição de 500N e sensibilidade de  $-3,710 \text{ pC/N}$ . A frequência de aquisição de dados utilizada foi de 1 kHz. Testes preliminares foram realizados para adequação e configuração dos equipamentos. Foram realizadas três medições para cada força envolvida, em todos os parâmetros de furação utilizados e os resultados levaram em consideração as médias e desvios dos valores medidos.

A medição das forças envolvidas no processo visou verificar uma possível influência nos resultados medidos em função dos diferentes parâmetros de furação investigados.

### 3.5 Aspecto das brocas após o processo de furação

Para verificar as condições das ferramentas após o processo de furação, foram feitas observações das brocas utilizadas através de microscopia. Este procedimento visou verificar principalmente a adesão de material na broca e uma

possível formação de arestas postiças, que poderiam influenciar no aumento de avarias nos furos.

Os modelos de brocas utilizadas para cada tipo de compósito estavam sem uso. Cada broca executou todos os parâmetros de furação propostos e ao final foram acondicionadas para posterior análise no microscópio. Foram observadas principalmente as pontas das brocas, onde se localizam as arestas de corte.

### **3.6 Análise dos cavacos**

Os cavacos gerados nas furações dos dois tipos de compósitos, com todos os modelos de brocas e para todos os parâmetros usados foram coletados para analisar os tipos e formas através de microscopia. Buscou-se com esta análise identificar a influência dos modelos de brocas utilizadas e dos parâmetros de usinagem. Apesar da coleta e microscopia dos cavacos gerados por todos os modelos de brocas e parâmetros aplicados, foram separados aqueles provenientes das velocidades de corte e avanço mais baixas e mais altas, para a comparação entre os extremos.

Os cavacos foram classificados segundo sua morfologia em contínuos, descontínuos ou segmentados (MACHADO *et al.*, 2015) e os formatos foram classificados segundo a norma ABNT NBR ISO 3685 (2017) em fita, helicoidal, espiral, lascas ou pedaços.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 4.1 Caracterização dos materiais

Os valores da densidade, inchamento, absorção de água e tensão máxima medidos nos dois tipos de compósitos estudados são mostrados na tabela 5.

**Tabela 5 – Resultados das análises de densidade, inchamento, absorção de água, tensão máxima e módulo de elasticidade dos compósitos**

Propriedades	Compósito com fibras cortadas manualmente	Compósito com fibras trituradas mecanicamente
Densidade (kg/m <sup>3</sup> )	881,8±53,9	1220,2±39,3
Inchamento 2 hs (%)	6,3±2,3	1,9±0,4
Inchamento 24 hs (%)	12,8±2,7	4,5±0,2
Absorção de água 2hs (%)	16,8±4,7	1,7±0,6
Absorção de água 24hs (%)	27,6±4,3	6,6±1,3
Tensão máxima (MPa)	7,2±0,8	35,1±5,4
Módulo de elasticidade (MPa)	1,5±0,4	24,8±4,1

**Fonte: Autoria própria (2020)**

A densidade do compósito com fibras trituradas mecanicamente ficou maior comparada ao compósito com fibras cortadas manualmente. O processo de trituração mecânico levou a uma exposição de toda a estrutura da fibra, resultando em uma melhor interface fibra/matriz devido à ligação das hidroxilas das fibras e o isocianato do PU. A compressão das fibras trituradas em conjunto com a temperatura da prensa promoveu uma maior área de contato com a matriz, levando ao aumento da aderência entre os componentes e reduzindo a formação de bolhas e vazios no material, similar ao observado por Paula (2017) em sua pesquisa. Devido às maiores dimensões das fibras cortadas no processo manual, o recobrimento pelo PU foi menor e a acomodação durante a prensagem gerou vazios e bolhas,

dificultando a homogeneização e reduzindo a densidade do material. Outro fator que influenciou nos valores é a proporção de fibras cortadas manualmente utilizadas no painel, 6% maior em relação as fibras trituradas mecanicamente.

Os valores de inchamento e absorção de água foram menores no compósito com fibras mecanicamente trituradas, comprovando uma interface fibra/matriz mais adequada e um melhor recobrimento das fibras pelo PU. Como as fibras vegetais, entre elas a de bananeira, apresentam características hidrofílicas, um recobrimento mais completo da sua superfície evitou uma maior absorção de água e o consequente inchamento.

Devido à melhor interface obtida no compósito com fibras trituradas mecanicamente, sua resistência à tensão mostrou resultados superiores em função de sua melhor capacidade na distribuição dos esforços aplicados.

Foram encontrados trabalhos sobre a caracterização de compósitos com matriz PU derivado do óleo de mamona e fibras vegetais, similares aos estudados neste trabalho. PROTZEK *et al.* (2021) avaliaram as propriedades de um compósito com PU derivado do óleo de mamona e fibras obtidas de cascas do pinhão, em diferentes proporções, utilizando processos mecânicos de separação das fibras e da mistura fibra/matriz, similar ao utilizado neste trabalho. Na proporção em peso de 50% de fibras foram apontados densidade de aproximadamente  $1100 \text{ kg/m}^3$ , absorção de água de aproximadamente 8%, inchamento de aproximadamente 4% e resistência à flexão em torno de 50 MPa, valores próximos aos medidos no compósito com fibras mecanicamente trituradas. O compósito com fibras cortadas manualmente apresentou valor de densidade maior ao encontrado por Ellenberger *et al.* (2017) em um compósito igualmente fabricado com corte manual de fibras da bananeira e PU derivado do óleo de mamona, na proporção 50/50%. Os autores apontaram a densidade de  $710 \text{ kg/m}^3$ .

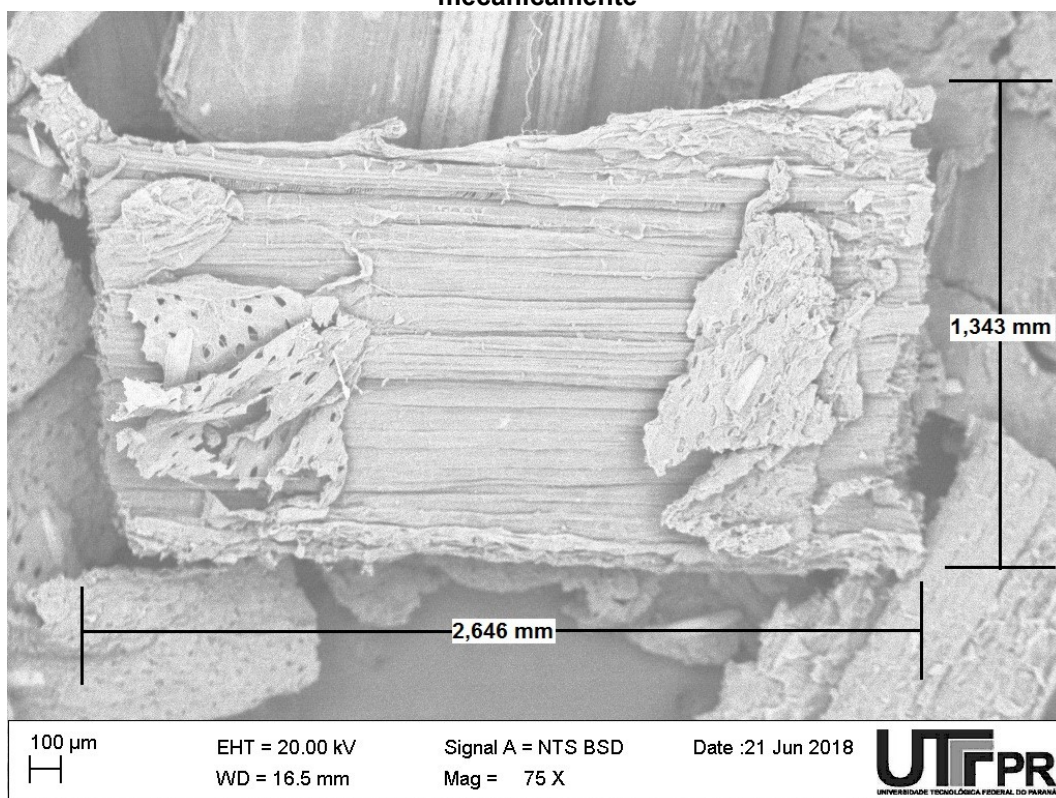
MARINHO *et al.* (2013) produziram e caracterizaram compósitos com partículas de bambu (*Dendrocalamus giganteus*) e matriz PU derivada do óleo de mamona, nas proporções de 10, 15 e 20% em peso. As partículas do bambu foram preparadas com processo mecânico de moagem e peneiradas em malha 8 *mesh*. Os painéis foram conformados em uma prensa hidráulica a uma temperatura de  $90^\circ\text{C}$  e pressão de 6,25 MPa durante 5 minutos. Os valores da densidade informados ficaram entre  $850$  e  $960 \text{ kg/m}^3$  e inchamento entre 12 à 16%. SANTOS *et al.* (2013) em sua pesquisa fabricaram e realizaram a caracterização físico-mecânica

de compósitos com partículas de madeira tauari (*Couratari oblongifolia*) e matriz PU derivado do óleo de mamona, na proporção em peso de 86,2% de partículas e 13,8% de matriz. As partículas foram preparadas com processo mecânico de moagem e peneirados em malha 18 *mesh*. Os painéis foram conformados em uma prensa hidráulica por 10 minutos com temperaturas de 90, 110 e 130°C e pressão de 5 MPa. Foram obtidos valores de densidade entre 930 e 940 kg/m<sup>3</sup> e inchamento após 24 h inferiores a 15%. Os valores encontrados nestas pesquisas estão próximos aos encontrados no compósito com fibras cortadas manualmente e inferiores ao compósito com fibras trituradas mecanicamente, levando em consideração a diferença nas fibras e nos processos de fabricação dos painéis.

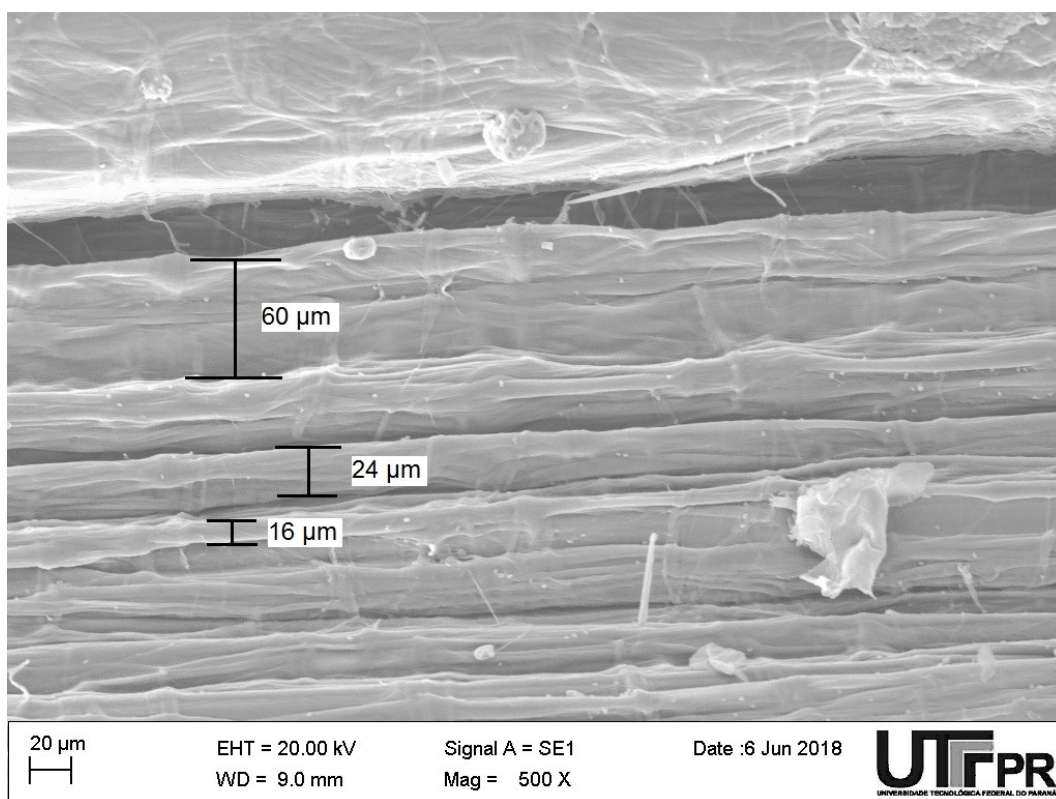
Valores entre aproximadamente 8 a 17% de absorção de água e de 3 a 4% de inchamento são descritos em diferentes trabalhos que também utilizaram matriz PU de mamona com fibras vegetais de madeira Paricá (AMSTALDEN *et al.*, 2014) e fibras de sisal e coco (SILVA, 2003), valores superiores aos encontrados no compósito com fibras mecanicamente trituradas. Estes valores devem levar em consideração as dimensões das fibras utilizadas e a proporção na mistura nos estudos, porém observa-se que o resultado obtido neste estudo mostra um melhor recobrimento das fibras e a conseqüente menor exposição à absorção da água nas fibras de bananeira trituradas.

As fibras cortadas manualmente apresentaram dimensões que variaram de aproximadamente 1 até 5 mm, devido ao processo utilizado para o corte. A Figura 38a mostra uma micrografia de MEV da fibra de bananeira cortada manualmente com as medidas das dimensões. A aparência da superfície das fibras mostrou que não houve amassamento na região de contato com a tesoura utilizada para o corte. Também se observou que a parede celular das fibras apresentou-se intacta em função de não ter sido utilizado tratamento químico nas mesmas, similar ao observado por MERLINI (2011) em fibras de bananeira sem tratamento alcalino. As fibras mecanicamente trituradas apresentaram variação similar na medida do comprimento, porém devido ao processo de trituração o feixe natural de fibras unido principalmente pela lignina foi separado, deixando-as isoladas com o diâmetro variando de aproximadamente 13 a 60 µm, conforme micrografia e MEV da figura 38b, porém este diâmetro pode chegar até a 400 µm, conforme citado por PAPPU *et al.* (2015).

**Figura 38 - Micrografia de MEV da fibra de bananeira: (a) cortada manualmente; (b) triturada mecanicamente**



(a)

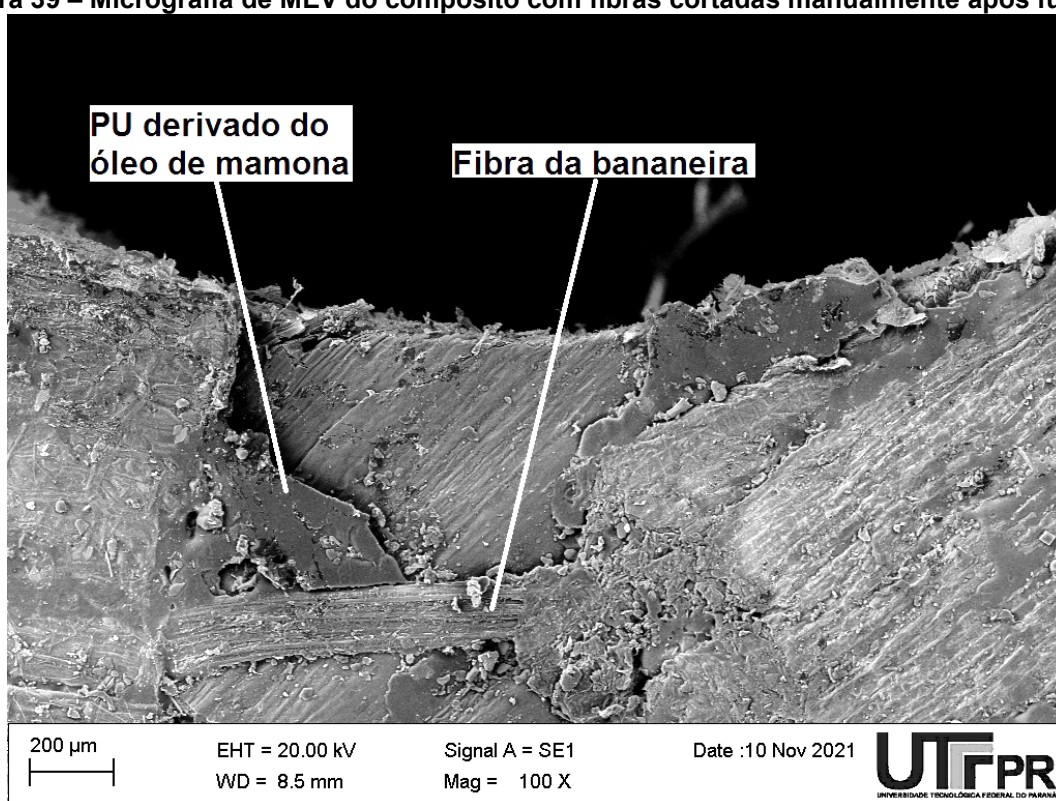


(b)

Fonte: Autoria própria (2021)

A Figura 39 mostra a superfície do compósito com fibras cortadas manualmente com a interface fibra/matriz e a disposição multidirecional das fibras. Devido à variação nas dimensões dos pedaços de fibras, ainda unidas naturalmente pela lignina, observou-se que durante a acomodação das camadas na prensagem do painel ocorreram alguns espaços vazios, principalmente nas camadas externas. Estes espaços vazios podem acontecer pela acomodação entrelaçada das fibras multidirecionais como também pode ser influenciado pelas bolhas decorrentes do processo de cura do PU

**Figura 39 – Micrografia de MEV do compósito com fibras cortadas manualmente após furação**

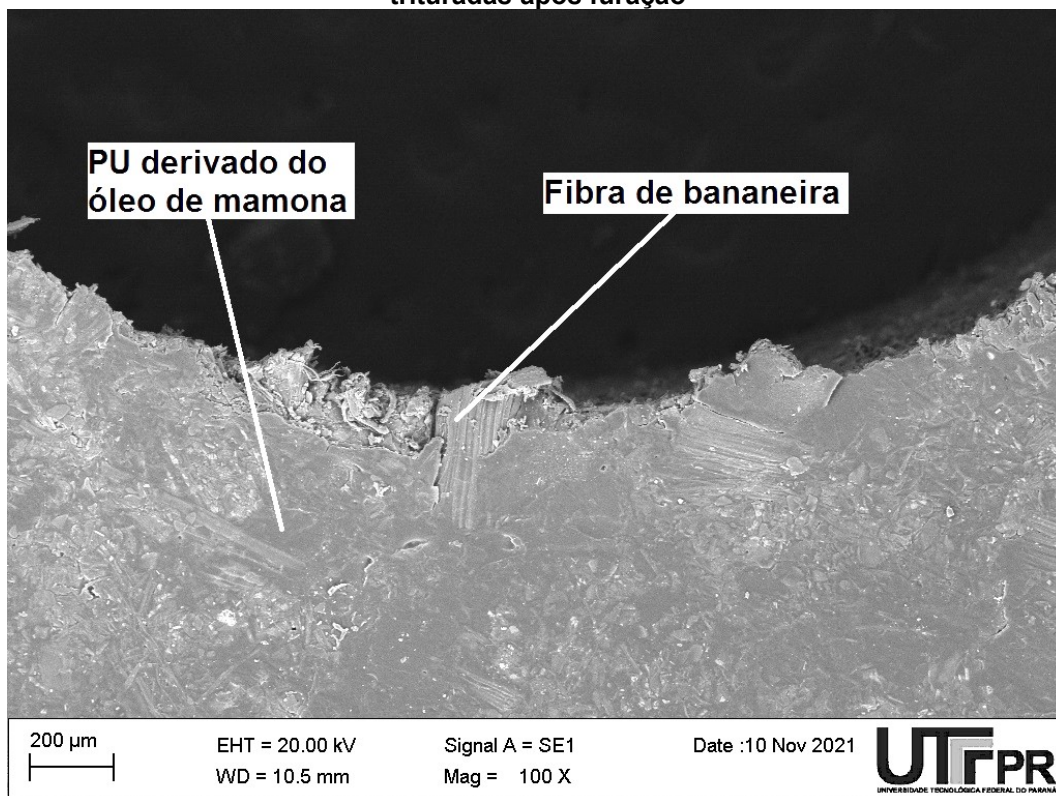


**Fonte: Autoria própria (2021)**

No compósito com fibras mecanicamente trituradas observou-se uma melhor acomodação entre as fibras e a matriz. Devido às dimensões menores das fibras obtidas no processo mecânico, que separa os feixes unidos naturalmente e expõe toda superfície das fibras, a interação com a matriz acontece de forma mais eficiente reduzindo o número de vazios ou de bolhas, melhorando a interface com o PU. Apesar de utilizado o processo mecânico, ainda observaram-se alguns pedaços de fibras unidos naturalmente. A Figura 40 mostra a superfície do compósito com fibras

mecanicamente trituradas, observando-se uma melhor acomodação das fibras e da matriz em relação às fibras cortadas manualmente.

**Figura 40 – Micrografia de MEV da superfície do compósito com fibras mecanicamente trituradas após furação**



**Fonte: Autoria própria (2021)**

#### **4.2 Avaliação das avarias nos furos do compósito com fibras trituradas mecanicamente**























































A Figura 41 mostra um comparativo da aparência nas furações executadas no compósito com fibras do caule da bananeira mecanicamente trituradas em função dos parâmetros de furação e tipos de brocas utilizados, na face de entrada e de saída dos furos. Nesta figura foi preservada a coloração natural do material buscando-se primeiramente uma comparação visual dos resultados. Apesar da execução de três furações para cada parâmetro e tipo de broca, a figura mostra apenas um resultado em função de que a variação dos valores em cada um destes parâmetros não mostrou diferenças significativas.

Uma análise visual dos resultados obtidos mostra de uma forma geral que os furos realizados apresentaram uma qualidade considerada adequada, sem avarias



que pudessem comprometer a passagem de sistemas de fixação, como parafusos ou rebites. Também não são perceptíveis visualmente, sem auxílio de equipamentos, defeitos que pudessem comprometer estruturalmente o material após submetido a esforços mecânicos oriundos de montagens com diferentes sistemas de fixação. Estes defeitos estariam relacionados a trincas, rachaduras ou remoção significativa de material pelo processo de furação. Contudo, foram realizadas investigações com auxílio de microscopia para analisar e avaliar as condições do material mais detalhadamente.

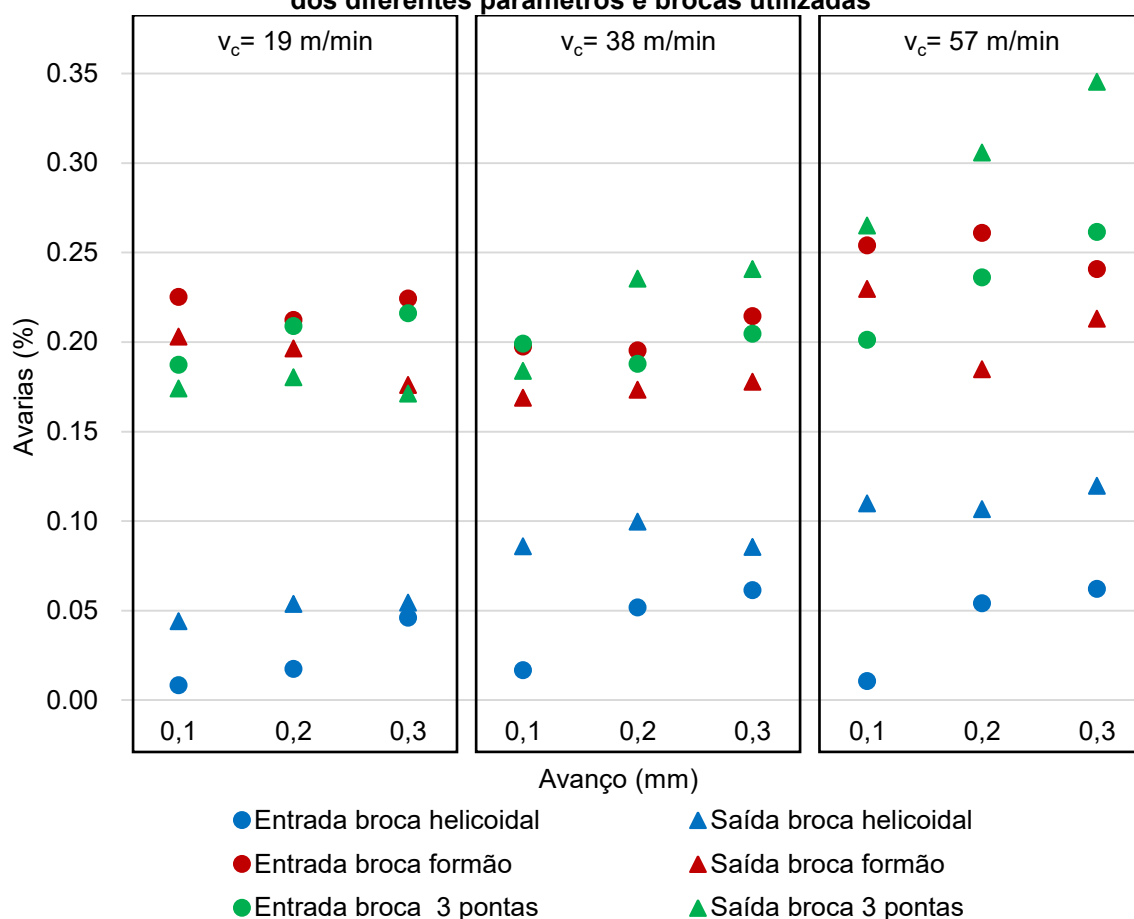
**Figura 41 – Parâmetros de furação e aparência na entrada e saída dos furos realizados no compósito com fibras trituradas mecanicamente**

	$v_c$ (m/min)	$f$ (mm/rot)	Entrada			Saída		
			Helicoidal	3 pontas	Formão	Helicoidal	3 pontas	Formão
1	18,8	0,1						
2	18,8	0,2						
3	18,8	0,3						
4	37,6	0,1						
5	37,6	0,2						
6	37,6	0,3						
7	56,5	0,1						
8	56,5	0,2						
9	56,5	0,3						

Fonte: Autoria própria (2021)

A Figura 42 mostra o gráfico comparativo com os valores das avarias medidas após o processo de furação neste tipo de compósito. Foram avaliados os furos na face de entrada e saída da broca no material levando-se em conta o fator de avaria ( $F_a$ ) proposto, calculando-se os danos causados pelo processo com as diferentes brocas e parâmetros aplicados. Os tipos de avarias observadas são analisados detalhadamente no tópico 4.5, porém percebeu-se neste momento que a concentração dos danos aconteceram principalmente nas bordas de entrada e saída dos furos, com as paredes não apresentando defeitos consideráveis.

**Figura 42 – Avarias nos furos do compósito com fibras mecanicamente trituradas em função dos diferentes parâmetros e brocas utilizadas**



Fonte: Autoria própria (2021)

Na comparação geral, a broca helicoidal mostrou menores avarias em relação aos outros modelos, com os valores da entrada menores em relação à saída. Para as três velocidades de corte ocorreram aumentos das avarias na entrada com o incremento no avanço. Na saída observou-se uma influência da velocidade de corte no aumento dos valores.

A broca formão apresentou um maior valor de avarias na entrada comparado com a saída, com um aumento de danos para velocidade de corte mais alta. Com a broca três pontas o comportamento foi similar, porém a partir da velocidade de corte intermediária as avarias na entrada foram menores em relação à saída.

Após a comparação geral entre os resultados foram realizadas análises individuais dos valores das avarias para cada modelo de broca. Buscou-se desta maneira uma compreensão mais detalhada do comportamento de cada broca durante o processo de furação em função dos parâmetros aplicados.

#### 4.2.1 Avarias nos furos do compósito com fibras mecanicamente trituradas utilizando broca modelo helicoidal

A broca helicoidal apresentou os menores valores de avarias nos furos em relação às outras brocas utilizadas, tanto na entrada quanto na saída do furo. Os resultados observados, entre todos os parâmetros de furação aplicados, mostraram de uma forma geral valores que variaram de aproximadamente  $F_a=0,01$  até  $0,12\%$ .

No processo de entrada da broca no material, o menor valor de avarias na borda do furo ( $F_a= 0,01\%$ ) foi obtido com as menores velocidades de corte e avanço (19 m/min; 0,1 mm). O maior valor encontrado ( $F_a= 0,06\%$ ) foi resultado da maior velocidade de corte e avanço (57 m/min; 0,3 mm).

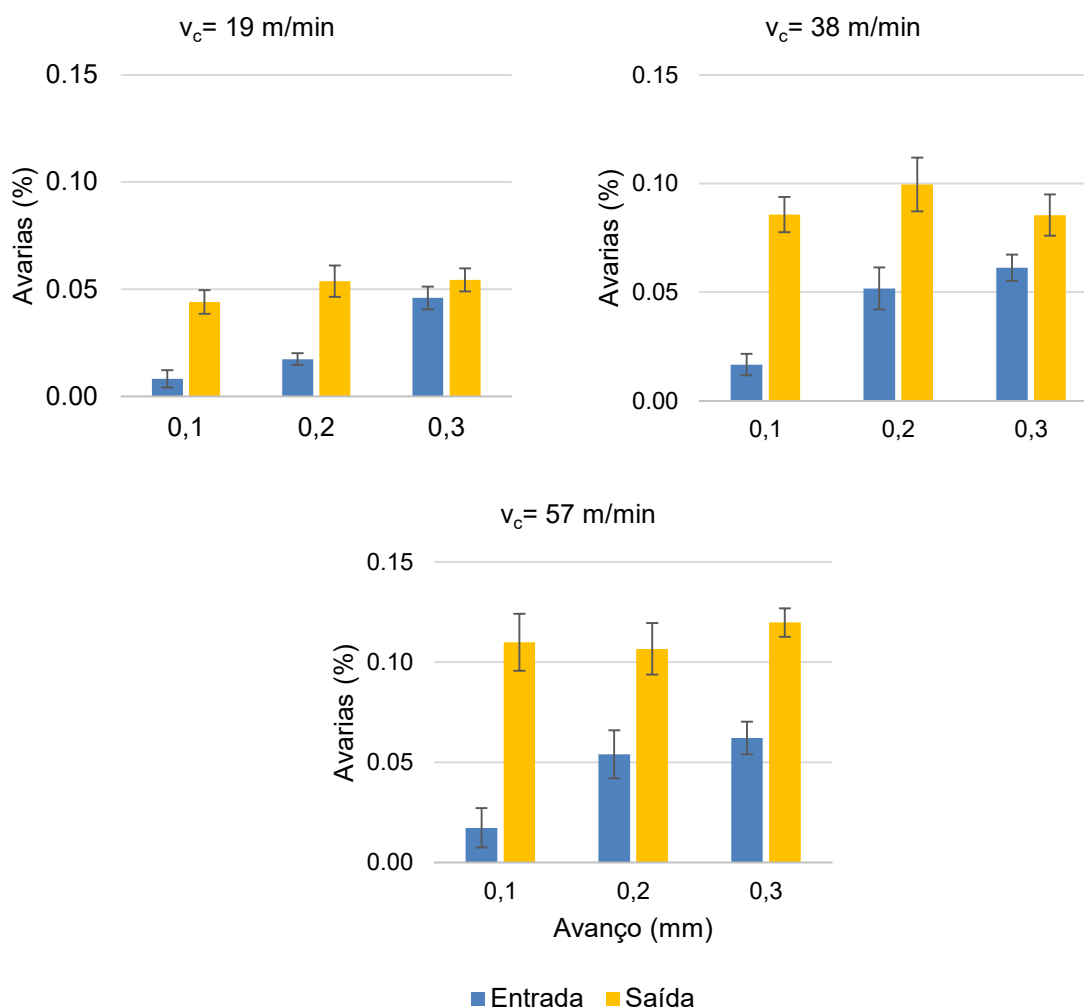
Na saída da broca, o menor valor encontrado ( $F_a= 0,04\%$ ) ocorreu para a menor velocidade de corte e avanço (19 m/min; 0,1 mm). O maior valor ( $F_a= 0,12$ ) foi resultado da maior velocidade de corte e avanço (57 m/min; 0,3 mm).

Na Figura 43 observam-se as variações dos valores médios com o desvio padrão das avarias em função das velocidades de corte e avanço utilizadas nos testes.

Na entrada dos furos, para as três velocidades de corte empregadas e com o menor avanço, foram observados menores danos aos furos. O incremento no avanço mostrou uma tendência de elevação nas avarias. Este incremento, mantendo a mesma velocidade de corte, fez com que a área de corte do material pelas arestas de corte da broca aumentasse. Com o aumento da área de corte um maior número de fibras pode ser envolvido pela passagem das arestas de corte, onde o processo de fratura destas fibras pode elevar a intensidade das avarias. Comportamento similar foi apontado por Patel *et al.* (2015) na avaliação da

delaminação de um compósito com fibras de bananeira e matriz poliéster. Apesar de uma proporção menor de fibras (12% em peso) os autores afirmam que o fator de delaminação na entrada aumentou com a elevação nos avanços e da velocidade de corte. Os resultados obtidos neste trabalho também mostraram que além da influência do avanço, o aumento na velocidade de corte levou a um acréscimo no número de danos na entrada dos furos.

**Figura 43 – Variação dos valores das avarias em função das velocidades de corte e avanço com broca helicoidal no compósito de fibras trituradas mecanicamente**



**Fonte: Autoria própria (2021)**

Na saída, o incremento na velocidade de corte foi o fator que mais influenciou o aumento de avarias. Levando-se em consideração o desvio padrão das medições, os valores obtidos dentro de cada velocidade de corte não mostraram uma influência significativa dos avanços aplicados. Patel *et al.* (2015) afirmam que o

fator de delaminação na saída reduziu com o aumento na velocidade de corte, porém Venkateshwaran e Perumal (2013) afirmaram em sua pesquisa na furação de um compósito com matriz epóxi e fibras de bananeira na proporção de 20% em peso ( fibras com 15 mm de comprimento) que os danos na entrada e na saída aumentaram com o incremento da velocidade de corte.

Este aumento das avarias pode ser influenciado pela ação da aresta transversal e das velocidades máximas alcançadas pelas quinas das arestas de corte da broca. Ao se aproximar da saída do furo a espessura do compósito fica reduzida, diminuindo a resistência da interface fibra/matriz. Sabendo-se que o movimento da aresta transversal age como um processo de extrusão (TRENT e WRIGHT, 2000) pode-se afirmar que este movimento empurra as fibras localizadas nas últimas camadas. Com a resistência fragilizada, o movimento de extrusão da parte central do furo combinado com o aumento da frequência do contato das quinas das arestas de corte pelo aumento da velocidade de corte faz com que as fibras se movimentem com maior intensidade, independente do avanço, e evitem a fratura adequada elevando as avarias. Esta movimentação também é influenciada pelo comportamento viscoelástico das fibras da bananeira. Este comportamento fica evidenciado pelo menor número de avarias na saída quando utilizada a velocidade de corte mais baixa.

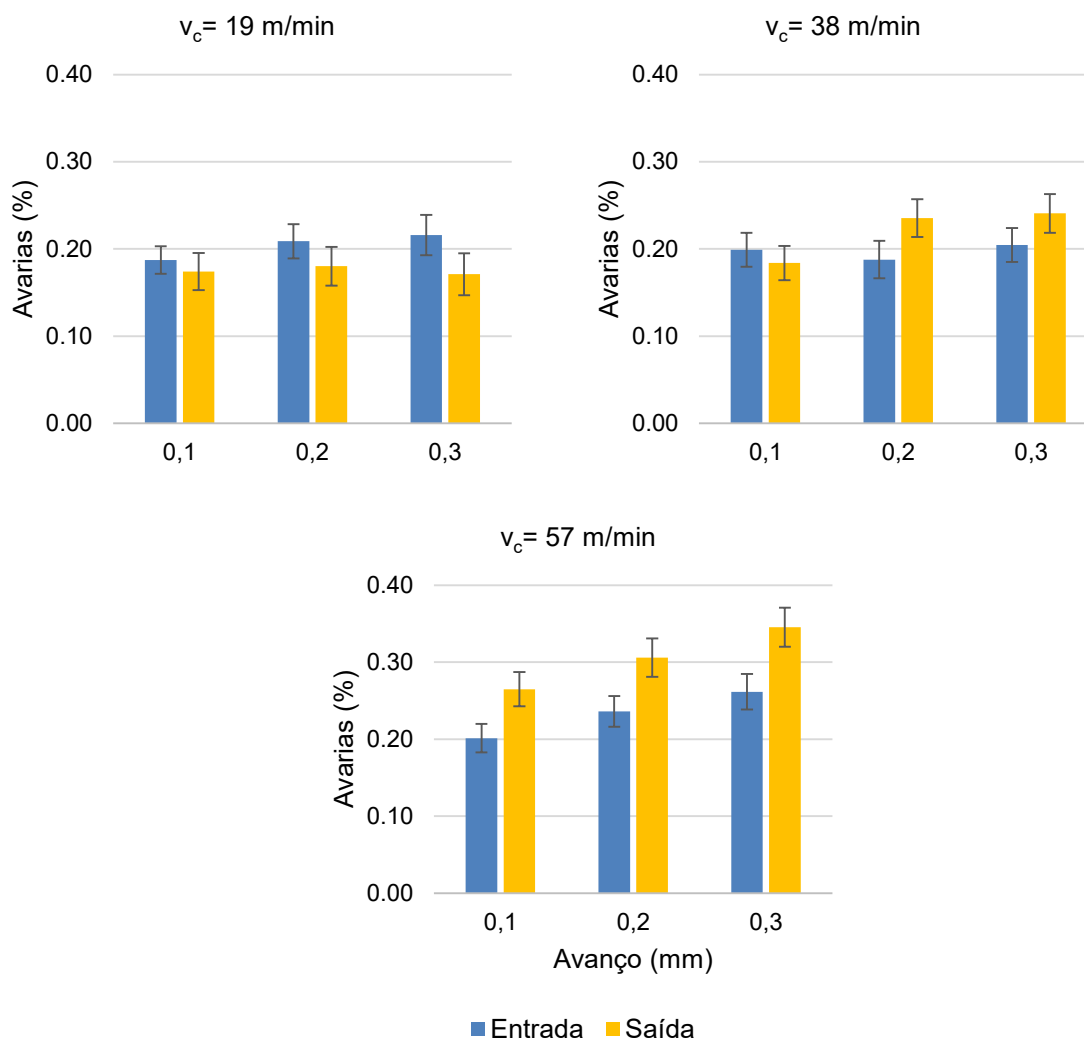
#### 4.2.2 Avarias nos furos do compósito com fibras mecanicamente trituradas utilizando broca modelo três pontas

No processo de entrada da broca no material, o menor valor de avarias na borda do furo ( $F_a = 0,19\%$ ) foi obtido com as menores velocidades de corte e avanço (19 m/min; 0,1 mm). O maior valor encontrado ( $F_a = 0,26\%$ ) foi resultado da maior velocidade de corte e avanço (57 m/min; 0,3 mm).

Na saída da broca do material, o menor valor encontrado ( $F_a = 0,17\%$ ) foi obtido utilizando-se velocidade de corte de 19 m/min e avanço de 0,3 mm. O maior valor ( $F_a = 0,34$ ) foi resultado da maior velocidade de corte e avanço (57 m/min; 0,3 mm).

Na Figura 44 observam-se as variações dos valores médios com o desvio padrão das avarias em função das velocidades de corte e avanço aplicadas.

**Figura 44 - Variação das avarias em função das velocidades de corte e avanço com broca três pontas no compósito de fibras trituradas mecanicamente**



**Fonte: Autoria própria (2021)**

A broca três pontas apresentou maiores valores de avarias nos furos em relação à helicoidal, tanto na entrada quanto na saída. Os resultados observados mostraram valores de  $F_a$  entre aproximadamente 0,17 a 0,34%. No trabalho de Azuan *et al.* (2012) também foram comparados o número de avarias na furação de um compósito com cascas de arroz e matriz poliéster utilizando brocas modelo helicoidal e três pontas. Os autores afirmaram que a broca modelo helicoidal com ângulo de ponta  $118^\circ$  e diâmetro 6 mm gerou menor número de avarias em relação ao modelo três pontas, comportamento similar ao observado neste trabalho.

Para as velocidades de corte de 19 e 38 m/min os valores das avarias foram próximos a 0,20% na entrada e saída, levando em consideração o desvio padrão,

com os avanços não demonstrando influência sobre os resultados. Com a velocidade de corte de 57 m/min foi verificada uma elevação das avarias em função do aumento do avanço, tanto na entrada quanto na saída. Tabet *et al.* (2021), também utilizando broca três pontas para furação de compósito com fibras juta/cortiça com matriz epóxi, apontaram a influência do avanço no aumento da delaminação, sem uma interferência do incremento na velocidade de corte. Os autores avaliaram somente os danos na saída dos furos, utilizando um suporte de metal para reduzir as avarias nos furos.

Conforme observado nos resultados, a velocidade de corte mais alta em conjunto com o aumento no avanço elevou gradativamente os números de avarias. Este comportamento é similar ao observado na furação com a broca helicoidal, onde a elevação nos valores de avarias na saída pode também estar relacionada a uma maior movimentação das fibras resultante de rotações mais altas da ferramenta. Isto influenciou negativamente na qualidade do furo.

#### 4.2.3 Avarias nos furos do compósito com fibras mecanicamente trituradas utilizando broca modelo formão

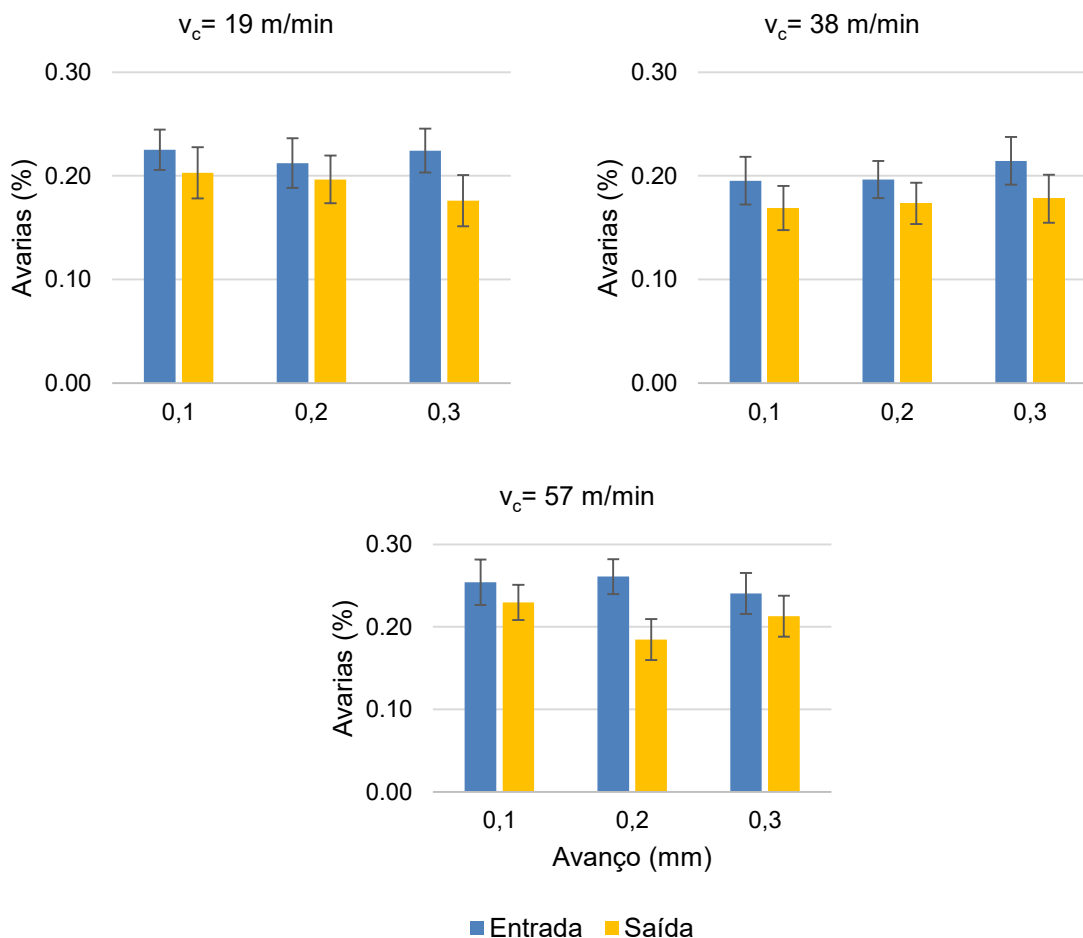
No processo de entrada da broca no material, o menor valor de avarias na borda do furo ( $F_a = 0.19\%$ ) foi obtido com velocidade de corte de 38 m/min e avanço de 0,2 mm. O maior valor encontrado ( $F_a = 0.26\%$ ) foi resultado da maior velocidade de corte com 57 m/min e avanço de 0,2 mm.

Na saída o menor valor encontrado ( $F_a = 0.17\%$ ) foi obtido utilizando-se velocidade de corte de 38 m/min com avanço de 0,1 mm. O maior valor ( $F_a = 0.23\%$ ) foi resultado velocidade de corte de 57 m/min com o avanço de 0,1 mm.

Na Figura 45 observam-se as variações dos valores médios com o desvio padrão das avarias em função das velocidades de corte e avanço aplicadas.

Similar ao comportamento da broca três pontas, as avarias medidas nos furos foram maiores em relação à broca helicoidal. Os resultados observados mostraram de uma forma geral valores de  $F_a$  concentrados entre aproximadamente 0,17 a 0,26% nos furos.

**Figura 45 - Variação das avarias em função das velocidades de corte e avanço com broca formão no compósito de fibras trituradas mecanicamente**



**Fonte: Autoria própria (2021)**

Observou-se um maior número de avarias na entrada em relação à saída dos furos para todos os parâmetros utilizados. O incremento no avanço dentro da mesma velocidade de corte não mostrou influenciar significativamente nos resultados. Com a velocidade de corte de 19 m/min os valores medidos mostraram-se praticamente constantes na entrada e na saída em função do avanço, com redução discreta para a saída com avanço de 0,3 mm. A velocidade de corte de 38 m/min apresentou os menores valores de danos, também com valores sem alterações significativas em função do incremento no avanço. Com a velocidade de corte de 57 m/min os valores das avarias foram maiores em relação às outras velocidades de corte aplicadas, também sem influência dos avanços.

Levando-se em consideração o desvio padrão dos resultados, pode-se afirmar que os valores ficaram próximos a 0,20%, tanto na entrada quanto na saída, com um incremento para a velocidade de corte de 57 m/min, similar ao



comportamento da broca três pontas. Choudhury *et al.* (2018) comentam em sua investigação sobre a furação em compósitos que o calor gerado na região do furo pode influenciar no processo de fratura das fibras vegetais em compósitos. Com a temperatura chegando próxima ao valor de transição vítrea da matriz, a interface fibra/matriz ficaria comprometida e ao contrário de sofrerem o cisalhamento ou fratura pelas arestas de corte da broca sofreriam um processo similar a uma extrusão, comprometendo a qualidade. Os autores afirmaram que a delaminação foi mais severa na saída dos furos e o aumento de temperatura estaria relacionada ao aumento na velocidade de corte, porém o compósito avaliado pelos autores foi fabricado com fibras de urtiga e matriz epóxi e os parâmetros, principalmente o avanço, foram menores aos aplicados nesta pesquisa. Neste trabalho não foram observados indícios de algum fenômeno térmico nos furos durante a microscopia. O comportamento de maiores defeitos para a velocidade de corte mais alta é similar ao observado nas brocas helicoidal e três furos, onde novamente a maior frequência de ação das arestas de corte com o aumento da rotação contribuiu para movimentação das fibras das camadas externas e o conseqüente comprometimento no processo de fratura e da qualidade do furo.

#### **4.3 Avaliação das avarias nos furos do compósito com fibras cortadas manualmente**

A Figura 46 mostra a aparência das furações executadas no compósito com fibras do caule da bananeira cortadas manualmente em função dos parâmetros de furação e tipos de brocas utilizados, na face de entrada e de saída da ferramenta do compósito. Similar ao outro compósito foi preservada a coloração natural do material buscando-se primeiramente uma comparação visual dos resultados. Apesar da execução de três furações para cada parâmetro e tipo de broca, a figura mostra apenas um resultado, em função de que a variação dos valores medidos em cada um destes parâmetros não mostrou diferenças significativas, similar ao outro compósito.

**Figura 46 - Parâmetros de furação e aparência na entrada e saída dos furos realizados no compósito com fibras trituradas manualmente**

	$V_c$ (m/min)	$f$ (mm/rot)	Entrada			Saída		
			Helicoidal	3 pontas	Formão	Helicoidal	3 pontas	Formão
1	18,8	0,1						
2	18,8	0,2						
3	18,8	0,3						
4	37,6	0,1						
5	37,6	0,2						
6	37,6	0,3						
7	56,5	0,1						
8	56,5	0,2						
9	56,5	0,3						

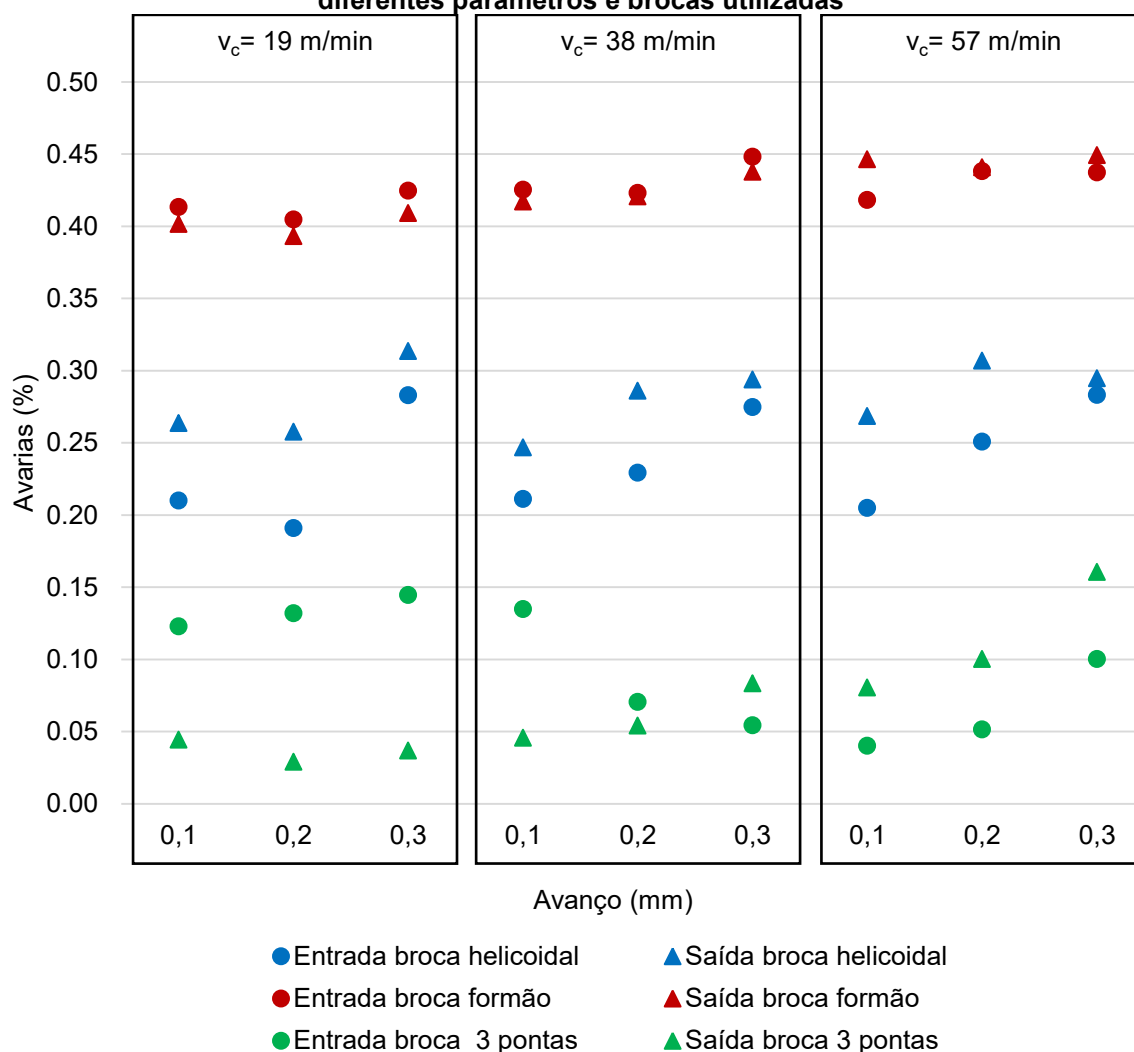
**Fonte: Autoria própria (2021)**

Diferente do compósito fabricado com processo mecanizado, a análise visual mostrou um maior comprometimento na qualidade dos furos realizados. Levando em consideração que para este painel utilizou-se um processo manual no preparo das fibras, observa-se que, apesar de alguns furos apresentarem uma qualidade considerada adequada, grande parte dos resultados mostrou comprometimento e defeitos. Entre os principais defeitos pode-se destacar fibras não cortadas adequadamente sobre as bordas de entrada e saída dos furos, o que pode comprometer o uso de sistemas de fixação. Desta forma, com auxílio da

microscopia, procurou-se compreender a intensidade destas avarias em função das ferramentas e parâmetros aplicados.

A Figura 47 mostra o gráfico comparativo das avarias encontradas após o processo de furação neste tipo de compósito. Novamente foram avaliados os furos na face de entrada e saída da broca no material levando-se em conta o fator de avaria ( $F_a$ ) proposto, calculando-se os danos causados pelo processo de furação com as diferentes brocas e parâmetros aplicados. Os tipos de avarias também são analisados detalhadamente no tópico 4.5, porém percebeu-se que, novamente, a concentração dos danos ocorreram principalmente nas bordas de entrada e saída dos furos, com as paredes não apresentando avarias consideráveis, comportamento similar ao compósito com fibras trituradas mecanicamente.

**Figura 47 - Avarias nos furos do compósito com fibras cortadas manualmente em função dos diferentes parâmetros e brocas utilizadas**



Fonte: Autoria própria (2021)

Neste tipo de compósito, a broca modelo três pontas mostrou valores mais baixos de avarias, tanto na entrada quanto na saída dos furos, em relação aos outros dois modelos. Foi possível observar que os danos causados na saída desta broca foram menores que na entrada até a velocidade de corte intermediária, onde este comportamento se inverteu. Comparando-se ao compósito com fibras mecanicamente trituradas, esta broca mostrou uma considerável redução nos valores de avarias.

A broca modelo helicoidal mostrou valores intermediários nas avarias em relação aos outros dois modelos. Comparando-se aos valores encontrados na furação do outro tipo de compósito os resultados mostraram um aumento na geração de danos. A broca modelo formão apresentou os valores mais altos de danos aos furos neste tipo de compósito. Em relação à furação no compósito com fibras mecanicamente trituradas o aumento das avarias foi significativo. Entre os dois tipos de compósitos e todas as brocas testadas a modelo formão foi a que mais apresentou danos na furação.

Similar ao outro tipo de compósito, após a comparação geral entre os resultados obtidos com os três modelos de brocas, foi realizada uma análise individual dos valores das avarias para cada modelo. Buscou-se novamente uma compreensão mais detalhada do comportamento de cada broca durante o processo de furação em função da diferença nas dimensões das fibras utilizadas na fabricação do material.

#### 4.3.1 Avarias nos furos do compósito com fibras cortadas manualmente utilizando broca modelo helicoidal

Comparando-se os valores medidos com este modelo de broca aos valores encontrados na furação do compósito com fibras mecanicamente trituradas, os resultados foram consideravelmente superiores, tanto na entrada quanto na saída do furo.

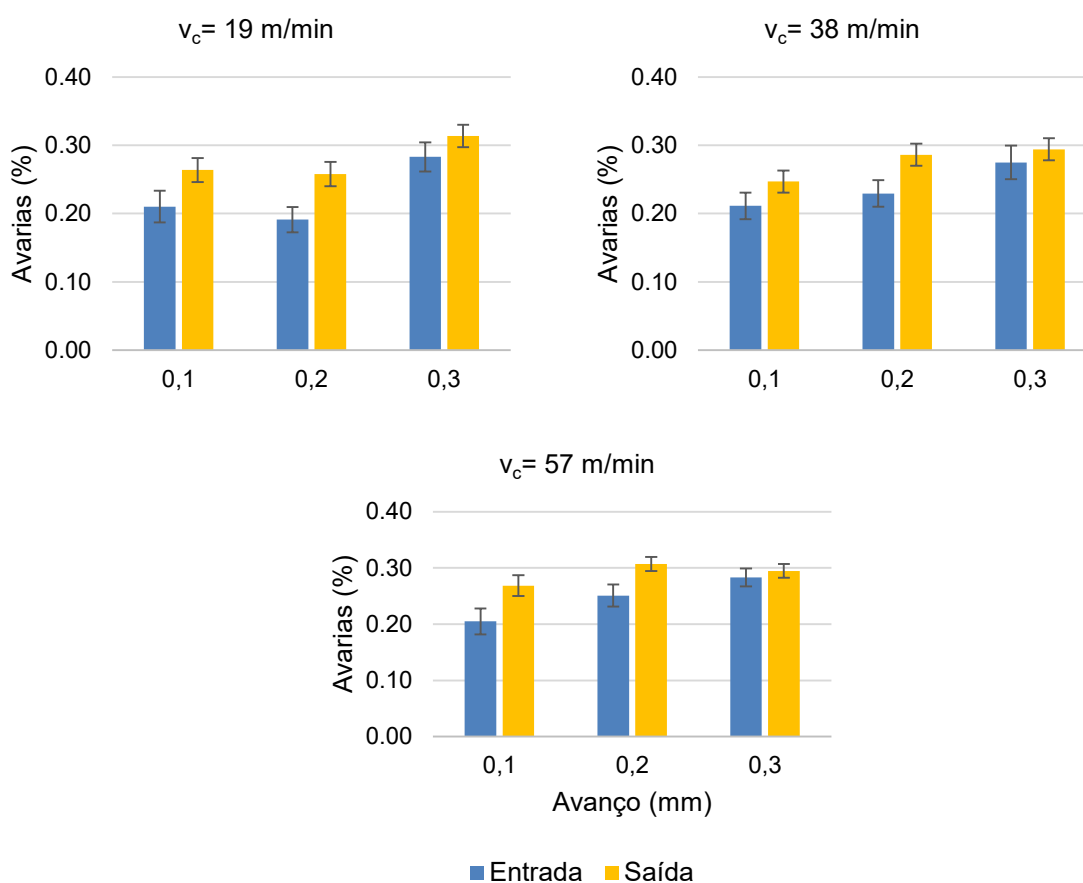
Na entrada da broca o menor valor medido ( $F_a = 0.19\%$ ) foi obtido com velocidade de corte de 19 m/min e avanço de 0,2 mm. O maior valor encontrado ( $F_a = 0.28\%$ ) ocorreu para a velocidade de corte de 19 m/min a avanço de 0,3 mm e

também para a velocidade de corte de 57 m/min com avanço de 0,3 mm, com uma discreta variação.

Na saída o menor valor encontrado ( $F_a = 0.25\%$ ) ocorreu na velocidade de corte de 38 m/min com avanço de 0,1 mm. O valor mais alto ( $F_a = 0.31\%$ ) foi para a velocidade de corte de 19 m/min e avanço de 0,3 mm.

Na Figura 48 observam-se as variações dos valores médios com o desvio padrão das avarias em função das velocidades de corte e avanço aplicadas.

**Figura 48 - Variação das avarias em função das velocidades de corte e avanço com broca helicoidal no compósito de fibras cortadas manualmente**



**Fonte: Autoria própria (2021)**

Observou-se que para todos os parâmetros utilizados as avarias foram menores na entrada comparadas a saída da broca. As menores velocidades de avanço apresentaram menores danos aos furos, tanto na entrada quanto na saída, para todas as velocidades de corte utilizadas, juntamente com a velocidade de corte de 19 m/min com avanço de 0,2 mm. Para todas as velocidades de corte utilizadas o incremento no avanço mostrou influenciar no aumento das avarias medidas. Os

resultados observados entre todos os parâmetros de furação aplicados mostraram, de uma forma geral, valores concentrados entre aproximadamente  $F_a = 0,19$  e  $0,31\%$  nos furos.

Levando-se em consideração o método de fabricação deste material e os valores observados, o comportamento em relação aos parâmetros aplicados foi similar à furação no compósito com fibras mecanicamente separadas. Porém observou-se que apesar do incremento na velocidade de corte, os valores de avarias foram próximos para os avanços aplicados.

O maior número de avarias para este material pode ser justificado pela diferença de fabricação entre os compósitos e suas propriedades. Este compósito possui uma densidade mais baixa e as fibras cortadas manualmente possuem dimensões maiores que as do processo mecânico, resultando em uma menor interface fibra/matriz. Durante a furação a ação das arestas de corte movimentou com maior intensidade os feixes de fibras, evitando o corte adequado e consequentemente elevando o número de avarias.

#### 4.3.2 Avarias nos furos do compósito com fibras cortadas manualmente utilizando broca modelo três pontas

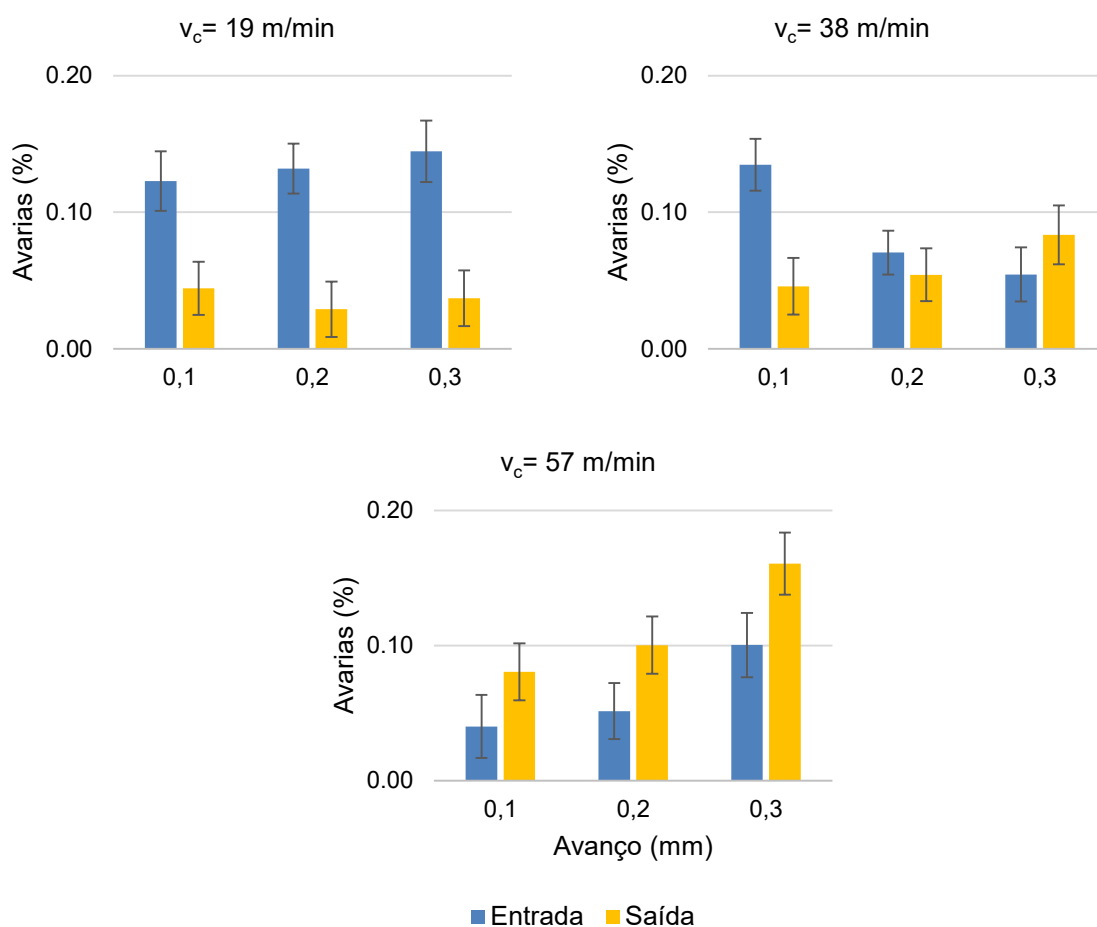
Este modelo de broca apresentou os menores valores de avarias nos furos em relação aos outros modelos utilizados. Comparada à furação no compósito com fibras mecanicamente trituradas, os valores das avarias foram mais baixos. Após a observação dos resultados, os parâmetros mais adequados para furação com este modelo de broca neste material foram com a velocidade de corte de  $38 \text{ m/min}$  e avanço entre  $0,2$  e  $0,3 \text{ mm}$ , onde os valores mostram uma tendência de equilíbrio entre avarias na entrada e saída dos furos.

Na entrada o menor valor medido ( $F_a = 0.04\%$ ) ocorreu para a velocidade de corte de  $57 \text{ m/min}$  com avanço de  $0,1 \text{ mm}$ . O maior valor ( $F_a = 0.14\%$ ) encontrado foi para a velocidade de corte  $19 \text{ m/min}$  com avanço de  $0,3 \text{ mm}$ .

Na saída o menor valor encontrado ( $F_a = 0.03\%$ ) foi para a velocidade de corte de  $19 \text{ m/min}$  com avanço de  $0,2 \text{ mm}$ . O valor mais alto ( $F_a = 0.16\%$ ) foi com a velocidade de corte de  $57 \text{ m/min}$  e avanço de  $0,3 \text{ mm}$ .

Na Figura 49 observam-se as variações dos valores das avarias em função das velocidades de corte e avanço aplicadas.

**Figura 49 - Variação das avarias em função das velocidades de corte e avanço com broca três pontas no composto de fibras cortadas manualmente**



**Fonte: Autoria própria (2021)**

Neste modelo observou-se que os danos causados na entrada da broca foram consideravelmente superiores a saída nas velocidades de corte de 19 m/min, para todos os avanços empregados, e para 38 m/min com o avanço de 0,1 mm. Houve uma redução considerável neste comportamento com velocidade de corte de 38 m/min e avanço de 0,2 mm. A partir desta velocidade de corte com o avanço de 0,3 mm, e com velocidade de 57 m/min com todos os avanços empregados, as avarias na entrada foram inferiores às da saída. A influência do avanço foi observada somente para a velocidade de corte de 57 m/min, onde o incremento resultou em maiores avarias

Os resultados observados mostraram de uma forma geral valores concentrados entre aproximadamente  $F_a = 0,03$  e 0,16% nos furos.

A geometria da broca três pontas proporciona um processo de corte similar ao executado pela broca de trepanação. Esta dinâmica proporcionou um pré-corte

das fibras da camada de entrada e saída, evitando um contato direto com as arestas cortantes, responsáveis por movimentar estas fibras e evitar a fratura correta. Além disso, a ponta central da broca diminuiu os esforços em função da pequena espessura da chapa, resultando em um corte com poucas avarias nas arestas do furo, similar ao observado por Ramesh *et al.* (2014) na furação de um compósito híbrido de sisal, fibra de vidro e juta.

Os valores mais baixos de avarias na saída com a menor velocidade de corte podem ser comparados aos observados no outro compósito. Com rotação mais baixa e a conseqüente menor frequência de contato das arestas cortantes, a movimentação das fibras na camada de saída é menor. Na entrada, com um avanço maior, a interação das arestas ocorre de maneira mais rápida pressionando as fibras e evitando deslocamentos indesejados.

#### 4.3.3 Avarias nos furos do compósito com fibras cortadas manualmente utilizando broca modelo formão

Comparando-se os resultados obtidos com esta broca em relação aos encontrados nos furos do compósito com fibras mecanicamente trituradas os valores foram consideravelmente mais altos. Os resultados mostraram de uma forma geral valores concentrados entre aproximadamente  $F_a = 0,40$  e  $0,45\%$  nos furos, os mais altos encontrados na pesquisa.

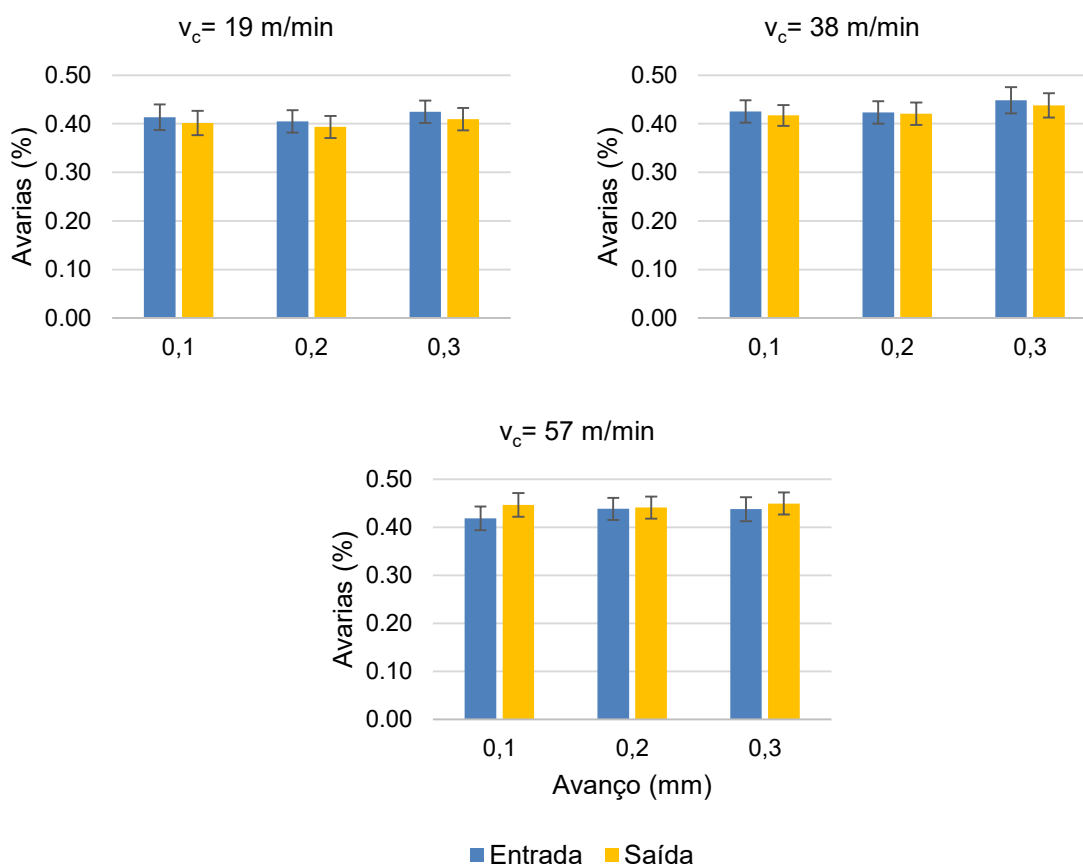
Na entrada o menor valor medido ( $F_a = 0.40\%$ ) foi obtido com velocidades de corte de 19 m/min com avanço de 0,2 mm. O maior valor encontrado ( $F_a = 0.45\%$ ) foi encontrado para velocidade de corte de 38 m/min com o avanço de 0,3 mm.

Na saída o menor valor encontrado ( $F_a = 0.40\%$ ) foi para a velocidade de corte de 19 m/min com o avanço de 0,2 mm. O valor mais alto ( $F_a = 0.45\%$ ) foi com a velocidade de corte de 57 m/min e avanço de 0,3 mm.

A Figura 50 mostra a variação dos médios com o desvio padrão das avarias em relação às diferentes velocidades de corte e avanço.



**Figura 50 - Variação das avarias em função das velocidades de corte e avanço com broca formão no compósito de fibras cortadas manualmente**



**Fonte: Autoria própria (2021)**

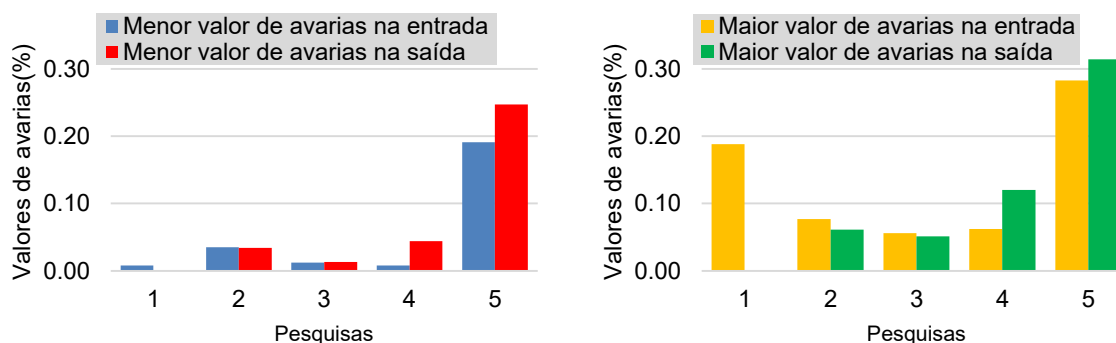
Neste modelo de broca não foram observadas diferenças consideráveis entre os valores medidos com os diferentes parâmetros de velocidade de corte e avanço. As três velocidades de corte utilizadas não mostraram influência nos resultados porém as menores taxas de avanço mostraram uma discreta redução no número de avarias. Em comparação com as brocas helicoidal e três pontas, que possuem suas arestas de corte orientadas pelo ângulo de hélice, a broca formão possui arestas retas que acompanham seu ângulo de ponta. Em função desta geometria o contato com as fibras durante o corte pode ocorrer de forma mais abrupta e promover uma maior movimentação das fibras durante o processo, tanto de entrada quanto da saída, prejudicando uma fratura adequada. O processo de extração do cavaco desta broca também pode influenciar a movimentação das fibras já que esta broca não possui canais de extração como nos outros dois modelos. Independente do avanço ou velocidade de corte as avarias se mostraram muito similares, indicando que este modelo não foi adequado para este compósito.

#### 4.4 Comparação de valores das avarias

Foram encontrados trabalhos que avaliaram as avarias decorrentes da furação em compósitos com fibras de bananeira e diferentes matrizes poliméricas utilizando a broca modelo helicoidal. Para os modelos três pontas e formão não foram encontradas pesquisas com esta fibra, porém foram citados trabalhos em compósitos com diferentes fibras vegetais e matrizes para uma comparação dos valores obtidos neste trabalho. O Quadro 5 mostra os valores encontrados, tanto na entrada quanto na saída, comparados com os valores obtidos em pesquisas na furação de compósitos com fibras de bananeira com a broca modelo helicoidal.

**Quadro 4 - Comparativo de valores mínimos e máximos de avarias medidos neste trabalho com valores encontrados na literatura utilizando broca modelo helicoidal**

Compósito	Broca	Menor valor de avarias / Parâmetros	Maior valor de avaria / Parâmetros	Referência
1 Banana/epóxi	Helicoidal Ø 5 mm	0,008% entrada 1200 rpm; 360mm/min	0,188% entrada 600 rpm; 60 mm/min	CHANDRAMOHAN <i>et al.</i> (2011)
2 Banana/epóxi	Helicoidal Ø 10 mm	0,035% entrada 500 rpm; 50 mm/min	0,077% entrada 2000 rpm; 600 mm/min	VENKATESHWARAN e PERUMAL (2013)
		0,034% saída 500 rpm; 50 mm/min	0,061% saída 2000 rpm; 600 mm/min	
3 Banana/ poliéster	Helicoidal diâmetro não informado	0,012% entrada 3000 rpm; 600 mm/min	0,056% entrada 2000 rpm; 600 mm/min	PATEL <i>et al.</i> (2015)
		0,013% saída 3000 rpm; 900 mm/min	0,051% saída 1000 rpm; 300 mm/min	
4 Banana/PU - Separação mecânica	Helicoidal Ø 6 mm	0,008% entrada 1000 rpm; 100mm/min	0,062% entrada 3000 rpm; 900mm/min	Presente trabalho
		0,044% saída 1000 rpm; 100mm/min	0,120% saída 3000 rpm; 900mm/min	
5 Banana/PU - Corte manual	Helicoidal Ø 6 mm	0,191% entrada 1000 rpm; 200mm/min	0,283% entrada 3000 rpm; 900mm/min	Presente trabalho
		0,247% saída 2000 rpm; 200mm/min	0,314% saída 1000 rpm; 300mm/min	

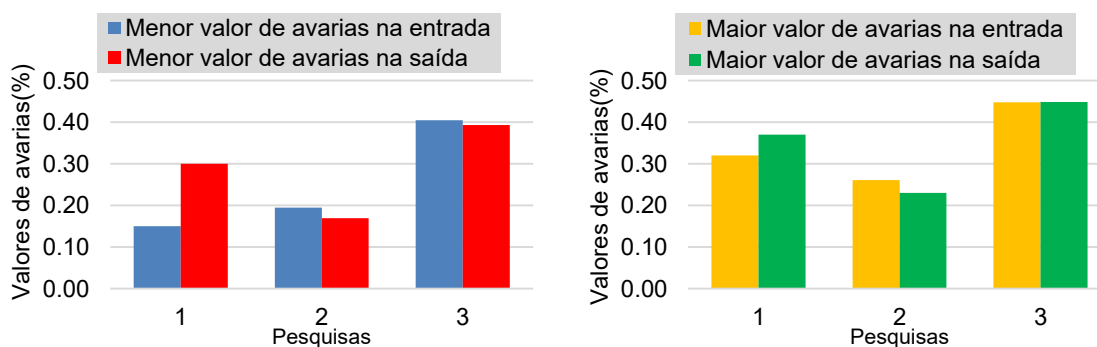


Fonte: Autoria própria (2022)

Apesar das diferenças na fabricação dos compósitos, principalmente na matriz e na fração de fibras utilizada, os menores valores de avarias medidos na furação do compósito com fibras mecanicamente trituradas estão muito próximos e até inferiores aos encontrados na literatura. Exceção para os valores na saída da furação que apresentaram valores superiores. Observou-se também a tendência de valores superiores de danos na saída das furações em todas as pesquisas. O compósito com fibras cortadas manualmente apresentou valores superiores provavelmente pelas fibras apresentarem-se em pedaços, diferente dos outro compósito com fibras trituradas mecanicamente e com uma melhor interface fibra/matriz. Destaca-se ainda a diferença de parâmetros de furação utilizados que resultaram nos menores ou maiores valores de avarias medidos, relacionados diretamente com as diferenças nos materiais. O Quadro 6 mostra os valores deste trabalho comparados com o valor obtido em uma pesquisa na furação de compósitos com fibras vegetais utilizando uma broca similar ao modelo formão.

**Quadro 5 - Comparativo de valores mínimos e máximos de avarias obtidos neste trabalho com valores encontrados na literatura utilizando broca modelo formão**

Compósito	Broca	Menor valor de avarias / Parâmetros	Maior valor de avaria / Parâmetros	Referência
1 Urtiga/Epóxi	Formão Ø 8 mm	≈0,15% entrada 2000 rpm - 8 mm/min	≈0,32% entrada 2000 rpm-22,4 mm/min	CHOUDHURY <i>et al.</i> (2018)
		≈0,30% saída 2000 rpm - 8 mm/min	≈0,37% saída 2000 rpm-22,4 mm/min	
2 Banana/PU - Separação mecânica	Formão Ø 6 mm	0,195% entrada 2000 rpm; 400mm/min	0,261% entrada 3000 rpm; 600mm/min	Presente trabalho
		0,169% saída 2000 rpm; 200mm/min	0,230% saída 3000 rpm; 300mm/min	
3 Banana/PU - Corte manual	Formão Ø 6 mm	0,405% entrada 1000 rpm; 200mm/min	0,448% entrada 2000 rpm; 600mm/min	Presente trabalho
		0,393% saída 2000 rpm; 200mm/min	0,449% saída 3000 rpm; 900mm/min	

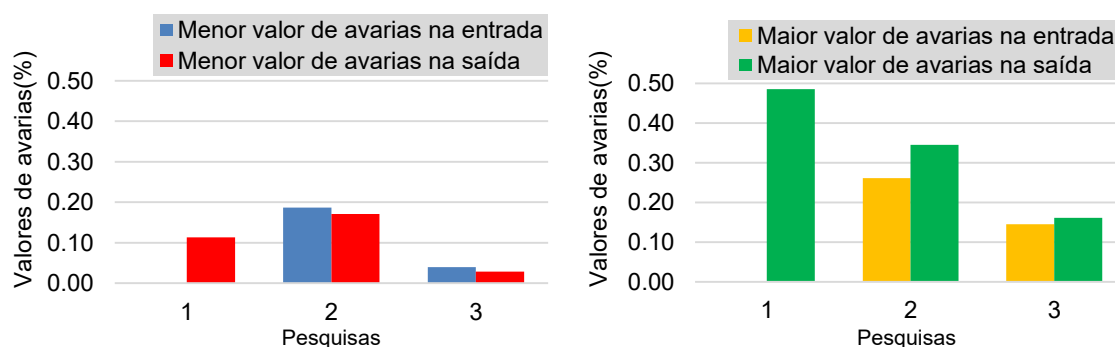


Fonte: Autoria própria (2022)

Os valores medidos no compósito com fibras mecanicamente trituradas também se mostraram próximos e até inferiores comparados aos resultados encontrados por Choudhury *et al.* (2018). Na saída, os menores valores de avarias encontrados neste trabalho foram inferiores. A furação no compósito com fibras cortadas manualmente apresentou valores superiores, similar ao comportamento observado na furação com a broca helicoidal. Esta comparação deve levar em conta a fabricação do compósito, principalmente na fração de fibras utilizada, a matriz e também o diâmetro da broca utilizada, que podem influenciar diretamente os resultados. Outro fator que pode influenciar a comparação é a diferença no tipo de fibra, com propriedades diferentes às da fibra de bananeira. O Quadro 7 mostra os valores deste trabalho comparados com o valor obtido em uma pesquisa na furação de um compósito com fibras vegetais utilizando broca modelo três pontas.

**Quadro 6 - Comparativo de valores mínimos e máximos de avarias obtidos neste trabalho com valores encontrados na literatura utilizando broca modelo três pontas**

Compósito	Broca	Menor valor de avarias / Parâmetros	Maior valor de avaria / Parâmetros	Referência
1 Juta e cortiça/Epóxi	Três pontas Ø 5 mm	0,113% saída 710 rpm; 50mm/min	0,485% saída 355 rpm; 190 mm/min	TABET <i>et al.</i> (2021)
2 Banana/PU - Separação mecânica	Três pontas Ø 6 mm	0,187% entrada 1000 rpm; 100mm/min 0,171% saída 1000 rpm; 300mm/min	0,261% entrada 3000 rpm; 900mm/min 0,345% saída 3000 rpm; 900mm/min	Este trabalho
3 Banana/PU - Corte manual	Três pontas Ø 6 mm	0,040% entrada 3000 rpm; 300mm/min 0,029% saída 1000 rpm; 200mm/min	0,145% entrada 1000 rpm; 300mm/min 0,161% saída 3000 rpm; 900mm/min	Este trabalho



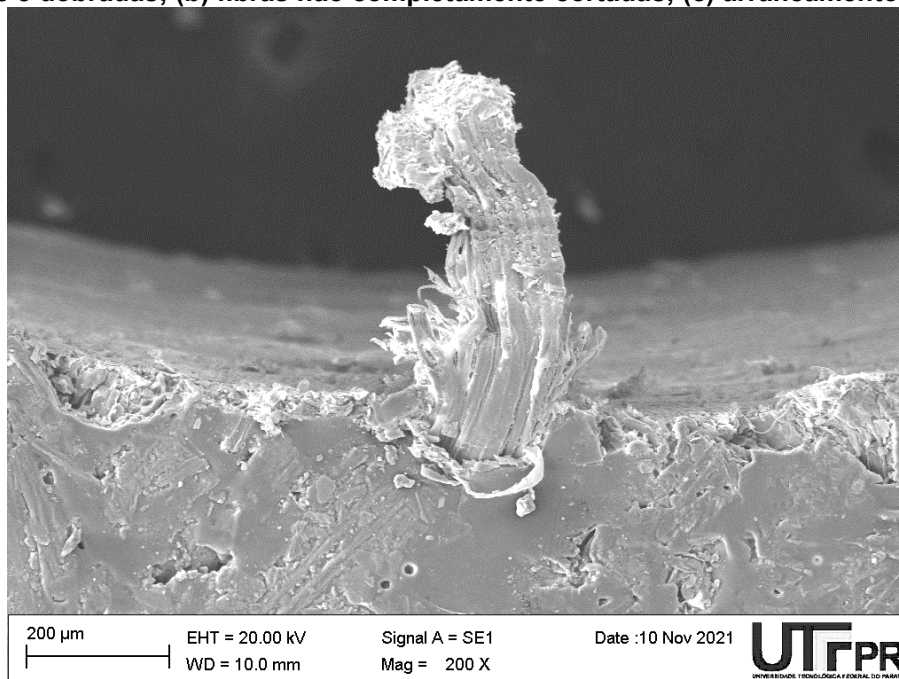
Fonte: Autoria própria (2022)

Apesar da pesquisa de Tabet *et al.* (2021) citarem somente os valores medidos na saída das furações, foi possível observar que esta broca apresentou menores valores de avarias no compósito com fibras cortadas manualmente, comparada aos resultados dos outros materiais.

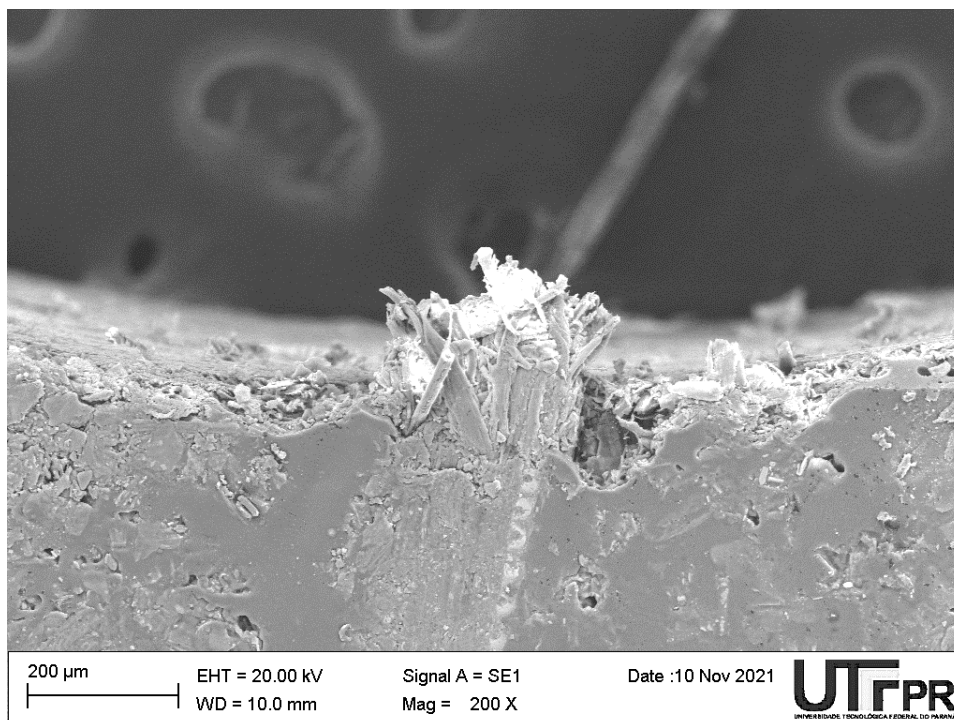
#### 4.5 Análise das avarias através de micrografia de MEV

Através da micrografia de MEV foram analisados os tipos de danos decorrentes do processo de furação nos compósitos. Foram destacados os principais tipos de avarias encontrados, observadas nas furações executadas pelos três modelos de brocas. A Figura 51 mostra as avarias na furação do compósito com fibras mecanicamente trituradas com a broca helicoidal. Na Figura 51a observa-se uma fibra que não foi fraturada pela ação da aresta de corte da broca e a Figura 51b mostra uma fibra não fraturada adequadamente. Nos dois casos nota-se também o aspecto irregular da borda do furo causado pela ação da aresta de corte da broca com a conseqüente fratura e arrancamento da fibra/matriz. Apesar do processo mecânico de separação, observa-se que as fibras não fraturadas encontravam-se ainda unidas em um feixe mantido pela lignina, o que pode ter influenciado o processo de corte pela broca. Na Figura 51c observa-se o espaço deixado pelo arrancamento da fibra/matriz na primeira camada do compósito e fibras dobradas e não fraturadas pela ação da broca.

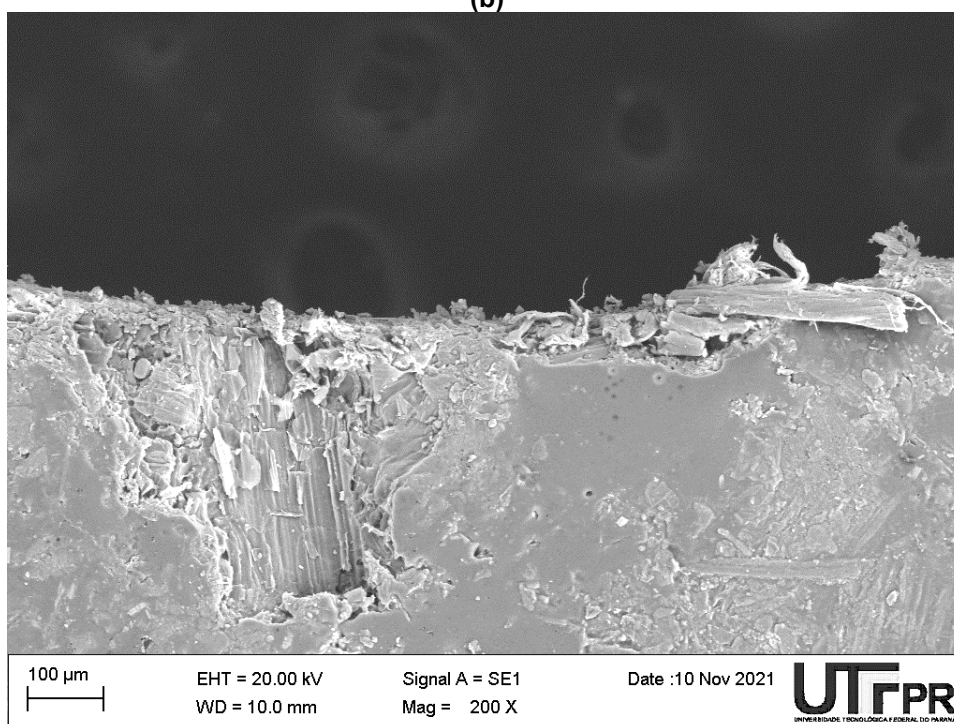
**Figura 51 – Micrografia de MEV da entrada na furação no compósito com fibras mecanicamente trituradas utilizando broca helicoidal ( $v_c = 19$  m/min;  $f = 0,1$  mm): (a) fibras não cortadas e dobradas; (b) fibras não completamente cortadas; (c) arrancamento de fibras**



(a)



(b)



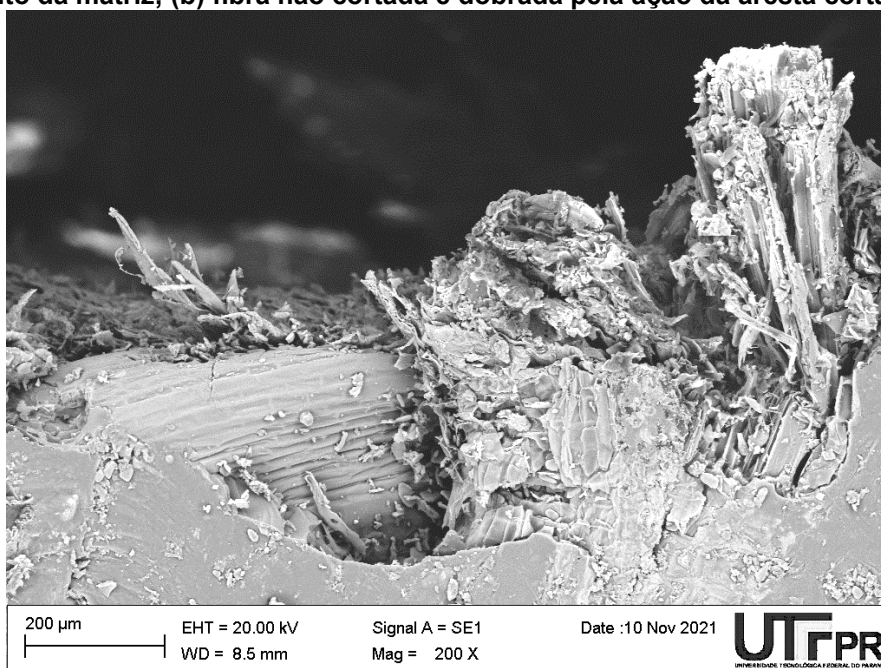
(c)

Fonte: Autoria própria (2021)

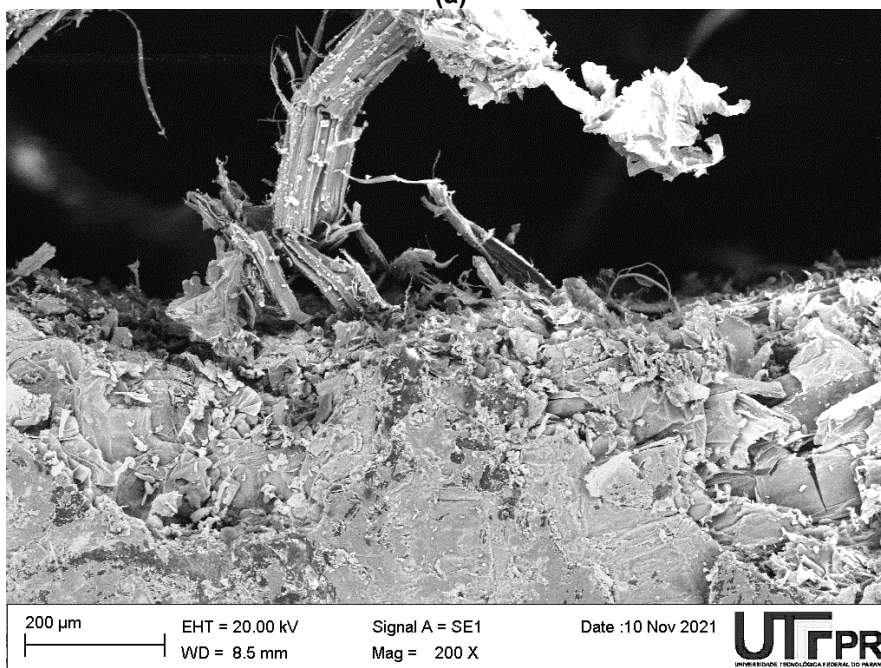
A Figura 52 mostra as avarias observadas após a furação no compósito com fibras cortadas manualmente utilizando a broca helicoidal com velocidade de corte de 19 m/min e avanço de 0,2 mm. Na Figura 52a observa-se um conjunto de fibras não cortadas, o arrancamento da matriz PU na borda de entrada do furo e a disposição aleatória das fibras no material. A Figura 52b mostra uma fibra que sofreu

a ação da aresta de corte da broca, porém não completamente fraturada e permanecendo unida ao compósito. Também é possível observar os danos causados na borda do furo pela entrada da broca.

**Figura 52 – Micrografia de MEV da entrada na furação no compósito com fibras cortadas manualmente com a broca helicoidal ( $v_c = 19$  m/min;  $f = 0,2$  mm): (a) fibras não cortadas e arrancamento da matriz; (b) fibra não cortada e dobrada pela ação da aresta cortante da broca**



(a)

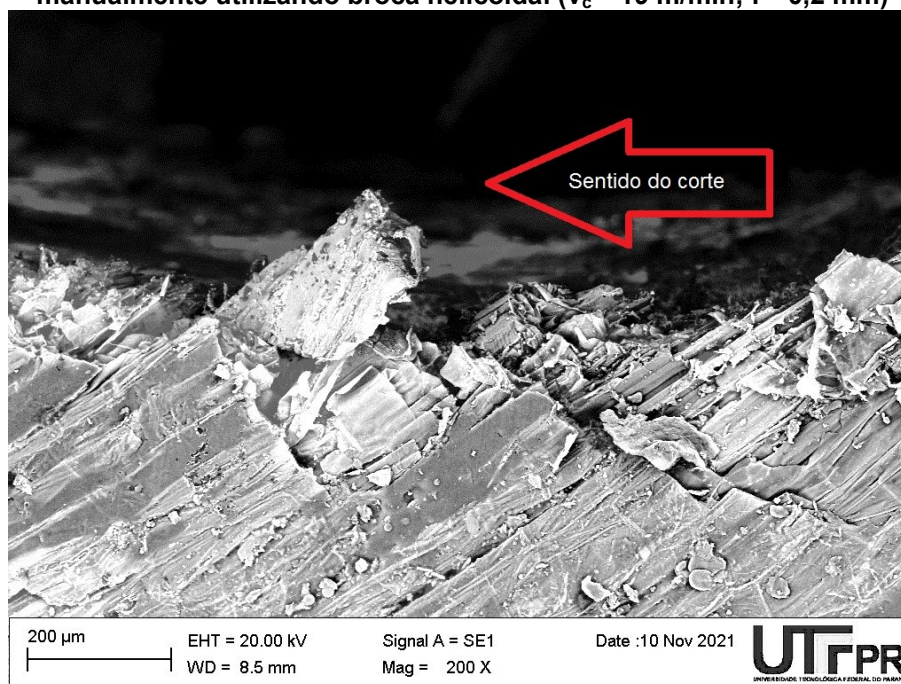


(b)

Fonte: Autoria própria (2021)

A Figura 53 mostra a aparência da borda do furo na saída da broca helicoidal do compósito com fibras cortadas manualmente, onde se observam fibras da primeira camada posicionadas em ângulos contrários à direção do movimento de corte.

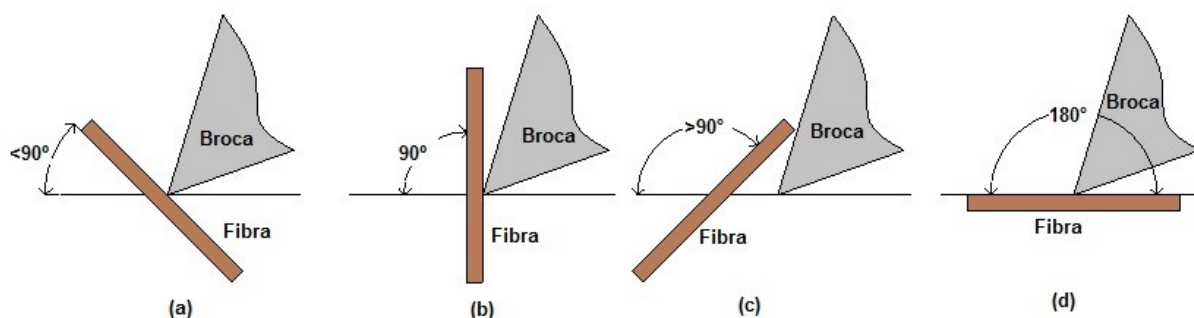
**Figura 53 – Micrografia de MEV da saída na furação no compósito com fibras cortadas manualmente utilizando broca helicoidal ( $v_c = 19$  m/min;  $f = 0,2$  mm)**



**Fonte: Autoria própria (2021)**

Em função dos compósitos pesquisados possuírem fibras orientadas de forma aleatória ou multidirecionais, estas podem estar posicionadas em ângulos positivos, negativos ou perpendiculares à direção do movimento de corte da broca, conforme descrito por SHEIK-AHMAD e DAVIM (2012) e ilustrado na Figura 54.

**Figura 54 – Posicionamento das fibras em função da direção do movimento de corte da broca: (a) menor que 90°; (b) perpendicular ou 90°; (c) maior que 90°; (d) paralela ou 180°**



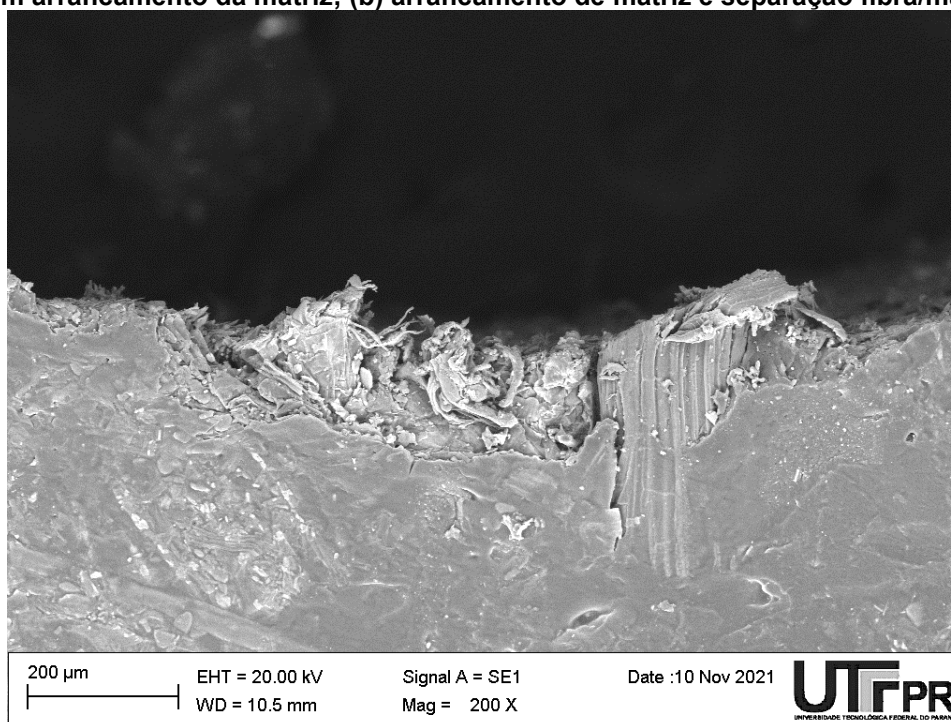
**Fonte: adaptado de Sheikh-Ahmad e Davim (2012)**



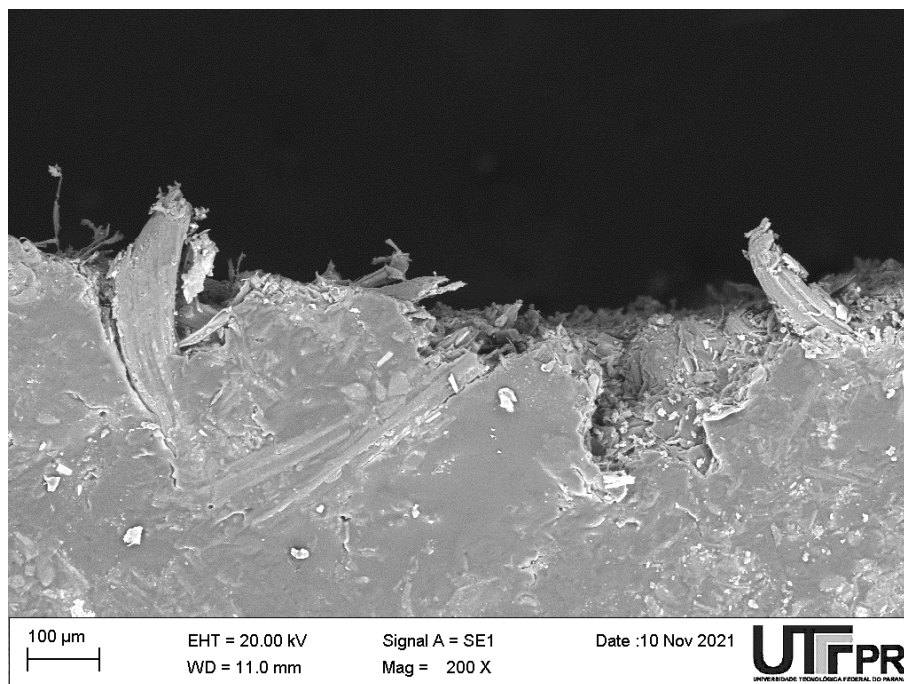
Os autores afirmam que ao contrário da usinagem em materiais onde a remoção ocorre de forma contínua através de deformação plástica e cisalhamento, nos compósitos com fibras naturais isto acontece por fratura das fibras de forma descontínua, permanecendo juntas pela matriz e com um comportamento independente a cada camada. O posicionamento aleatório das fibras de ambos os compósitos em estudo, principalmente as localizadas nas camadas externas do compósito, mostraram que a fratura e a consequente movimentação das fibras isoladas ou em feixes criaram avarias nas bordas dos furos.

A Figura 55 mostra a borda de entrada do furo no compósito com fibras mecanicamente trituradas utilizando a broca modelo três pontas. Apesar de mecanicamente trituradas, foi possível observar ainda alguns feixes de fibras unidos naturalmente. Na Figura 55a nota-se um destes feixes com um corte irregular e também um arrancamento de fibras da primeira camada. Na Figura 55b foi possível observar o arrancamento de parte da borda do furo e fibras não totalmente cortadas permanecendo unidas pela matriz. Em ambas as imagens percebeu-se a irregularidade do corte na borda do furo com este tipo de broca no material, o que influenciou no aumento dos valores do fator de avaria.

**Figura 55 – Micrografia de MEV da entrada na furação no compósito com fibras mecanicamente trituradas utilizando broca três pontas ( $v_c = 19$  m/min;  $f = 0,1$  mm): (a) corte com arrancamento da matriz; (b) arrancamento de matriz e separação fibra/matriz**



(a)

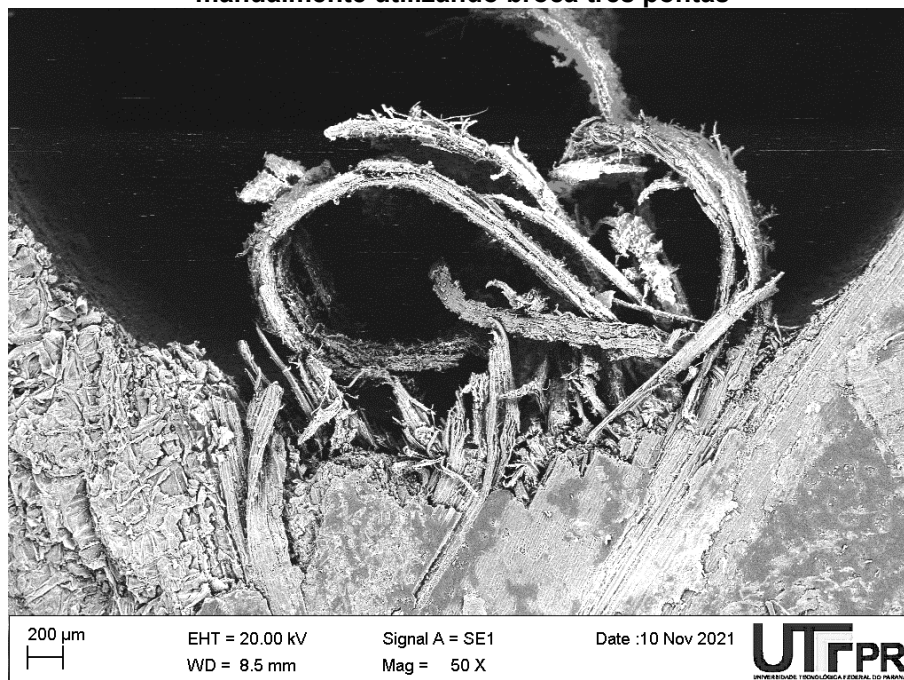


(b)

Fonte: Autoria própria (2021)

Na Figura 56 observa-se uma avaria típica na furação do compósito com fibras cortadas manualmente.

**Figura 56 – Micrografia de MEV da entrada na furação no compósito com fibras cortadas manualmente utilizando broca três pontas**



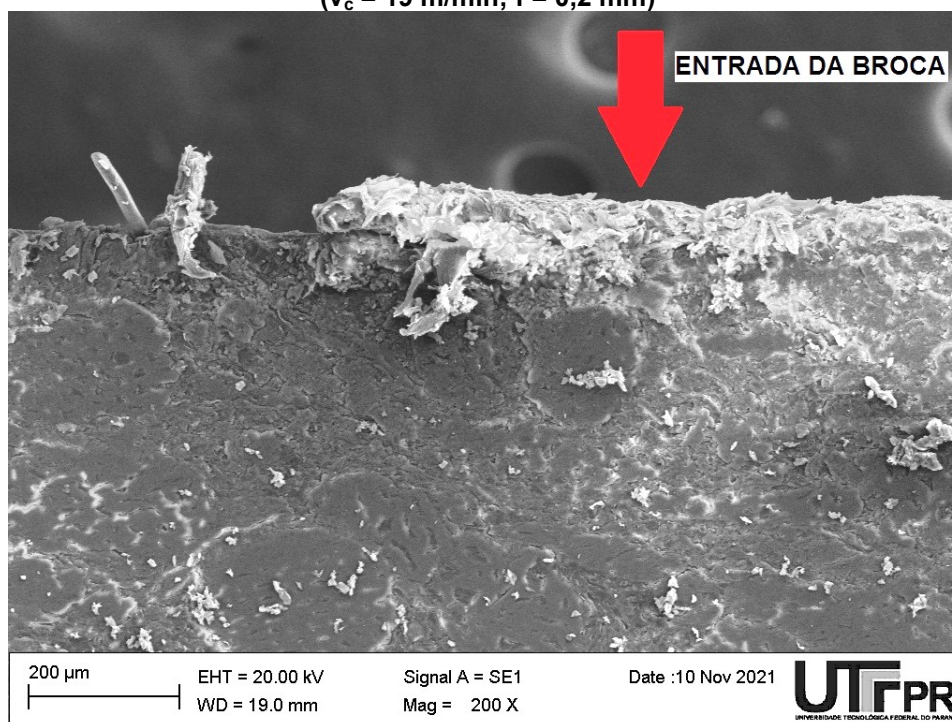
Fonte: Autoria própria (2021)

O feixe de fibras unido naturalmente sofreu a ação da broca e separou-se em fibras individuais, não fraturadas, que permaneceram unidas ao painel. Pode-se afirmar que os pedaços de fibras neste tipo de compósito, quando localizadas na posição perpendicular ou próximas de 90° em relação ao movimento de corte, foram regiões que mais apresentaram avarias. A resistência à fratura das fibras de bananeira localizadas principalmente nas faces contribuiu na elevação dos valores dos danos causados durante a furação.

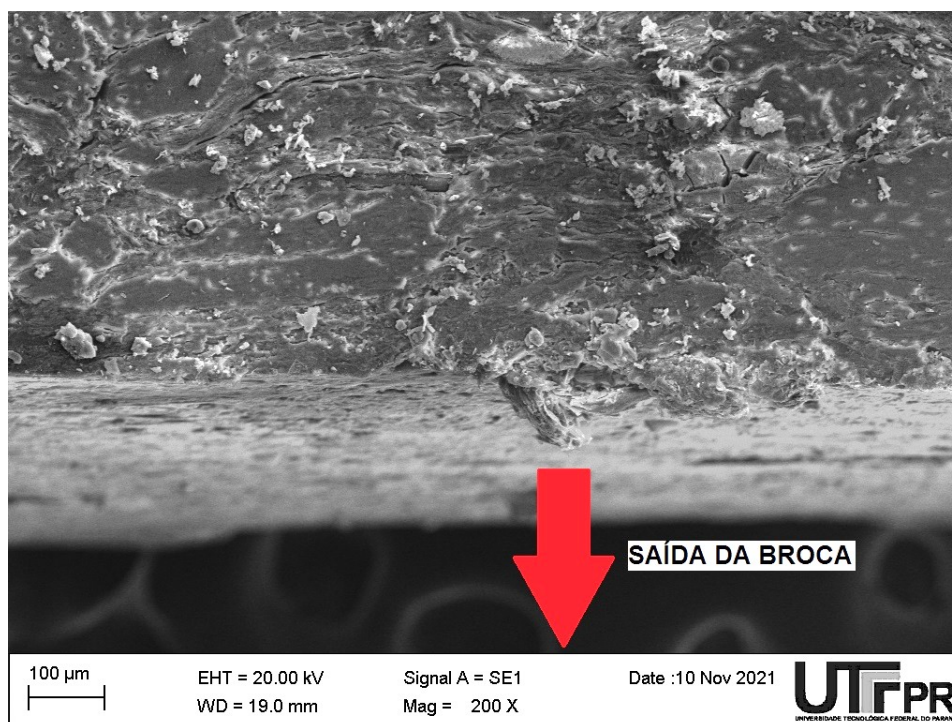
Após a análise das avarias nas bordas dos furos foi efetuada uma verificação nas condições das paredes ao longo da dimensão na espessura dos painéis. Em ambos os materiais não foram constatados danos significativos causados pela ação da ferramenta ao longo da espessura. Tanto a matriz PU quanto as fibras não apresentaram os tipos de avarias observados nas bordas dos furos, na entrada ou na saída.

A Figura 57 mostra a aparência da borda do furo na entrada, saída e a parede após a furação no compósito com fibras mecanicamente trituradas utilizando a broca helicoidal.

**Figura 57 – Micrografia de MEV da borda de (a) entrada e (b) saída da broca com o aspecto da parede do furo no compósito com fibras mecanicamente trituradas utilizando broca helicoidal ( $v_c = 19$  m/min;  $f = 0,2$  mm)**



(a)



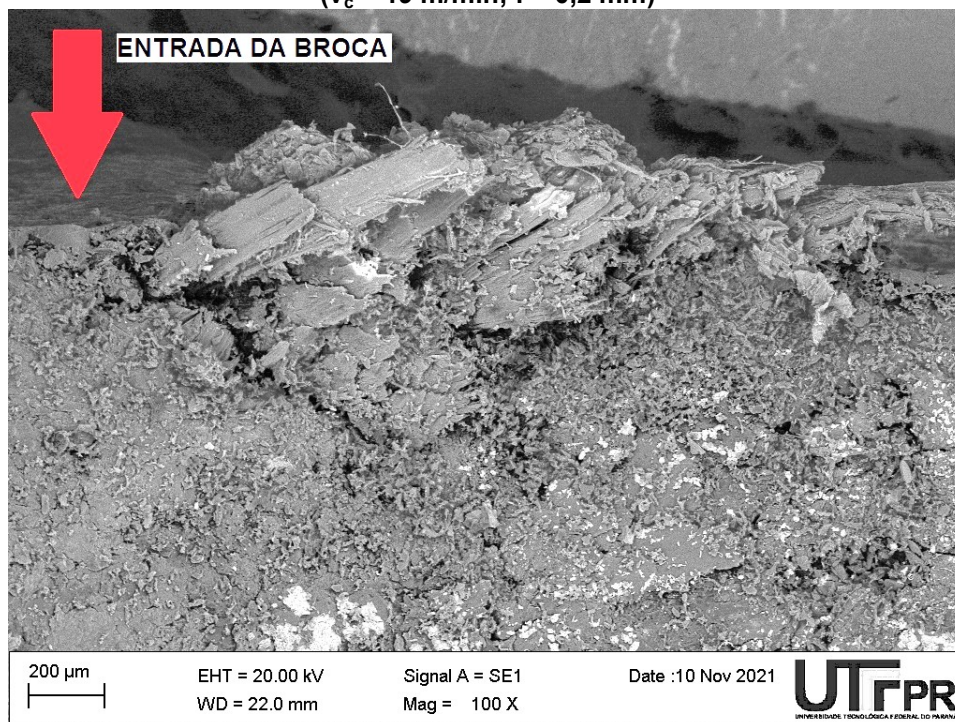
(b)

Fonte: Autoria própria (2021)

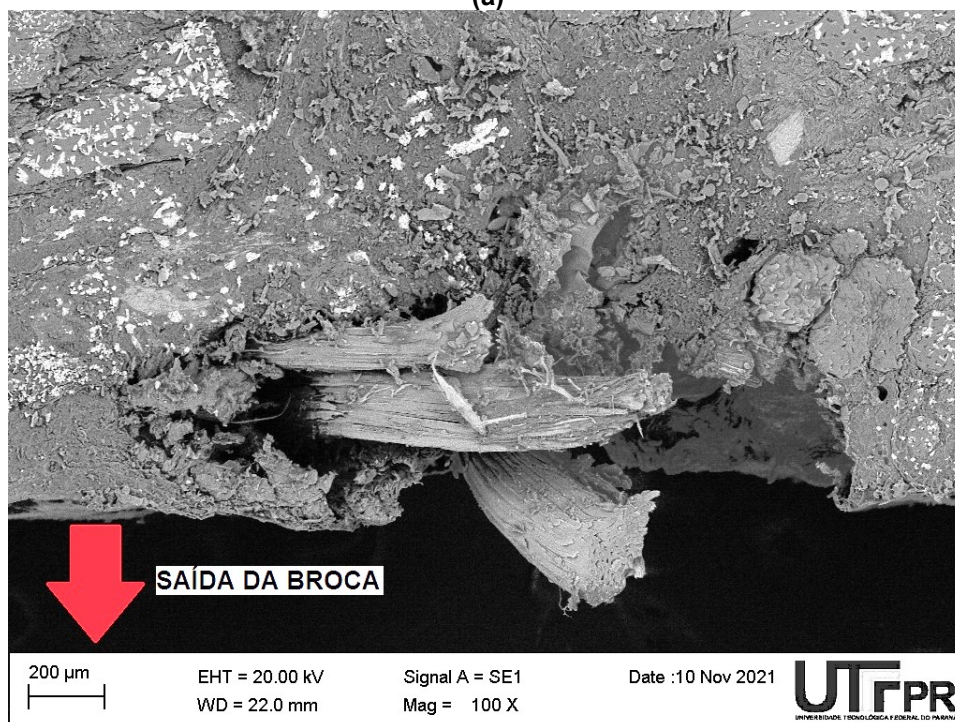
A Figura 57a mostra a borda de entrada do furo onde foi possível observar as fibras da primeira camada levantadas em sentido contrário ao avanço da ferramenta. A Figura 57b mostra a borda de saída onde se observaram fibras empurradas no sentido do avanço. Em ambas as figuras foi possível observar que as paredes não apresentaram defeitos significativos após a furação

A Figura 58 mostra a aparência da borda de entrada, saída e a parede após a furação no compósito com fibras manualmente cortadas com broca helicoidal. A Figura 58a mostra a borda de entrada do furo onde, similar ao outro tipo de compósito, também foi possível observar as fibras da primeira camada levantadas em sentido contrário ao avanço da ferramenta. A Figura 58b mostra a borda de saída onde se observaram também fibras empurradas no sentido do avanço e deslocamento de camadas. Apesar das maiores dimensões das fibras cortadas manualmente, nas paredes dos furos também não foram observados defeitos significativos após a furação.

Figura 58 – Micrografia de MEV da borda de (a) entrada e (b) saída da broca com o aspecto da parede do furo no compósito com fibras manualmente trituradas utilizando broca helicoidal ( $v_c = 19$  m/min;  $f = 0,2$  mm)



(a)



(b)

Fonte: Autoria própria (2021)

Não foram observados nos furos, para todos os modelos de brocas e parâmetros de corte, avarias relacionadas à temperatura gerada durante a furação, tanto para a matriz quanto para as fibras. CHOUHURY *et al.* (2018) apontaram em

sua pesquisa que o aumento da temperatura na região do furo pode influenciar na qualidade da usinagem ao se aproximarem do ponto de transição vítrea da matriz onde o material entraria em um estado borrachoso. Este estado reduziria as forças envolvidas na usinagem e poderia influenciar a dinâmica do processo. Neste estudo os autores utilizaram um compósito com matriz e fibras diferentes das usadas no presente trabalho e também os valores dos avanços aplicados foram inferiores, o que pode justificar as diferenças observadas.

Em ambos os materiais foram observadas fibras não fraturadas ou dobradas na entrada e saída dos furos. DÍAZ-ÁLVAREZ *et al.* (2018) comentam em seu estudo que as dimensões, tipo e propriedades das fibras podem influenciar na geração de danos nos processos de furação em compósitos com fibras vegetais. Apesar de o processo mecânico triturar e reduzir o comprimento das fibras, em alguns pontos observou-se ainda feixes unidos naturalmente pela lignina da planta, com dimensões menores comparadas às fibras cortadas manualmente. Levando-se em consideração que para ambos os compósitos foram utilizadas fibras do mesmo tipo e origem da planta, este fator não foi considerado relevante para influenciar na geração de avarias durante a furação. Porém, conforme afirmado por LOTFI *et al.* (2019), as propriedades de fibras vegetais, em específico da bananeira, podem variar em função da forma de processamento e também do seu diâmetro natural, com dimensões na faixa de 14 a 400  $\mu\text{m}$  (PAPPU *et al.*, 2015). Esta variação pode influenciar na dinâmica do corte pelas arestas da broca, onde fibras com maiores dimensões localizadas nas primeiras camadas da face de entrada ou saída da furação demonstraram estarem mais sujeitas a avarias durante o processo por provavelmente apresentarem propriedades de resistência superiores às fibras com menores diâmetros.

Outra diferença observada entre os dois tipos de compósitos foi a melhor acomodação do material no compósito com fibras mecanicamente trituradas. O processo mecânico resultou em uma melhor separação dos feixes de fibras naturalmente unidos e também reduziu em grande parte o comprimento das fibras. Com isto, a distribuição foi mais homogênea e resultou em uma melhor interface fibra/matriz, evitando fibras soltas ou regiões com vazios. Ao contrário, o compósito com o processo manual, originou pedaços de fibras unidas naturalmente, que durante a mistura com a matriz, acabaram por criar vazios ou regiões não completamente preenchidas pelo PU. Este comportamento ocorreu em função da

sobreposição ou dobra das fibras, prejudicando a interface e influenciando na geração de avarias durante a furação. Esta diferença pôde ser comprovada durante a medição da densidade dos materiais, onde o processo mecânico resultou em um compósito com maior densidade comparado ao processo de corte manual das fibras.

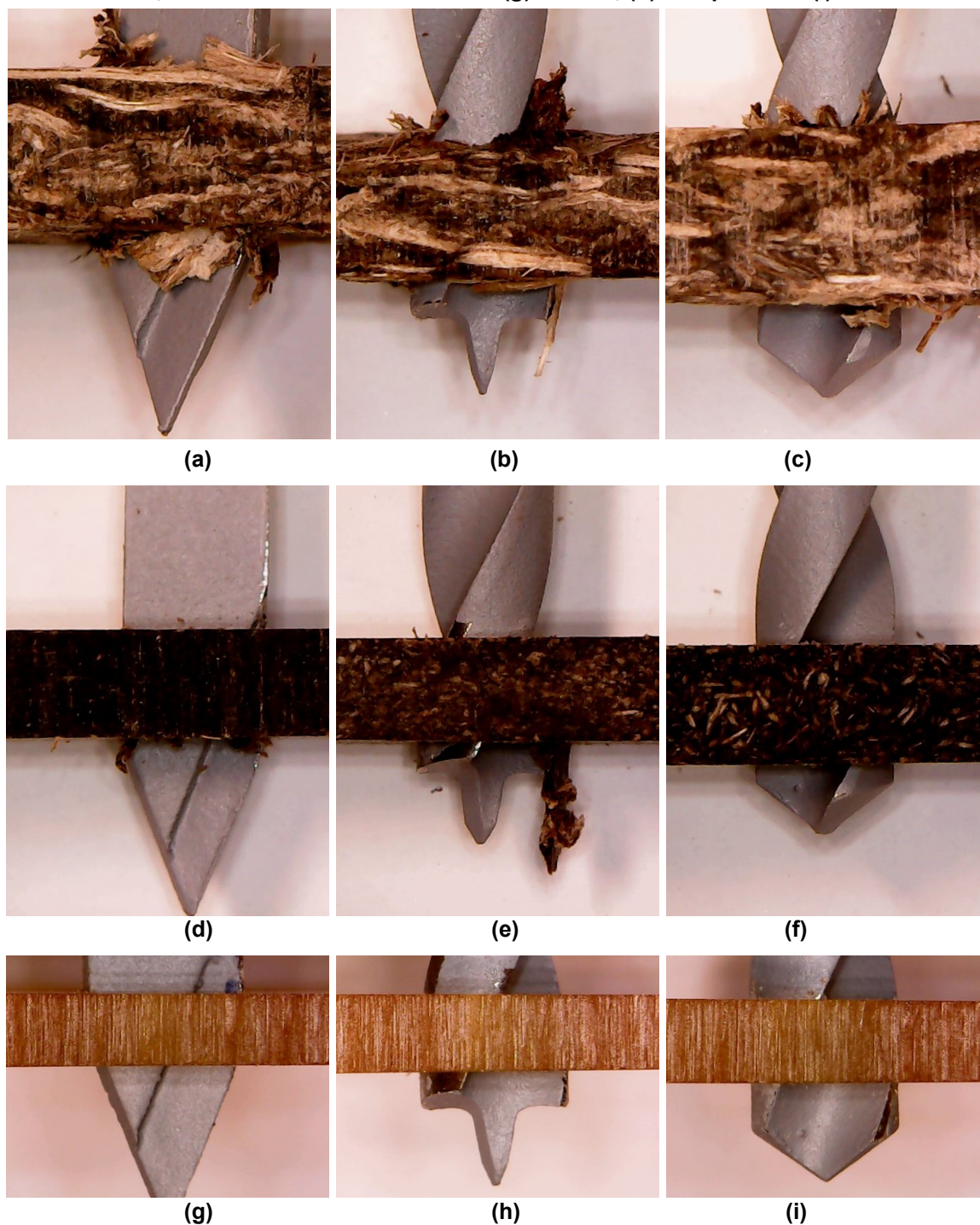
A microscopia permitiu visualizar de que forma estas características dos compósitos avaliados influenciaram nos resultados das avarias após o processo de furação. Levando-se em consideração a influência dos modelos de brocas e das forças envolvidas no processo, constatou-se também que a forma de disposição e dimensões das fibras nos compósitos podem ter contribuído nos danos causados, principalmente às fibras localizadas próximas às faces dos painéis. Estas fibras possuem uma menor ancoragem em relação às localizadas na camada interna do material, piorando a resistência da interface fibra/matriz, ficando mais suscetíveis às forças envolvidas na furação e principalmente a ação das arestas de corte das brocas. Apesar da melhor acomodação nas fibras mecanicamente trituradas, ainda foi possível observar que as mesmas também sofreram as influências do processo quando localizadas próximas à face.

Durante a furação, quando a aresta de corte das brocas iniciou o contato com a superfície do compósito, as fibras localizadas na face de entrada ou logo abaixo mostraram uma tendência de levantarem ou dobrarem no sentido contrário ao avanço, estimuladas pela geometria da ponta das ferramentas. Este movimento foi percebido principalmente nas fibras posicionadas perpendicularmente em relação à direção do corte. Quando posicionadas em ângulos paralelos ou próximos a 180° este comportamento não foi observado. Dependendo das dimensões das fibras e das velocidades aplicadas, esta movimentação fez com que as fibras recusassem o contato com a aresta de corte, evitando a fratura adequada.

Na saída da furação, as forças relacionadas ao avanço acabaram por empurrar as fibras da última camada, repetindo o comportamento da entrada, onde as fibras não permaneceram em contato com a aresta cortante. À medida que a broca avançou na espessura do furo e se aproximou do limite do painel, a resistência da interface fibra/matriz piorou e favoreceu a movimentação no sentido do avanço.

Na Figura 59 é possível observar a intensidade deste comportamento durante o transpasse das brocas nos dois tipos de compósitos.

**Figura 59 – Transpasse das brocas ( $v_c = 19$  m/min e  $f = 0,1$  mm): compósitos com fibras cortadas manualmente usando a broca (a) formão, (b) três pontas e (c) helicoidal; compósito com fibras trituradas mecanicamente usando a broca (d) formão, (e) três pontas e (f) helicoidal; PU sem fibras usando a broca (g) formão, (h) três pontas e (i) helicoidal**



Fonte: Autoria própria (2022)

No compósito fabricado pelo processo manual fica evidente a movimentação das fibras localizadas nas faces de entrada e saída das brocas devido principalmente as dimensões das fibras e a menor interface fibra/matriz em relação ao outro tipo de compósito (Figuras 59a, 59b e 59c). No material obtido com



processo mecanizado, a intensidade desta movimentação é muito menor em função de fibras com dimensões menores e uma melhor interface fibra/matriz (Figuras 59d, 59e e 59f). Nas Figuras 59g, 59h e 59i observa-se o transpasse das brocas no PU puro sem adição de fibras, onde os três tipos de ferramenta não apresentaram defeitos na face de entrada e saída, comprovando que a movimentação das fibras é um dos principais fatores que influenciaram na geração de avarias.

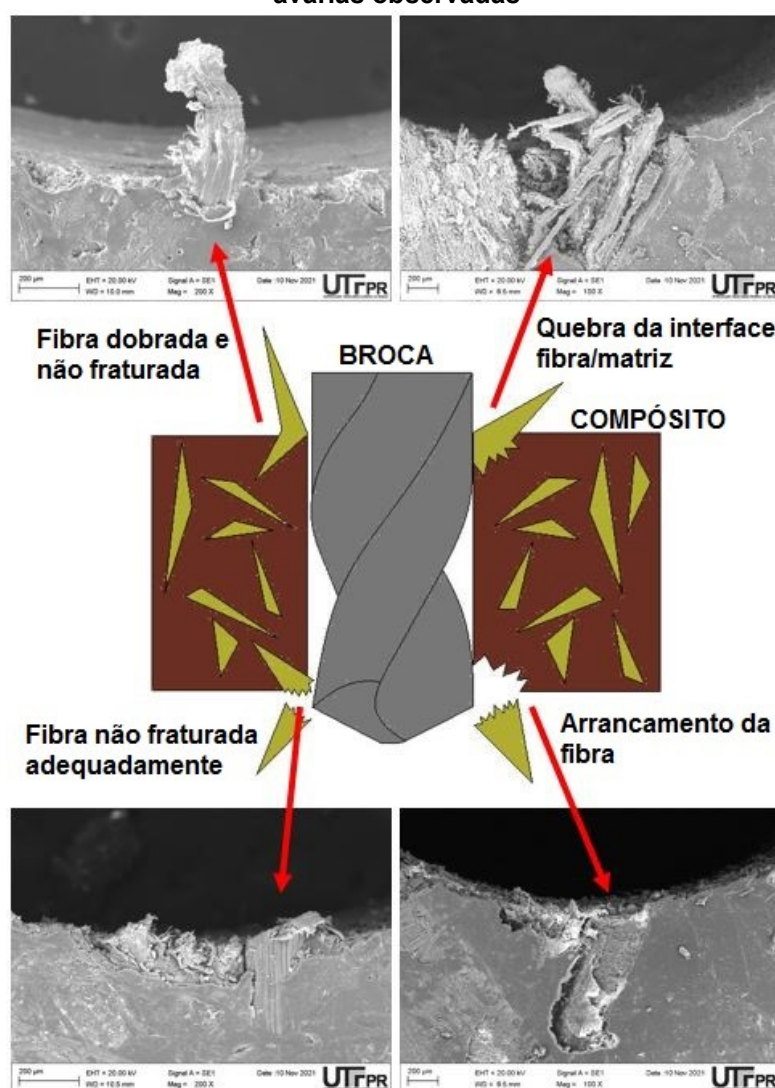
Este comportamento de fibras vegetais na furação de compósitos, com matrizes sintéticas ou naturais, já foi observado na literatura e pode ser considerado similar ao que acontece na furação de materiais sintéticos, como a fibra de vidro ou de carbono. Denominada de delaminação, pode acontecer na camada superior (*peel-up*) e na inferior (*push-down*), e as forças envolvidas podem ser denominadas de forças de descascamento ou *peeling force* conforme citado por CHANDRAMOHAN *et al.* (2011) e DURÃO *et al.* (2014) em seus trabalhos. O termo *peel-up*, ou descascamento, é descrito como o movimento que acontece com as fibras das primeiras camadas do compósito, que se levantam na direção contrária ao avanço da ferramenta evitando a fratura adequada pela aresta de corte. Este aspecto pode ser observado nas imagens de MEV, principalmente em fibras cortadas manualmente. O termo *push-down*, ou empurrar para baixo, envolve principalmente a força de avanço que acaba movimentando as fibras da última camada no sentido do avanço, evitando também uma fratura adequada pelas arestas de corte.

Uma característica relativa às fibras vegetais também contribuiu neste comportamento durante a furação. Denominado de comportamento viscoelástico por CHEGDANI *et al.* (2015), as fibras vegetais, entre elas a da bananeira, possuem uma irregularidade nas suas propriedades físico-mecânicas e ao entrarem em contato com as arestas de corte de uma broca podem dobrar-se e evitar a fratura. Este movimento de dobra, com a fibra ainda ancorada ao painel, também pode contribuir com a quebra da interface fibra/matriz elevando as dimensões de avarias, principalmente nas bordas dos furos. Conforme observado na microscopia, algumas fibras sofreram este tipo de comportamento, o que também pode estar ligado a uma interface fraca nas camadas externas dos painéis.

Outro tipo de avaria encontrado durante a microscopia foi o arrancamento de fibras e a consequente quebra da matriz, criando um aspecto semelhante a uma erosão na borda do furo. Uma condição que pode ter favorecido este comportamento foi o comprimento das fibras e sua posição. Fibras menores e

melhores acomodadas oriundas do processo mecânico mostraram um melhor comportamento em relação àquelas cortadas manualmente. Apesar de observados, o arrancamento das fibras menores não mostrou contribuir significativamente com o aumento dos valores de avarias nos furos. Ao contrário, as fibras maiores do processo manual, quando arrancadas, acabaram por elevar os valores contribuindo significativamente nos resultados. A Figura 60 ilustra o processo de entrada e saída da broca no compósito e de que forma os defeitos observados foram gerados, com o dobramento de fibras, arrancamento, fratura inadequada e quebra da interface fibra/matriz. Apesar de a ilustração mostrar o processo com uma broca helicoidal, a geração destes defeitos foi similar para os outros modelos de brocas.

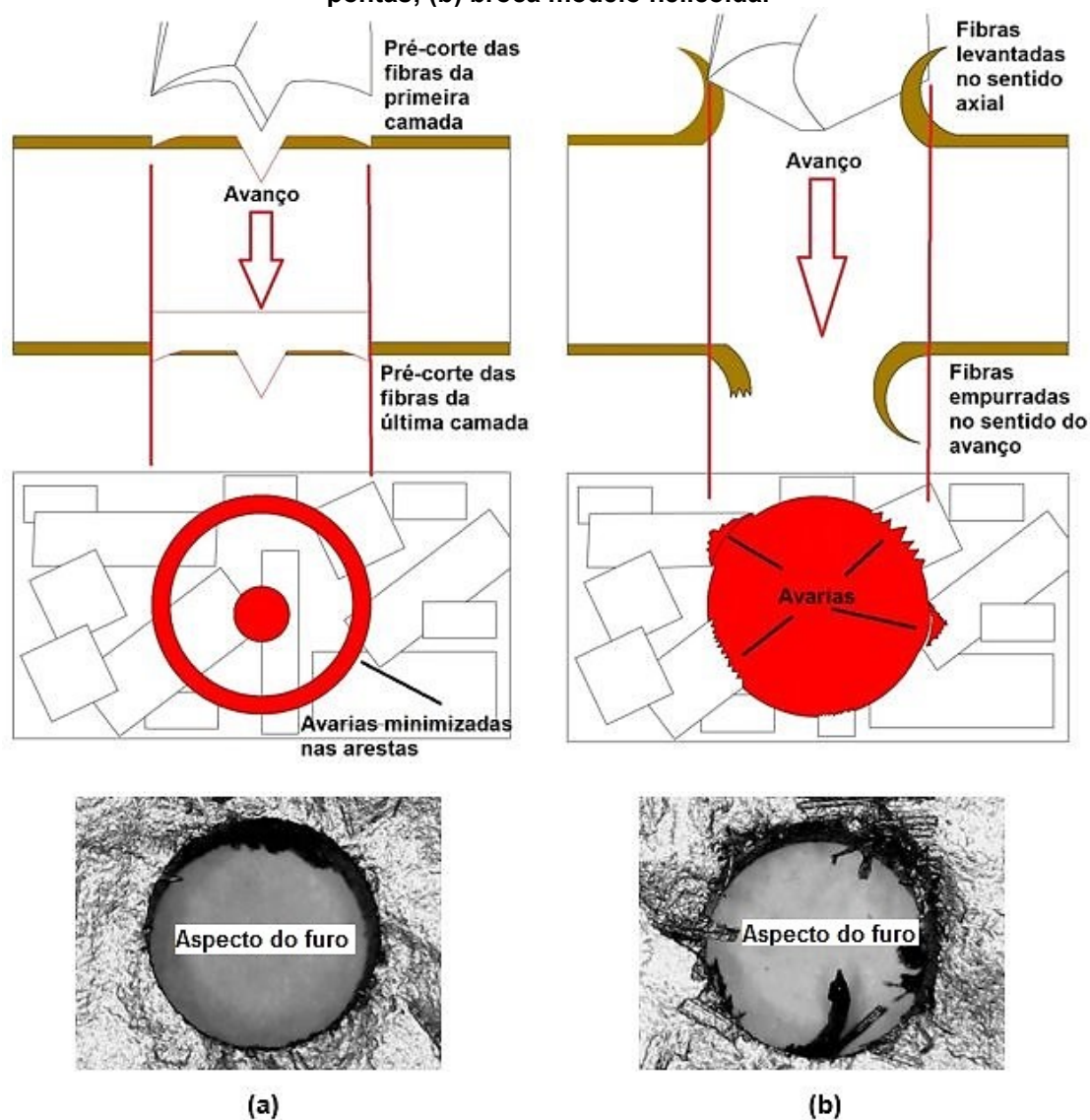
**Figura 60 – Ação da entrada e saída da ferramenta no material e os tipos característicos de avarias observadas**



Fonte: Autoria própria (2022)

Com o cálculo das avarias geradas pelos três modelos de brocas foi possível observar que para o compósito com fibras cortadas manualmente a broca que gerou menores danos na furação foi a modelo três pontas. A broca helicoidal apresentou valores intermediários e a modelo formão apresentou os maiores valores de avarias. Conforme descrito anteriormente, a ação de entrada e saída da broca mostrou influência na geração de avarias na furação dos dois tipos de materiais. A Figura 61 compara o comportamento entre a broca modelo três pontas, com menores valores de avarias, e helicoidal, com maiores valores, na dinâmica de furação.

**Figura 61 – Comparação do comportamento das brocas na furação do compósito com fibras cortadas manualmente e aspecto do furo ( $v_c = 38$  m/min;  $f = 0,1$  mm): (a) broca modelo três pontas; (b) broca modelo helicoidal**



Fonte: Autoria própria (2022)

Como a broca três pontas possui arestas de corte ligeiramente côncavas e suas quinas funcionam como uma ferramenta de trepanação, elas promovem um pré-corte tanto nas fibras da primeira camada como da última camada do compósito, conforme ilustrado na Figura 61a. Este pré-corte contribuiu para a redução da movimentação destas fibras e conseqüentemente uma melhor ação da aresta de corte da ferramenta. Com isto, as fibras situadas na borda do furo foram cortadas de forma mais adequada, reduzindo as avarias em relação aos outros dois modelos de brocas. A broca modelo helicoidal, pela geometria de suas arestas de corte, contribuiu com a movimentação das fibras da primeira camada no sentido contrário ao avanço da broca e da última camada no sentido do avanço, evitando uma fratura adequada das mesmas. Este movimento também contribuiu para a quebra da interface fibra/matriz na região de contato da extremidade da aresta de corte, causando deslocamento de matriz ou arrancamento de fibras, conforme ilustrado na Figura 61b.

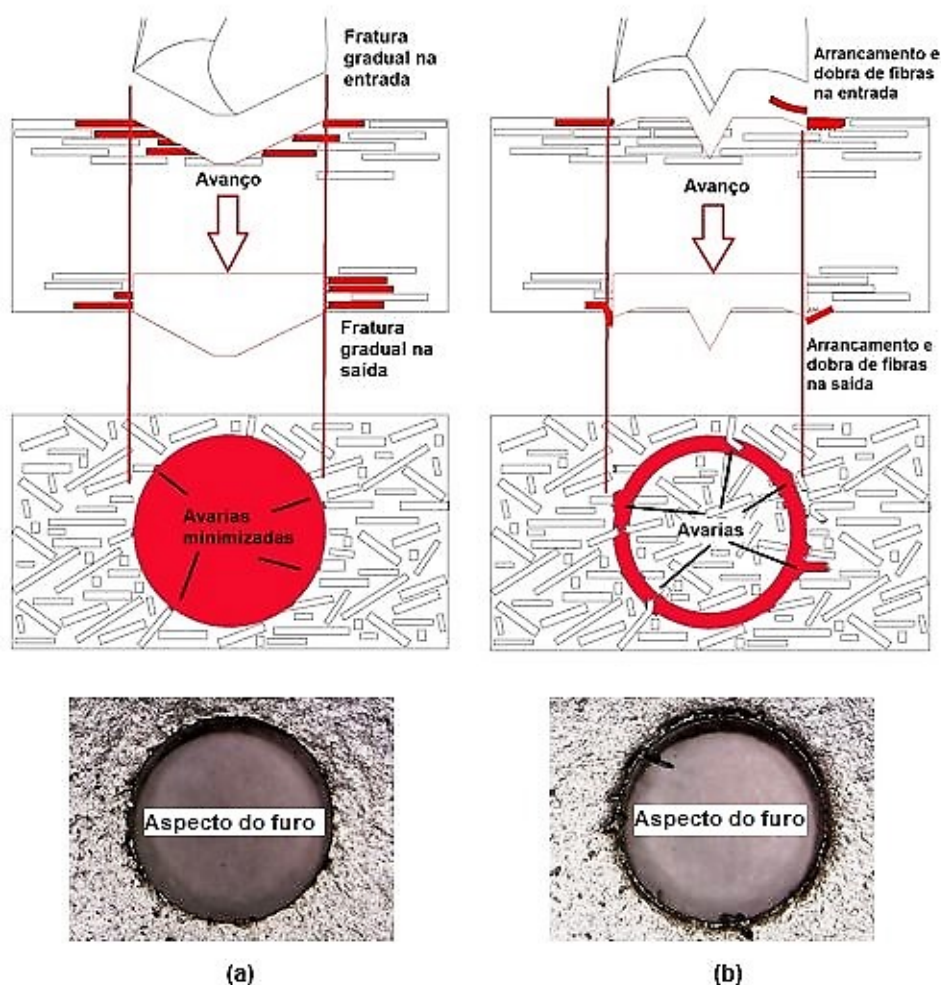
Na furação do compósito com fibras mecanicamente trituradas, a broca que gerou menores valores de avarias foi a helicoidal. Similar ao compósito com fibras cortadas manualmente, a geometria de ponta das brocas mostrou influenciar no comportamento do corte durante a furação. O processo mecânico de trituração quebrou a união promovida pela lignina da planta e resultou em fibras com menores dimensões comparadas aos pedaços cortados manualmente, influenciando na dinâmica do corte conforme ilustrado na Figura 62.

A broca helicoidal com seu ângulo de ponta e arestas de corte que acompanham este ângulo mostrou-se mais adequada na furação deste material. Esta geometria promoveu uma fratura gradual das fibras tanto na entrada quanto na saída e, apesar de observadas algumas avarias, estas não apresentaram dimensões elevadas que aumentariam os valores avaliados, conforme ilustrado na Figura 62a. A broca modelo três pontas, a contrário do outro compósito, acarretou em um número elevado de avarias em função da ação das quinas externas da broca. O contato destas quinas com as superfícies de entrada e saída do compósito acabaram promovendo a dobra e arrancamento das fibras e da matriz, criando regiões com aspecto similar a erosões nas bordas dos furos, conforme ilustrado na Figura 62b.

A broca formão, similar a três pontas, acarretou também em um grande número de avarias nas bordas dos furos. Além de não possuir canais helicoidais que

auxiliam na remoção dos cavacos, a geometria desta broca resulta em arestas de corte com ângulos diferenciados da broca helicoidal. Estes ângulos não se mostraram adequados para a fratura tanto da fibra como da matriz, elevando as dimensões dos danos nas bordas de entrada e saída do furo. Este comportamento foi similar ao observado na furação do compósito com fibras cortadas manualmente. Os resultados obtidos com esta broca vão ao contrário do afirmado por CHOUDHURY *et al.* (2018). Os autores reportaram que brocas com ângulo de hélice igual a zero reduziram os danos nas bordas dos furos comparadas a brocas com ângulo maior, levando em consideração que o compósito investigado pelos autores utilizou outro tipo de fibra e matriz.

**Figura 62 - Comparação do comportamento das brocas na furação do compósito com fibras trituradas mecanicamente e aspecto do furo ( $v_c = 38$  m/min;  $f = 0,1$  mm): (a) broca modelo helicoidal; (b) broca modelo três pontas**



Fonte: Autoria própria (2022)

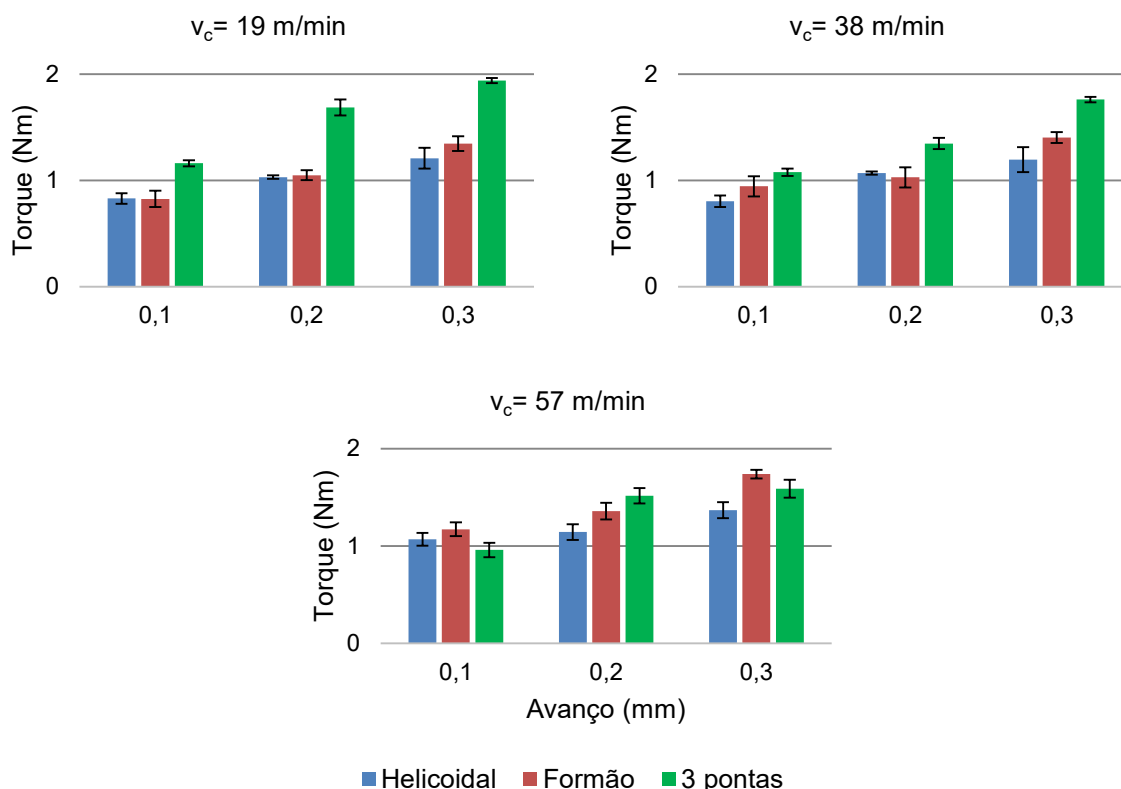
## 4.6 Forças na usinagem

Durante o processo de furação de ambos os tipos de compósitos foram medidos o torque e a força de avanço. A avaliação destas forças atuantes no processo de furação buscou identificar primeiramente suas intensidades e investigar as possíveis relações com a geração de avarias.

### 4.6.1 Torque gerado na furação do compósito com fibras mecanicamente trituradas

A Figura 63 mostra os valores de torque medidos com os três modelos de brocas utilizados na furação do compósito com fibras mecanicamente trituradas, com as diferentes velocidades de corte e avanço.

**Figura 63 – Torque medido durante a furação do compósito com fibras mecanicamente trituradas nos diferentes parâmetros utilizados**



Fonte: Autoria própria (2021)

Os valores apresentados no gráfico são a média com o desvio padrão de três furações executadas para cada parâmetro. Observou-se, como era esperado, o

aumento do torque em função do aumento do avanço, para todas as velocidades de corte.

A broca modelo helicoidal apresentou os menores valores exceto para velocidade de corte de 38 m/min e avanço de 0,2 mm, onde o valor medido ficou muito próximo ao modelo formão, que apresentou valores intermediários aos outros dois modelos. A broca modelo três pontas foi a que apresentou os maiores valores neste tipo de compósito.

Foi possível observar também a tendência de que com o aumento da velocidade de corte os valores do torque para as três brocas mostraram uma aproximação. Ao se utilizar velocidade de corte de 57 m/min, principalmente com a broca de três pontas, os valores se aproximaram aos encontrados nos outros dois modelos.

Para as três velocidades de corte, todas as brocas apresentaram valores de torque mais baixos quando utilizadas os menores avanços. Contudo, levando-se em consideração os valores medidos e o desvio padrão, os resultados para todos os parâmetros utilizados ficaram entre 1 a 2 Nm, mostrando uma baixa resistência ao corte no material. Estes valores ficaram próximos aos encontrados em estudos sobre furações em compósitos com fibras vegetais, conforme mostrado na Tabela 6. Segundo estes estudos, com o aumento do avanço mantendo a mesma velocidade de corte o torque aumenta, similar ao observado neste estudo. Este aumento está relacionado ao aumento da área da seção do cavaco, conforme apontado por Chandramohan *et al.* (2011).

Nassar *et al.* (2017) afirmaram que as forças na furação de compósitos com fibras vegetais são influenciadas principalmente pelos parâmetros da velocidade de corte e avanço e da geometria da broca. Segundo Choudhury *et al.* (2018) as forças envolvidas na furação destes compósitos são influenciadas principalmente pela ação da aresta transversal conforme o modelo da broca. Brocas com ângulo de ponta menor, como a modelo formão, reduziriam o efeito denominado indentação por possuírem uma aresta transversal menor em relação ao modelo helicoidal. Conforme observado, os resultados não mostraram uma diferença significativa entre os modelos formão e helicoidal. Para a broca de três pontas, nas velocidades de corte de 19 e 38 m/min, o torque foi maior provavelmente em função da sua geometria de ponta, com quinas e ponto central mais longo em relação ao restante da aresta de corte. Esta geometria de ponta realiza um processo de corte primeiramente pelas

quinas seguidas pelo restante da aresta, que além do corte também empurra o material. Como estas arestas localizadas entre as quinas e a ponta central possuem ângulos próximos a  $0^\circ$ , o esforço necessário para cortar o material pode ser maior em relação aos outros modelos, elevando o valor do torque. Com a elevação na velocidade de corte os valores do torque se aproximaram.

#### 4.6.2 Força de avanço gerada na furação do compósito com fibras mecanicamente trituradas

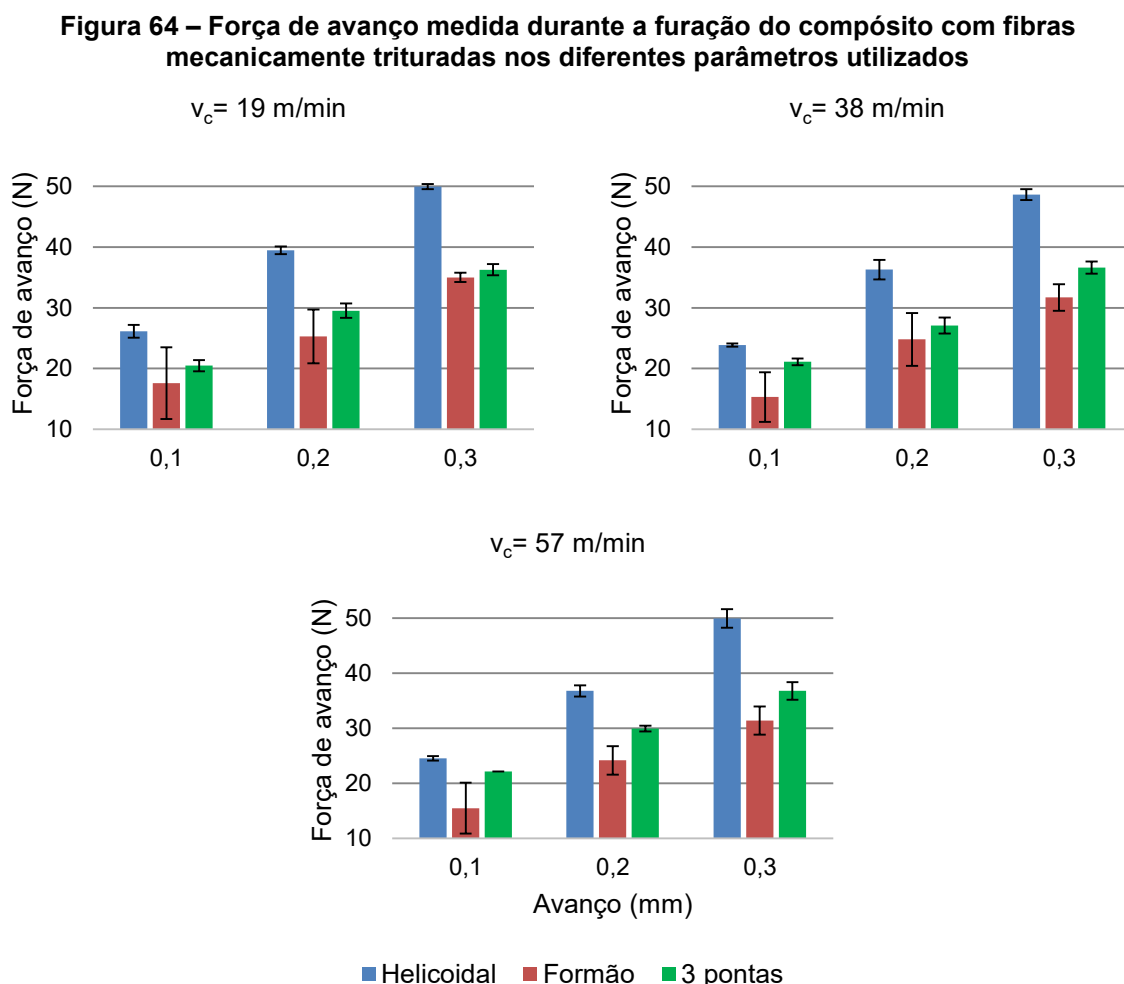
A Figura 64 mostra os valores das forças de avanço dos três modelos de brocas na furação dos compósitos com fibras mecanicamente trituradas. Os valores apresentados no gráfico são a média com desvio padrão de três furações executadas para cada parâmetro.

Conforme esperado, as forças de avanço aumentaram significativamente com o incremento do avanço, em todas as velocidades de corte. Observou-se igualmente que os valores das forças medidas foram similares apesar do incremento na velocidade de corte. Diferentes trabalhos afirmam que o incremento na velocidade de corte pode reduzir a força de avanço (MALEKI *et al.*, 2019; PATEL *et al.*, 2015; DEBNATH *et al.*, 2014; CHANDRAMOHAN *et al.*, 2011), porém este comportamento não foi observado no presente trabalho. Segundo NASSAR *et al.* (2017) fatores como as propriedades das fibras vegetais utilizadas, o tipo da matriz polimérica, a proporção utilizada na fabricação e o modelo da broca podem influenciar diretamente os valores das medições das forças de avanço.

A broca modelo formão apresentou os menores valores de forças de avanço e, diferentemente do torque, a broca helicoidal foi a que apresentou os maiores esforços no avanço em função de sua aresta transversal ser maior em relação aos outros modelos. Conforme observado por DEBNATH *et al.* (2014), o efeito de indentação causado pela aresta transversal da broca helicoidal aumenta as forças envolvidas na furação de compósitos com fibras vegetais. As forças de avanço medidas para a broca de três pontas se mostraram próximas às medidas na broca formão. Como estes dois modelos de broca possuem um ponto central mais comprido em relação às arestas de corte, além de a aresta transversal possuir dimensões mais reduzidas, o contato de toda geometria da ponta não ocorre em painéis com espessuras reduzidas, pois quando o ponto central já ultrapassou a face



de saída do furo, o diâmetro total da broca ainda não entrou em contato com o material, reduzindo os esforços de corte. Este comportamento foi observado por CHOUHURY *et al.* (2018) em seu trabalho.



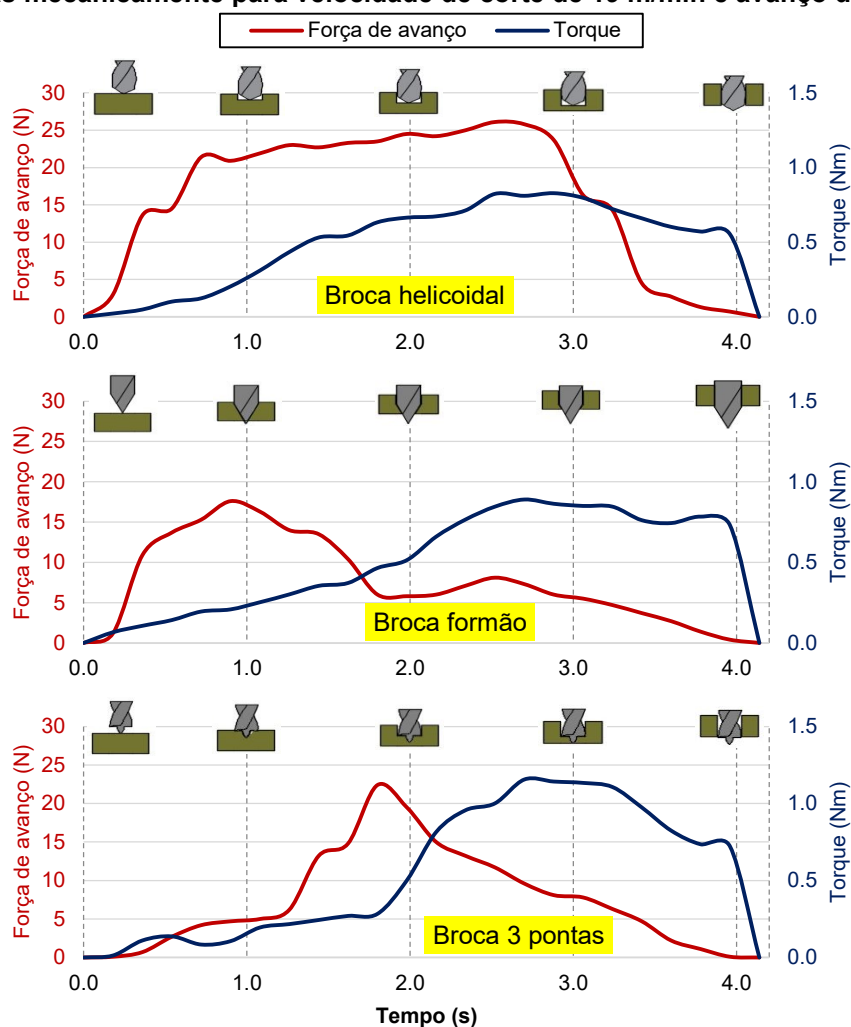
**Fonte: Autoria própria (2021)**

A Figura 65 mostra um exemplo da evolução das forças do torque e de avanço atuantes no processo de furação dos compósitos com fibras mecanicamente trituradas em função do tempo, com velocidade de corte de 19 m/min e avanço de 0,1 mm, para os três modelos de broca.

O comportamento na evolução destas forças durante a furação, levando em consideração a diferença de valores, mostrou-se similar entre todos os outros parâmetros utilizados. Apesar de empregada a frequência de aquisição de dados com 1 kHz, os valores utilizados na geração do gráfico da imagem usaram a frequência de 10 Hz, após tratamento dos valores medidos no software *Excel*. Este

procedimento buscou uma simplificação da representação gráfica do comportamento das forças em função do tempo de furação.

**Figura 65 – Torque e força de avanço em função do tempo na furação do compósito com fibras trituradas mecanicamente para velocidade de corte de 19 m/min e avanço de 0,1 mm**



Fonte: Autoria própria (2021)

A broca helicoidal apresentou forças de avanço estáveis a partir do início do contato da ferramenta com o material, em torno do tempo de 1s, e verificou-se a redução das forças a partir da saída da sua geometria de ponta, após o tempo de 3s. Na broca três pontas verificou-se que a intensidade dos valores das forças de avanço foram reduzidas comparadas a helicoidal em função da ação da ponta central da ferramenta, que aliviou os esforços de avanço, com um aumento durante o início do contato das pontas externas da ferramenta. Em função da espessura do material, este esforço teve uma curta duração, pois a ponta central atingiu a outra face reduzindo os esforços. A broca formão teve seu maior esforço em

aproximadamente 1s quando a geometria da ferramenta encontrava-se totalmente no interior do painel e similar à broca três pontas, observou-se uma redução quando a ponta transpassou o material.

Com relação ao torque, o comportamento foi similar entre as ferramentas, considerando-se a evolução em função do tempo. Percebeu-se que as forças foram aumentando em relação ao movimento de entrada da broca no material, atingindo seus maiores valores por volta dos 3s, quando a geometria de ponta da ferramenta encontrava-se totalmente inserida na espessura do material, próxima à saída na face posterior. Os valores medidos do torque, levando em consideração o desvio padrão, ficaram entre aproximadamente 1 a 2 Nm para todas as brocas e parâmetros aplicados, sem alterações significativas.

#### 4.6.3 Torque gerado na furação do compósito com fibras cortadas manualmente

A Figura 66 mostra os valores de torque medidos com os três modelos de brocas utilizadas na furação do compósito com fibras cortadas manualmente, com as diferentes velocidades de corte e avanço. Os valores apresentados no gráfico, similar ao outro tipo de compósito, são a média com desvio padrão de três furações executadas para cada parâmetro.

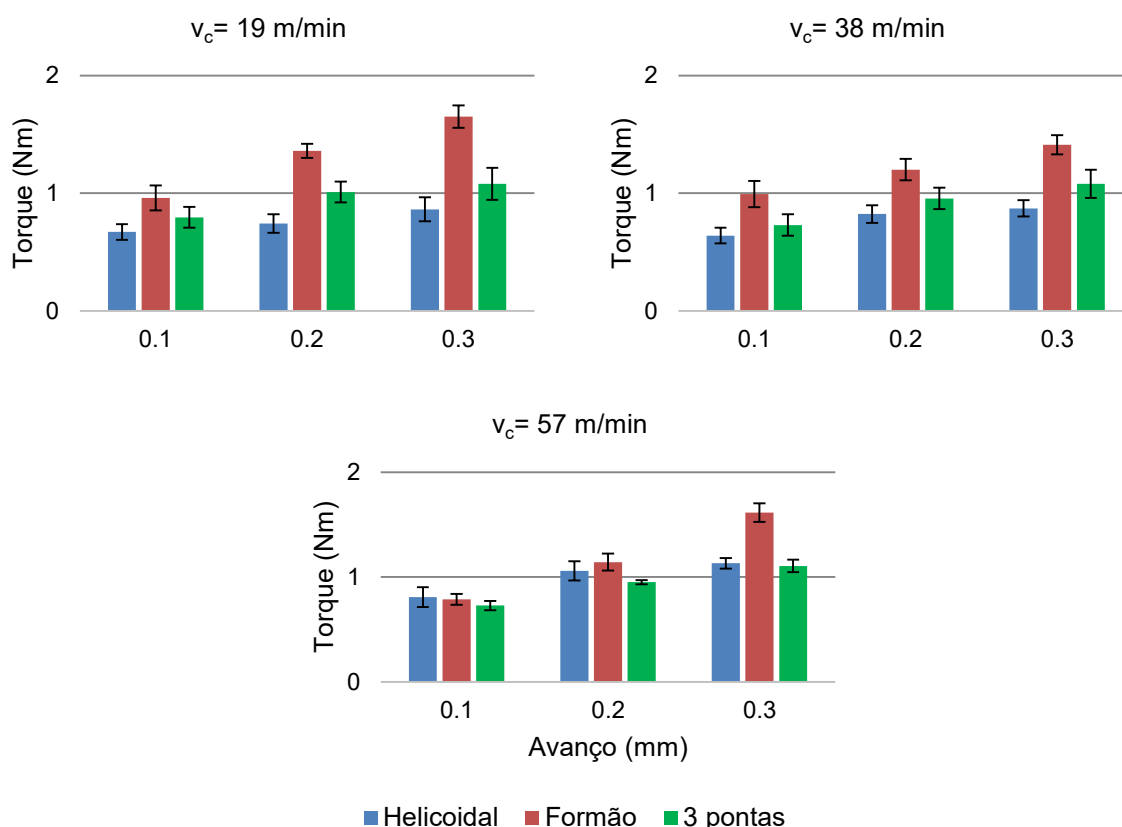
Observou-se, similarmente ao outro tipo de compósito, o incremento do torque em função do aumento do avanço, para todas as velocidades de corte.

A broca helicoidal apresentou os menores valores para velocidades de corte de 19 e 38 m/min e a broca modelo três pontas para 57 m/min, próximos à helicoidal. A modelo formão apresentou os maiores valores em todas as velocidades de corte.

Foi possível também observar que, em todos os casos, o torque aumentou em função do aumento do avanço. Menores esforços de corte foram medidos quando utilizados os menores avanços. Similar ao compósito fabricado com auxílio mecânico, os valores podem ser considerados baixos e similares aos encontrados em estudos com materiais similares, conforme Tabela 6. Destaca-se nesta avaliação um relativo aumento do torque para o modelo formão em relação às outras brocas. O processo de corte dos pedaços de fibras neste compósito podem ter exigido um maior esforço das arestas de corte da ferramenta. Como neste modelo não existem

canais helicoidais para a saída dos cavacos e suas arestas de corte incidem de uma forma mais intensa no sentido transversal das fibras, o esforço para a fratura pode ser maior e a consequente eliminação do cavaco pode ser dificultada, elevando os valores. Apesar deste comportamento, a diferença observada também não sofreu grandes variações, com valores abaixo de 2 Nm.

**Figura 66 - Torque medido durante a furação do compósito com fibras cortadas manualmente nos diferentes parâmetros utilizados**

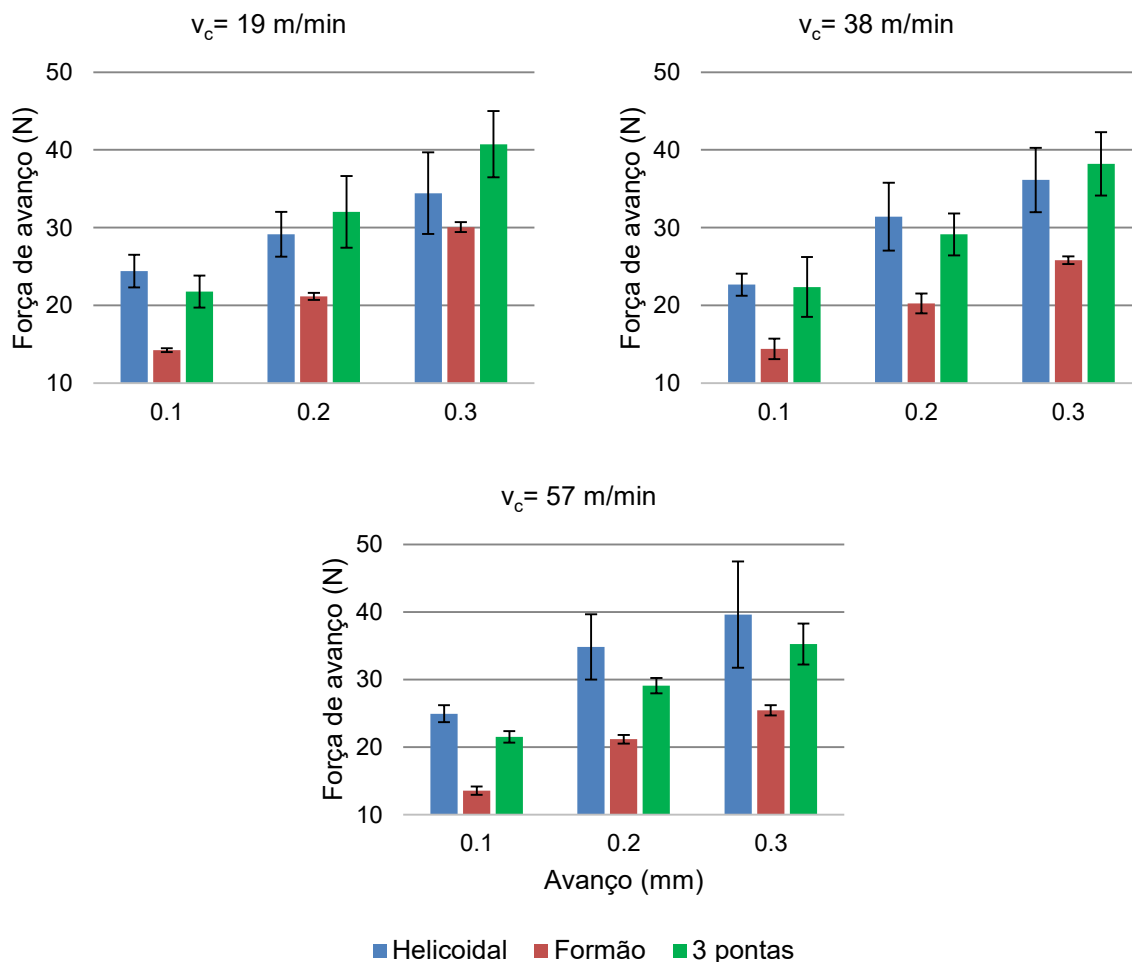


**Fonte: Autoria própria (2021)**

#### 4.6.4 Força de avanço gerada na furação do compósito com fibras cortadas manualmente

A Figura 67 mostra os valores das forças de avanço geradas pelos três modelos de brocas na furação dos compósitos com fibras cortadas manualmente. Os valores apresentados no gráfico são a média com desvio padrão de três furações executadas para cada parâmetro, similar ao outro tipo de compósito.

**Figura 67 - Força de avanço medida durante a furação do compósito com fibras cortadas manualmente nos diferentes parâmetros utilizados**



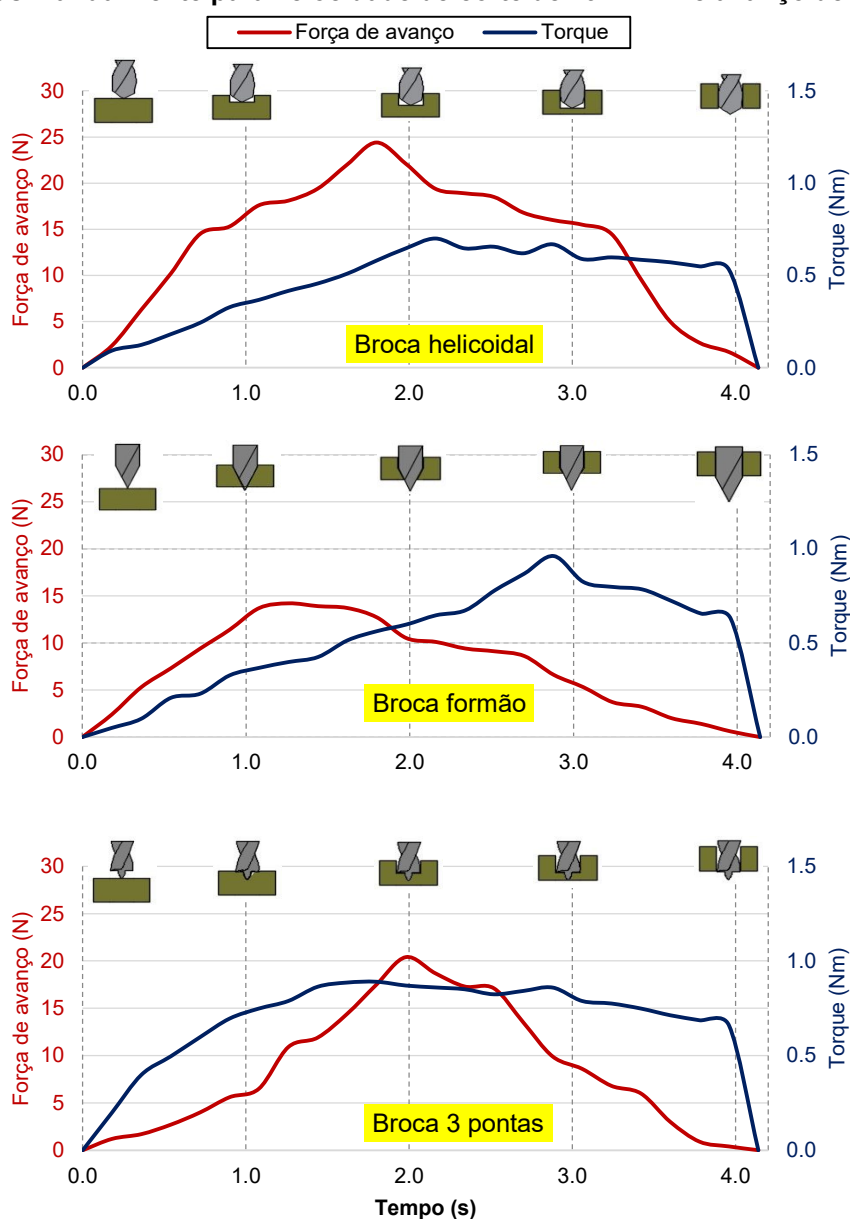
**Fonte: Autoria própria (2021)**

Em todas as velocidades de corte observou-se o incremento das forças de avanço em função do aumento do avanço. Similar ao outro compósito, a broca modelo formão apresentou os menores valores das forças. As brocas helicoidal e três pontas tiveram um comportamento similar para velocidade de corte de 19 e 38 m/min. Para 57 m/min a broca helicoidal apresentou valores superiores à três pontas. Os valores mais altos para as brocas modelo helicoidal e três pontas podem ser justificados pela própria geometria das ferramentas. No modelo helicoidal, a aresta transversal influencia no aumento das forças de avanço. A geometria da broca três pontas, que apesar das quinas e da ponta central serem mais compridas em relação às arestas de corte propriamente ditas, mantém o contato destas arestas por um maior período de tempo até transpassar a espessura do painel, aumentando as forças. Na broca formão, conforme observado anteriormente, quando o diâmetro total entra em contato com o material sua ponta já ultrapassou a espessura do

painel, reduzindo os esforços. Além disto, sua aresta transversal é menor em relação aos outros modelos usados.

A Figura 68 mostra a evolução das forças de torque e avanço atuantes no processo de furação dos compósitos com fibras cortadas manualmente em função do tempo ( $v_c = 19$  m/min;  $f = 0,1$  mm) para os três modelos de broca. Foram utilizadas as mesmas frequências de aquisição de dados usadas no outro tipo de compósito para a geração dos gráficos.

**Figura 68 – Torque e força de avanço em função do tempo de furação no compósito com fibras cortadas manualmente para velocidade de corte de 19 m/min e avanço de 0,1 mm**



Fonte: Autoria própria (2021)

As brocas helicoidal e de três pontas tiveram um comportamento similar, atingindo os maiores valores de forças de avanço por volta de 2 segundos, quando toda a geometria da ponta da ferramenta entrou em contato com o material. Na broca formão, com valores medidos mais baixos em relação aos outros modelos, as maiores forças foram geradas por volta de 1 segundo, quando a geometria da ponta da ferramenta estava totalmente inserida na espessura do painel. A partir deste ponto os valores começaram a decrescer em função da ponta da broca transpassar a face posterior da furação, reduzindo os esforços.

O comportamento do torque foi similar na broca helicoidal e três pontas, com maiores valores sendo gerados entre 2 e 3 segundos, onde a geometria de ponta da ferramenta se encontrava totalmente inserida no painel com as arestas de corte realizando plenamente a remoção do material. A broca formão apresentou uma elevação do torque desde o contato da ponta até aproximadamente 3 segundos onde atingiu seu maior esforço. A partir desse momento sua geometria de ponta ultrapassou a espessura do material e os esforços reduziram. Os valores medidos do torque, levando em consideração o desvio padrão, ficaram próximos a 1 Nm para todas as brocas e parâmetros aplicados, sem alterações significativas.

Na literatura foram encontrados estudos sobre as forças de furação em compósitos com fibras vegetais utilizando diferentes matrizes poliméricas. A Tabela 6 mostra os valores medidos neste estudo e valores encontrados na furação de compósitos com fibras de bananeira e outras fibras vegetais.

A comparação direta destes valores deve ser analisada com ressalvas em função de fatores como a matriz polimérica, tipo de fibra e a proporção utilizada na fabricação do compósito que pode influenciar diretamente nos resultados das forças medidas. Entretanto, pode ser observado que os valores das forças de avanço medidas são próximos das encontradas na furação de compósitos com fibras de bananeira com matrizes epóxi e poliéster, utilizando broca modelo helicoidal. Comparando o torque, os valores obtidos na furação do compósito bananeira/epóxi foram menores, porém utilizando broca com 5 mm de diâmetro e velocidades de corte mais baixas.

**Tabela 6 – Comparativo entre as forças mínimas e máximas de avanço e torque encontrados neste estudo com trabalhos encontrados na literatura**

Tipo de compósito	Modelo da broca	Torque (Nm)		Força de avanço (N)		rpm / Vel. avanço	Referência
		Min.	Máx.	Min.	Máx.		
Compósito com fibras de bananeira mecanicamente trituradas / Matriz PU - 50% do peso foram fibras	Helicoidal	0,80	1,43	23,9	50,1	1000 a 3000 rpm; 100 a 300 mm/min	Este trabalho
	Três pontas	1,07	1,94	20,5	36,8		
	Formão	0,89	1,64	15,3	35,0		
Compósito com fibras de bananeira cortadas manualmente / Matriz PU - 44% do peso foram fibras	Helicoidal	0,64	1,13	22,7	39,6		
	Três pontas	0,73	1,12	21,5	40,7		
	Formão	0,81	1,68	13,6	30,1		
Compósito com fibras de <u>bananeira</u> / Matriz epóxi - proporção não informada	Helicoidal aço rápido, $\varnothing$ 5 mm, ângulo de ponta e hélice não informados	0,9	3,0	12,9	44,3	300 a 900 rpm; 100 a 300 mm/min	Chandramohan <i>et al.</i> (2011)
Compósito com fibras de <u>bananeira</u> / Matriz poliéster - 12% do peso foram fibras	Helicoidal aço rápido, $\varnothing$ não informado, ângulo de ponta 118° e hélice 30°	Não medido		22,1	67,8	1000 a 3000 rpm; 100 a 300 mm/min	Patel <i>et al.</i> (2015)
Compósito com fibras de <u>urtiga</u> / Matriz epóxi - 55% do peso foram fibras	Helicoidal metal duro, $\varnothing$ 8 mm, ângulo de ponta 118° e hélice 22°	0,46	0,92	76,0	176,0	710 a 2000 rpm; 8 a 22,4 mm/min	Choudhury <i>et al.</i> (2018)
	Formão, metal duro, $\varnothing$ 8 mm, ângulo de ponta 30° e hélice 0°	0,19	0,63	19,0	46,0		
Compósito com fibras de <u>juta</u> / Matriz Epoxi - 43% do peso foram fibras	Helicoidal aço rápido, $\varnothing$ 8 mm, ângulo de ponta 118° e hélice 30°	Não medido		≈ 25	≈ 85	750 a 1750 rpm; 50 a 150 mm/min	Maleki <i>et al.</i> (2019)

Fonte: Autoria própria (2021)



Os valores das forças de avanço encontrados no presente trabalho foram inferiores em relação aos descritos nas pesquisas de compósitos com outras fibras vegetais. Contudo, estes estudos utilizaram broca helicoidal com 8 mm de diâmetro, o que contribui para forças de avanço mais altas motivadas principalmente pelo aumento da dimensão da aresta transversal. Uma exceção foi observada para as forças mínimas medidas com a broca formão, que mostraram uma similaridade. Não foram encontradas na literatura medições de forças para a broca de três pontas em furação de compósitos com fibras vegetais. Em geral, na furação dos compósitos avaliados neste estudo, a broca modelo formão obteve valores de forças de avanço inferiores comparados aos medidos nos outros modelos utilizados. Para o torque, a broca helicoidal apresentou valores inferiores em relação aos outros modelos.

Em relação à broca formão, os resultados estão de acordo com o relatado por CHOUDHURY *et al.* (2018) em seu trabalho sobre furação de compósitos com fibras vegetais, utilizando diferentes tipos de brocas, entre elas a de modelo helicoidal e a formão. De acordo com os autores, os valores de torque estão fortemente associados ao efeito denominado de indentação, relacionado ao modelo da broca e seu ângulo de ponta. Na broca modelo formão, devido ao seu ângulo de ponta ser 30°, a aresta transversal possui dimensões menores em relação ao modelo helicoidal, reduzindo as forças de avanço. Foi observado também pelos autores que devido à geometria da broca modelo formão, o contato de todo o diâmetro com o material não ocorre em painéis com espessura reduzida, ou seja, quando a broca atinge a face de saída do furo seu diâmetro nominal ainda não penetrou totalmente em contato com o material, reduzindo os esforços de corte.

Os resultados obtidos nesta pesquisa para as forças de avanço estão de acordo com estas afirmações, porém nas medições de torque a broca helicoidal e de três pontas mostraram valores mais baixos, exceto para o compósito com fibras mecanicamente separadas. Estes modelos de brocas possuem canais para a saída dos cavacos orientados pelo ângulo de hélice que auxiliam na redução dos esforços de corte, diferente da broca formão que não possui estes canais.

## 4.7 Análise da influência das forças na qualidade dos furos

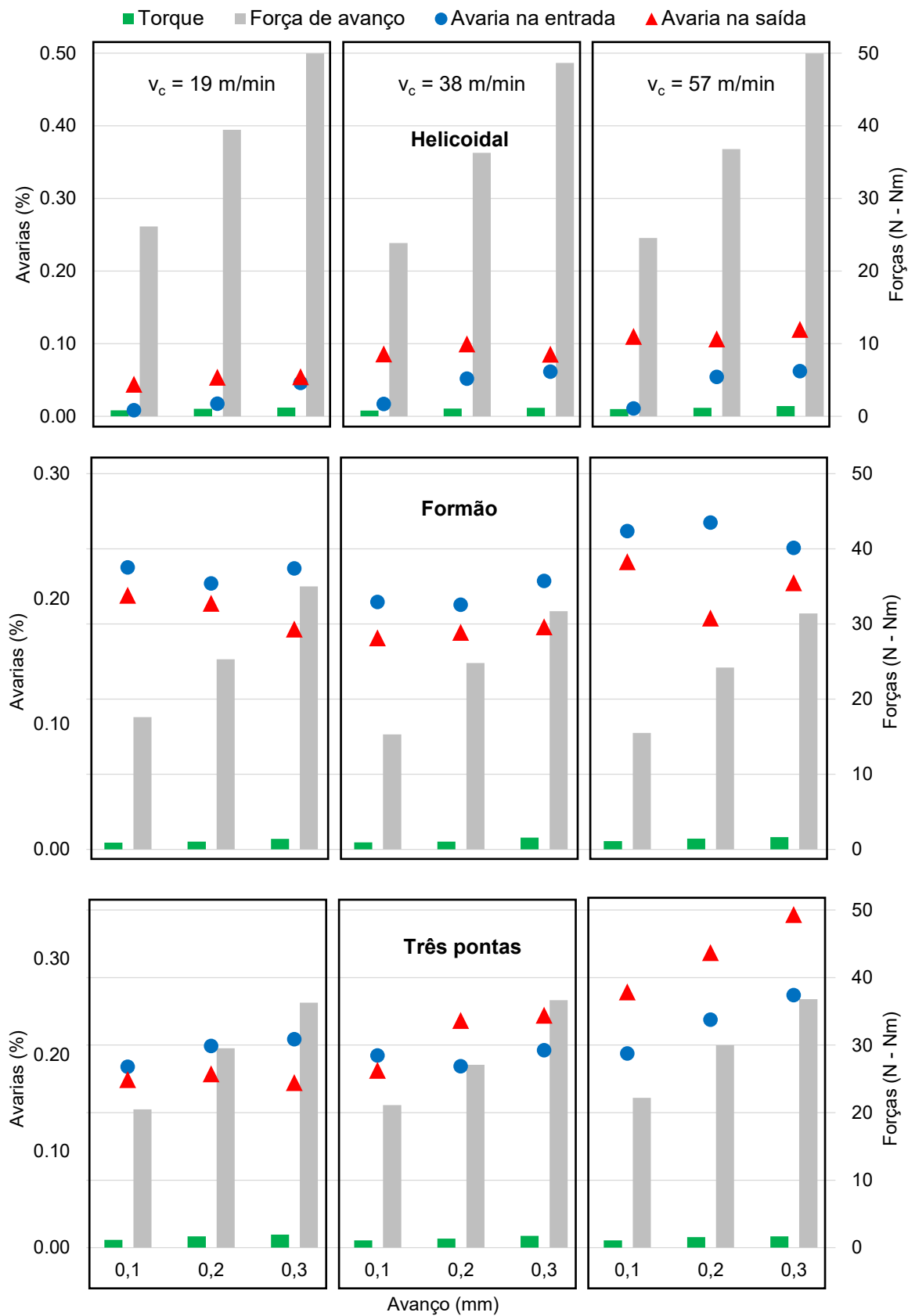
Uma análise da influência dos valores das forças medidas durante as furações foi realizada com a intenção de verificar o efeito destes fatores nos resultados de geração de avarias.

### 4.7.1 Análise das avarias em relação às forças

Na Figura 69 foram analisados os valores das forças de torque e de avanço com os valores das avarias encontrados na furação do compósito com fibras mecanicamente trituradas com os três modelos de brocas buscando-se identificar a existência de uma relação entre os valores. Com a broca helicoidal pode-se observar que o incremento nas forças de avanço elevou o número de avarias na entrada dos furos, dentro da mesma velocidade corte, porém de forma não acentuada. Na saída houve uma elevação dos danos em função do aumento da velocidade de corte. Os diferentes avanços dentro da mesma velocidade de corte mostraram valores praticamente constantes. Com a broca formão não ficou evidente a influência das forças na geração de danos. A broca três pontas teve um comportamento similar, apenas na velocidade corte de 57 m/min foi observada uma elevação das avarias em função do aumento das forças, ligadas ao incremento do avanço. Devido aos valores encontrados não é possível afirmar que o torque possui alguma relação com os danos criados durante a furação do material.

Percebeu-se exclusivamente na broca helicoidal que as menores forças de avanço se relacionaram com os menores valores de avarias. Contudo, ao comparar-se a intensidade das forças de avanço medidas entre as brocas esta relação não fica evidente. A broca helicoidal, que mostrou menores valores de avarias, gerou forças de avanço entre aproximadamente 25 a 50 Nm influenciados principalmente pela sua geometria. As brocas formão e três pontas, que apresentaram maiores valores de avarias, geraram valores de forças de avanço entre aproximadamente 20 a 35 Nm. Comparando-se estes valores não é possível afirmar que o aumento nas forças de avanço seja um fator relevante para elevar o número de avarias.

Figura 69 - Relação entre avarias e forças no compósito com fibras mecanicamente trituradas



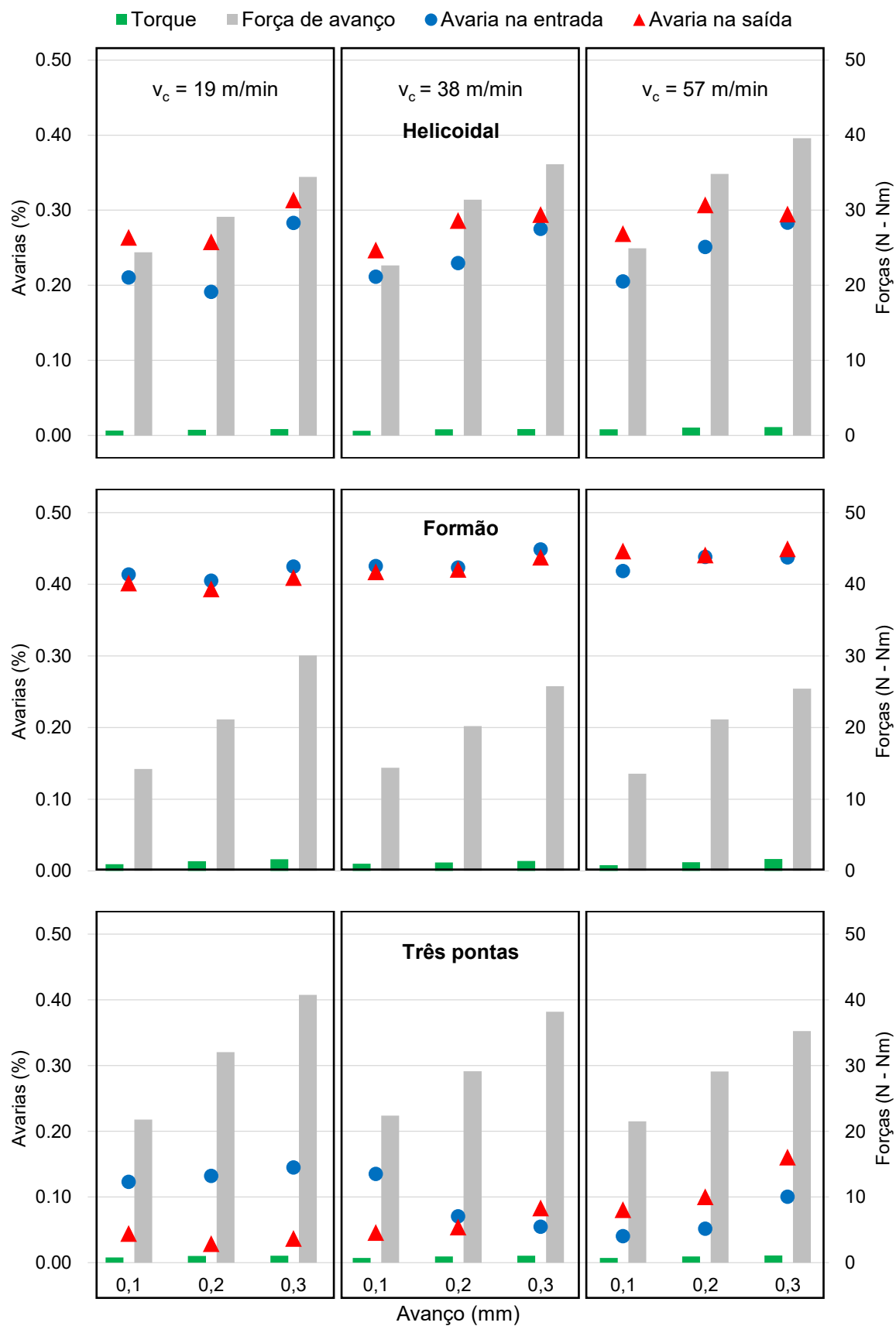
Fonte: Autoria própria (2022)

Nassar *et al.* (2017) citam em sua revisão de literatura sobre furação em compósitos com fibras vegetais que diferentes trabalhos concluíram que as forças envolvidas na furação influenciam no número de danos aos furos. Os esforços podem influenciar no comportamento da movimentação das fibras, tanto na entrada quanto na saída do furo, conforme abordado no capítulo de análise das avarias. Diferentes autores apontam a influência do torque e força de avanço na geração de avarias e pontuam a tendência de aumento destes valores em função do aumento no avanço, para a mesma velocidade de corte (CHANDRAMOHAN *et al.*, 2011; GOKUL *et al.*, 2018; DEBNATH *et al.*, 2014; BAJPAI and SINGH, 2013; CHOUDHURY *et al.*, 2018).

Conforme observa-se na Figura 69 os valores de avarias nos furos não sofrem uma interferência marcante das forças medidas, ficando mais evidente a ação do modelo da broca no processo conforme comentado no tópico 4.5. Entretanto, Nassar *et al.* (2017) afirmam que menores velocidades de corte e avanço contribuem para a geração de cavacos contínuos. Estes cavacos significam que a remoção acontece no modo dúctil evitando uma fratura mais agressiva das fibras, o que pode explicar menores danos em parâmetros mais baixos de avanço e velocidade de corte observados neste trabalho. Ainda que as diferenças de valores medidos nas avarias para cada modelo de broca não foram tão discrepantes em função dos parâmetros de usinagem aplicados, os valores mais baixos de uma forma geral foram observados em velocidades de corte e avanço menores.

A Figura 70 mostra a relação entre as forças e avarias na furação do compósito com fibras cortadas manualmente com os três modelos de brocas. Com a broca helicoidal, de forma similar ao comportamento observado no outro tipo de compósito, notou-se uma relação entre a elevação das forças, principalmente a de avanço, com o aumento das avarias nos furos em praticamente todos os parâmetros de corte. Porém, esta relação não ficou evidente para a velocidade de corte de 19 m/min entre os avanços de 0,1 e 0,2 mm, tanto na entrada quanto na saída. Também para 57 m/min, entre os avanços de 0,2 e 0,3 mm, não ficou evidente a interferência nos valores da saída da furação.

Figura 70 - Relação entre avarias e forças no compósito com fibras cortadas manualmente



Fonte: Autoria própria (2022)

Levando-se em consideração que este compósito foi fabricado com feixes de fibras e ao utilizar-se a mesma velocidade de corte, o incremento no avanço aumentou a área de contato das arestas de corte no material, o que contribuiu com uma movimentação mais intensa das fibras externas, influenciando na qualidade de corte do furo.

A broca modelo formão foi a que apresentou a maior porcentagem de avarias em relação ao diâmetro nominal do furo, comparada às outras brocas na furação deste tipo de compósito. Para a entrada da furação, observou-se uma discreta tendência de aumento de avarias relacionadas ao aumento das forças, apesar de resultados próximos, como para velocidade de corte de 19 m/min entre os avanços de 0,2 e 0,3 mm e para 38 m/min, também com os avanços de 0,2 e 0,3 mm. Também para velocidade de corte de 57 m/min, com avanços de 0,2 e 0,3 mm a variação foi discreta. Na saída da furação, observou-se um comportamento similar à entrada não ficando evidente a influência das forças.

Com a broca três pontas os valores mostraram uma elevação das avarias com o aumento das forças utilizando velocidade de corte de 19 m/min, porém os resultados se inverteram com a velocidade de 38 m/min. Para 57 m/min observou-se que as avarias voltaram a aumentar em função do aumento das forças.

Neste compósito não foi possível observar uma relação significativa entre forças e avarias. De uma forma geral o comportamento e a intensidade das forças medidas foram aproximadas entre as brocas em função dos parâmetros aplicados. Apesar da densidade mais baixa neste compósito, observou-se uma interferência mais acentuada do modelo da broca na geração dos defeitos, similar ao outro compósito.







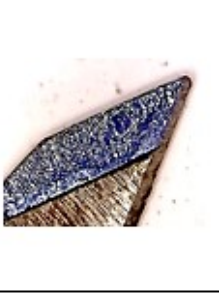

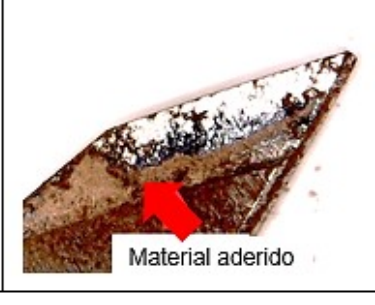
#### **4.8 Aspecto das brocas antes e após as furações**

Foram verificadas as condições dos três modelos de broca utilizadas nos testes após as furações, comparando-se com o estado da ferramenta nova. Este procedimento buscou verificar as condições das ferramentas após o ciclo de 60 furações executadas em cada tipo de compósito com todos os parâmetros propostos. Procurou-se principalmente observar as arestas de corte de cada broca e

uma possível adesão de material que poderia indicar alguma interferência na geração das avarias nos furos.

A Figura 71 mostra a aparência dos três modelos de brocas utilizadas na pesquisa, sem o uso e após as furações, nos compósitos com fibras trituradas mecanicamente e com fibras cortadas manualmente.

**Figura 71 – Aparência das brocas sem uso e após as furações nos compósitos com fibras mecanicamente trituradas e cortadas manualmente**

Broca	Aparência sem uso	Aparência após as furações	
		Compósito com fibras separadas mecanicamente	Compósito com fibras cortadas manualmente
Helicoidal			
Três pontas			
Formão			

Fonte: Autoria própria (2022)

No compósito com fibras mecanicamente trituradas, utilizando-se a broca helicoidal, foi possível observar um maior volume de aderência do material na aresta transversal e na superfície secundária de folga. Também se observou um pequeno volume aderido na aresta secundária de corte. Na broca três pontas foi possível observar um maior volume de material aderido na superfície secundária de folga e um menor volume na aresta secundária de corte. Observou-se também material

aderido na aresta secundária de corte da ponta central. Na broca formão foi possível observar material aderido na superfície de saída da broca. Nas arestas principais de corte das três ferramentas não foi observado aderência ou desgaste considerável.

No compósito com fibras cortadas manualmente, com a broca helicoidal, observou-se aderência de material na superfície secundária de folga e de corte, porém não foi observada a aderência na aresta transversal. Na broca três pontas, similar ao outro tipo de compósito, foi possível observar material aderido na superfície secundária de folga e na aresta secundária da ponta central. Na broca formão, também similar a outro tipo de compósito, observou-se material aderido na superfície secundária. Nas arestas principais de corte das três ferramentas também não foi observado aderência ou desgaste considerável, similar às brocas utilizadas na furação do compósito com fibras trituradas mecanicamente.

O material aderido nas superfícies das brocas pode ser resultado da solidificação do cavaco de PU da matriz e das fibras. Durante todo o processo de furação, os cavacos foram se movimentando pelas superfícies da broca, solidificando e aderindo. Levando-se em consideração que não foram observadas avarias térmicas durante a microscopia dos furos que indicassem um comprometimento das propriedades do compósito (fibra e matriz), pode-se afirmar que a temperatura na região do furo favoreceu ao menos um estado borrachoso dos cavacos e uma consequente aderência na ferramenta.

Outro fator que pode levar à aderência é a composição química das fibras. Fibras de bananeira, apesar do processo de secagem, ainda podem conter principalmente a lignina, responsável pela união das fibras. Este material é um aglutinante natural que ao ser fraturado pelas arestas da broca pode se misturar com os cavacos compostos principalmente pela celulose e a matriz PU favorecendo a aderência no metal das brocas.

Para todos os modelos de broca e nos dois tipos de compósitos não ocorreu aderência de material nas arestas principais de corte, o que poderia influenciar no processo de corte e consequentemente na qualidade do furos.

Depois de realizados todos os testes, foram executadas novamente as furações com os parâmetros que obtiveram os menores valores de avarias, utilizando as brocas usadas. Este procedimento foi executado para verificar se o comportamento de aderência do material poderia alterar significativamente os resultados. Os valores das avarias e forças medidos após este procedimento



permaneceram dentro da média obtida durante os testes, indicando que esta aderência observada não influenciou nos resultados. Apesar de aproximadamente 60 furos executados por cada broca, um estudo com uma quantidade maior de furações pode vir a esclarecer se este fenômeno pode comprometer a eficiência da broca, gerando maiores avarias neste tipo de material.

Não foram encontrados na literatura estudos sobre a aderência de material na furação de compósitos com fibras vegetais, apenas CHOUDHURY *et al.* (2018) comentam em seu trabalho que as temperaturas geradas em furações deste material podem exceder os limites de transição vítrea da matriz possibilitando o surgimento de avarias térmicas. Neste sentido, estas avarias térmicas podem favorecer a aderência de material a ferramenta e influenciar nos resultados.

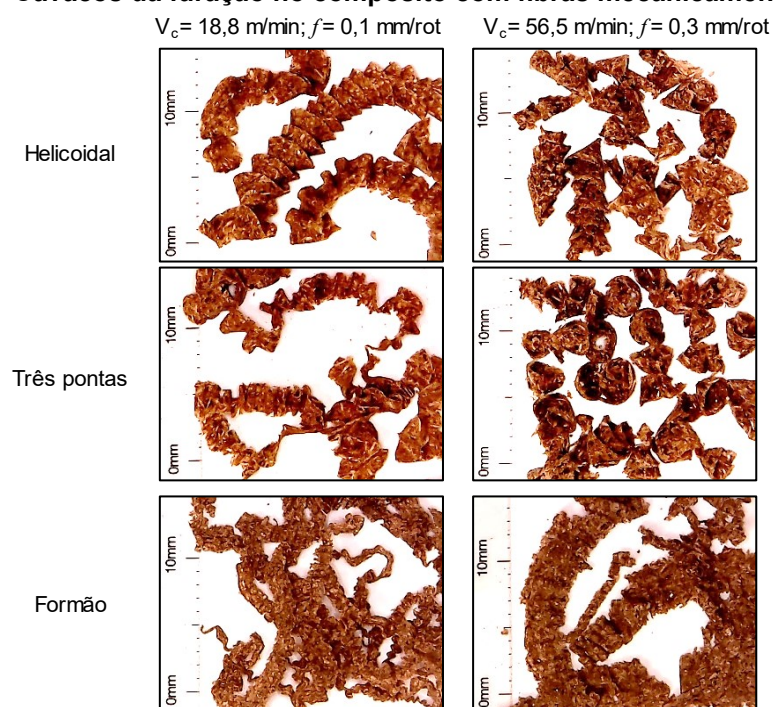
#### **4.9 Análise dos tipos e formas dos cavacos**

Os cavacos gerados pelo processo de furação no compósito com fibras mecanicamente trituradas apresentaram-se contínuos, com formas helicoidais cônicas para as brocas modelo helicoidal e três pontas. Estes cavacos apresentaram um comprimento maior na velocidade de corte e avanço mais baixa. Na velocidade mais alta os cavacos foram mais curtos. Na broca formão os cavacos também foram contínuos e de comprimento similar, porém com a forma emaranhada.

A Figura 72 mostra os cavacos gerados pela furação no compósito com fibras mecanicamente trituradas utilizando os três modelos de brocas comparando as velocidades de corte e de avanço mais baixa e mais alta.

Na furação do compósito com fibras cortadas manualmente, os cavacos provenientes do uso da broca helicoidal se apresentaram contínuos e de forma emaranhada para a velocidade de corte e avanço mais baixa, mudando para descontínuo com formato espiral curto na velocidade mais alta. Na broca modelo três pontas os cavacos se apresentaram descontínuos com formato espiral curto, tanto na velocidade mais baixa quanto na mais alta. Na broca formão os cavacos se apresentaram segmentados para a velocidade mais baixa e mais alta.

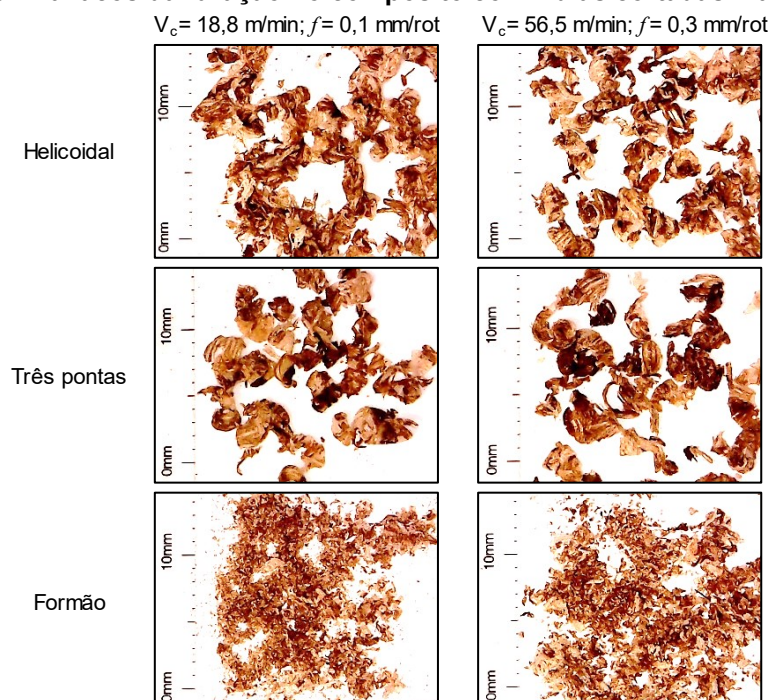
**Figura 72 – Cavacos da furação no compósito com fibras mecanicamente trituradas**



Fonte: Autoria própria (2022)

A Figura 73 mostra os cavacos gerados pela furação no compósito com fibras cortadas manualmente utilizando os três modelos de brocas com as velocidades de corte e avanço mais baixa e mais alta.

**Figura 73 - Cavacos da furação no compósito com fibras cortadas manualmente**



Fonte: Autoria própria (2022)

No compósito com fibras mecanicamente trituradas, os cavacos contínuos provenientes da velocidade de corte e avanço mais baixa resultaram no melhor acabamento nas bordas dos furos tanto na entrada quanto na saída, para todas as brocas utilizadas, com o melhor resultado obtido utilizando broca helicoidal. Este comportamento está de acordo com o citado por SHEIKH-AHMAD e DAVIM (2012), onde afirmam que os melhores resultados na usinagem de compósitos com fibras naturais acontecem para menores velocidades de avanço e de corte, que acabam por reduzir as forças de impacto da ferramenta com o material. Apesar de cavacos longos serem indesejados na usinagem de metais pela difícil eliminação, apresentarem riscos aos operadores e poderem causar danos à máquina e ao produto (SHAW, 2005), na usinagem dos compósitos estes cavacos contínuos acabam sendo desejados pela melhor qualidade no processo e por acabarem se separando naturalmente em pedaços menores devido à menor resistência da matriz polimérica em relação ao metal.

No compósito com fibras cortadas manualmente, o menor número de avarias foi observado na velocidade do corte mais alta com avanço mais baixo. Os cavacos descontínuos provenientes da velocidade de corte mais alta estão relacionados ao melhor acabamento nos furos, onde o melhor resultado foi obtido com a broca três pontas. A formação de cavacos descontínuos neste compósito é influenciada pela menor densidade deste em relação ao outro compósito, que o torna mais frágil. Conforme descrito por MACHADO *et al.* (2015), esta fragilidade faz com que o material não suporte grandes deformações e se quebre, gerando cavacos descontínuos. Segundo SHEIKH-AHMAD e DAVIM (2012), no corte de compósitos multidirecionais, o comportamento de formação do cavaco também é influenciado pelas diferentes posições das fibras nas camadas do material, que se comportam independentemente umas das outras durante o processo de corte, favorecendo a quebra do cavaco.

#### **4.10 Pós-processamento das amostras**

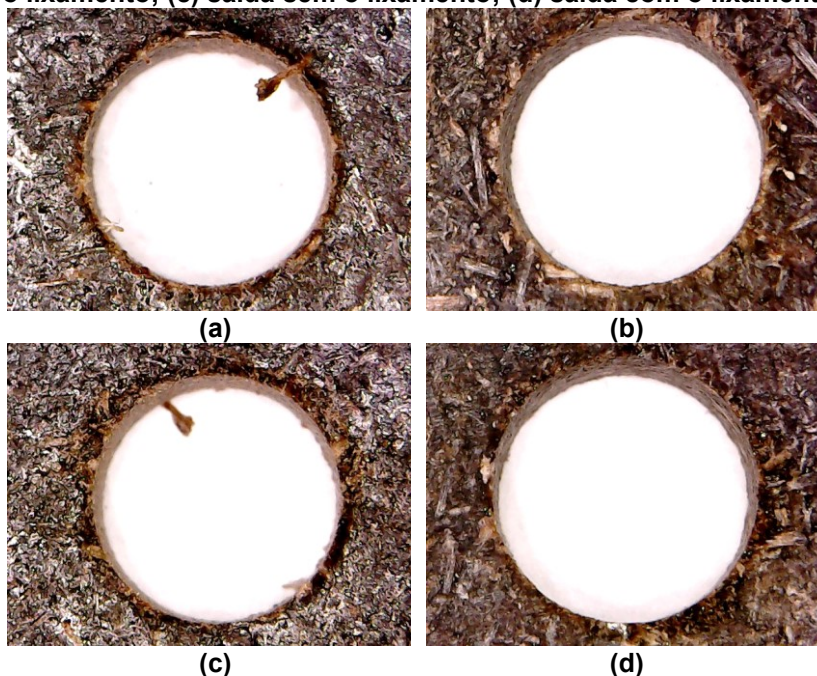
O pós-processamento das peças foi realizado com a intenção de verificar a possibilidade de melhoria nas condições dos furos. Um processo de lixamento das faces foi realizado utilizando uma lixa para madeira com granulação 180 utilizando

uma lixadeira de cinta com mesa de apoio. Foram removidos aproximadamente 0,2 mm de material na espessura da face de entrada e de saída dos furos.

A Figura 74 mostra a aparência dos furos realizados no compósito com fibras mecanicamente trituradas que utilizaram a broca modelo três pontas, com avanço de 0,1 mm e velocidade de corte de 57 m/min. Estes furos foram os que apresentaram a maior porcentagem de avarias neste tipo de compósito.

Na Figura 74a é mostrada a aparência da furação de entrada sem o lixamento e na Figura 74b o resultado obtido após o lixamento de face. As Figuras 74c e 74d mostram a aparência da saída do furo antes e depois do lixamento. Foi possível observar que este processo eliminou algumas fibras não completamente fraturadas e minimizou as avarias que se concentraram nas bordas do furo. Levando-se em consideração a medida das fibras da bananeira, conclui-se que a ação do lixamento conseguiu eliminar a primeira camada de fibras da face de entrada e saída, as quais sofreram os maiores danos causados pela ação das brocas.

**Figura 74 – Aspecto dos furos realizados no compósito de fibras mecanicamente trituradas com broca três pontas ( $v_c = 57$  m/min;  $f = 0,3$  mm): (a) entrada sem lixamento; (b) entrada com o lixamento; (c) saída sem o lixamento; (d) saída com o lixamento**



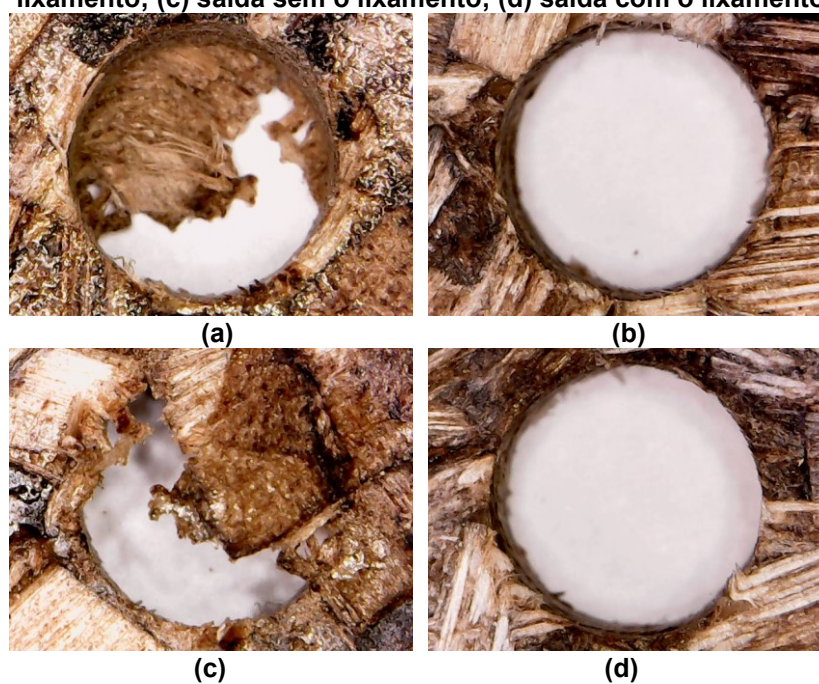
Fonte: Autoria própria (2022)

A Figura 75 mostra a aparência dos furos realizados no compósito com fibras cortadas manualmente que utilizaram a broca modelo formão, com avanço de

0,3 mm e velocidade de corte de 57 m/min. Estes furos apresentaram valores elevados de avarias na furação deste tipo de compósito.

Na Figura 75a é mostrada a aparência da furação de entrada sem o lixamento e na Figura 75b o resultado obtido após o lixamento de face. As Figuras 75c e 75d mostram a aparência da saída do furo antes e depois do lixamento. Foi possível observar também que este processo eliminou as fibras que não foram completamente fraturadas pela broca, minimizando as avarias nas bordas dos furos. O processo de lixamento, similar ao outro compósito, eliminou as fibras da primeira camada ao retirar 0,2 mm na espessura, porém ainda foi possível observar fibras dobradas e com aspecto emaranhado.

**Figura 75 - Aspecto dos furos realizados no compósito de fibras cortadas manualmente com broca formão ( $v_c = 57$  m/min;  $f = 0,3$  mm): (a) entrada sem lixamento; (b) entrada com o lixamento; (c) saída sem o lixamento; (d) saída com o lixamento**



Fonte: Autoria própria (2022)

Este procedimento foi realizado por Ellenberger *et al.* (2022) após a furação em compósitos com fibras vegetais e PU. Os autores comentaram uma melhoria significativa na qualidade dos furos, similar aos resultados obtidos no presente trabalho.

## 5 CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Os objetivos da investigação dos efeitos da utilização de diferentes tipos de brocas e parâmetros de corte na furação de compósitos com fibras de bananeira e PU derivado do óleo de mamona foram alcançados. Através deste trabalho foi possível determinar o tipo de broca e o parâmetro mais adequado para redução de avarias durante o processo de furação nos compósitos estudados. Após a realização das etapas de investigação chegou-se às seguintes conclusões:

- A fabricação e caracterização dos dois tipos de compósitos utilizados na pesquisa mostraram que ambos os materiais possuem propriedades mecânicas adequadas para uso em situações não submetidas a solicitações mecânicas elevadas e mostraram ser possível a obtenção de uma matéria-prima biodegradável a partir de resíduos da agricultura e matriz de fonte renovável, que podem substituir outros materiais de fontes não renováveis.

- O compósito com fibras mecanicamente trituradas apresentou melhores propriedades em relação ao compósito com fibras cortadas manualmente, o que possibilita seu uso em situações com maior exigência mecânica.

- O processo de furação utilizado e avaliado neste trabalho apresentou melhores resultados no compósito com fibras mecanicamente trituradas.

- A qualidade mais adequada para a furação do compósito com fibras mecanicamente trituradas foi obtida com a broca modelo helicoidal utilizando velocidade de corte de 19 m/min e avanço de 0,1 mm.

- A qualidade mais adequada para a furação do compósito com fibras cortadas manualmente foi obtida com a broca modelo três pontas utilizando velocidade de corte de 38 m/min e avanço de 0,1 mm.

- Em geral, para os dois tipos de compósitos, menores velocidades de corte e de avanço são indicadas para reduzir avarias na furação.

- As avarias observadas estavam localizadas principalmente nas bordas de entrada e saída dos furos, com as paredes dos furos não apresentando danos consideráveis. Durante a análise destas avarias foi constatada a influência do processo de entrada e saída da broca do compósito.

- A medição da força de avanço e torque no processo de furação destes compósitos comprovou como esperado a influência dos avanços aplicados.

Conforme foram aumentados os avanços, utilizando a mesma velocidade de corte, a força de avanço e torque foram gradualmente aumentando.

- O incremento das forças, principalmente de avanço, não demonstrou relação com o aumento de avarias. Para estes compósitos, o modelo de broca e as velocidades de corte e avanço mostraram influenciar na qualidade dos furos.

- A visualização do aspecto das brocas após as furações permitiu constatar aderência de material, o que não influenciou nos resultados.

- O pós-processamento mostrou-se adequado para a melhoria da qualidade dos furos.

Por fim, conclui-se que este trabalho contribuiu com o conhecimento sobre a furação de materiais compósitos com fibras vegetais. Devido à escassez de estudos mais específicos na literatura sobre a usinagem em compósitos que utilizam a fibra de bananeira e matriz PU, em especial a derivada do óleo de mamona, sugerem-se como trabalhos futuros para contribuição com esta pesquisa:

- Avaliação de diferentes modelos de brocas, com diferentes ângulos de ponta, com e sem revestimento, para verificar o comportamento e a qualidade dos furos comparados aos resultados obtidos neste trabalho.

- Pesquisar o desenvolvimento de uma broca com geometria específica para furação neste tipo de compósito. Este estudo deve levar em consideração o comportamento das fibras no processo de entrada e saída da broca no material.

- Fabricação de compósitos com PU derivado da mamona e fibras da bananeira com diferentes proporções fibra/matriz, com tratamento, e de outras espécies para verificar as propriedades obtidas comparando com o material utilizado nesta pesquisa.

- Analisar o processo de furação em compósitos com diferentes tipos de fibras vegetais oriundos de resíduos produtivos, como a cana de açúcar, utilizando como matriz um material biodegradável.

- Executar uma pesquisa sobre o tempo de vida da broca a partir dos melhores resultados obtidos neste trabalho. Esta pesquisa pode avaliar a evolução das avarias nos furos e se o material aderido observado nesta pesquisa pode efetivamente comprometer os resultados.

- Realizar testes de resistência sobre os furos executados e verificar se a avarias observadas podem comprometer as propriedades dos compósitos.

- Realizar um monitoramento das temperaturas durante a furação para uma melhor compreensão do comportamento do material durante o processo.
- Estudar a utilização de outros processos como jato de água ou corte a laser na furação destes compósitos.



## REFERÊNCIAS

ABDULLAH, N.; SULAIMAN, F.; MISKAM, M. A.; TAIB, R. M. **Characterization of banana (*Musa spp.*) pseudo-stem and fruit-bunch-stem as a potential renewable energy resource**. International Journal of Biological, Veterinary, Agricultural and Food Engineering, v. 8, n. 8, p. 712-716, 2014.

ABRÃO, A. M., FARIA, P. E.; RUBIO, J. C.; REIS, P.; DAVIM, J. P. **Drilling of fiber reinforced plastics: A review**. Journal of Materials Processing Technology, v.186, n.1-3, p. 1-7, 2007.

AHMAD, T.; DANISH, M. **Prospects of banana waste utilization in wastewater treatment: A review**. Journal of Environmental Management, v. 206, p.330-348, 2018.

AMSTALDEN, R.A.S.; NETO, C.C.; LAHR, F.A.R. **Emprego de resíduos de Paricá (*Schizolobium parayba* var. *amazonicum*) na produção de chapas de partículas homogêneas utilizando resina poliuretana á base de óleo de mamona**. In: EBRAMEM - Encontro Brasileiro em Madeiras e em Estruturas de Madeira, 14. Natal, 2014.

ANIL, A.; TOMLAL, J. E.; GEORGE, G.; MATHEW, J. T.; MANILAL, V. B. **Novel eco-friendly commingled polypropylene/banana fiber composite: studies on thermal and mechanical properties**. Polymer Bulletin, v. 73, n.11, p. 2987-3005, 2016.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIAL. **D3878**: Standard terminology for composite materials, EUA, 2016.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIAL. **D790-03**: Standard Test Methods for Flexural Properties of Unreinforced and Reinforced Plastics and Electrical Insulating Materials, EUA, 2003.

ARDANUY, M.; CLARAMUNT, J.; TOLEDO FILHO, R. D. (2015). **Cellulosic fiber reinforced cement-based composites: A review of recent research**. Construction and building materials, v. 79, p. 115-128, 2015.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR ISO 3685**: Ensaio de vida da ferramenta de ponta única para torneamento. Rio de Janeiro: ABNT, 2017.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR ISO 5419**: Brocas Helicoidais – Termos, definições e tipos. Rio de Janeiro: ABNT, 2009.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR ISO 3002:** Grandezas básicas em usinagem e retificação - Parte 1: Geometria da parte cortante das ferramentas de corte — Termos gerais, sistemas de referência, ângulos da ferramenta e de trabalho e quebra-cavacos. Rio de Janeiro: ABNT, 2013.

AZEVEDO, E. C. **Efeito da radiação nas propriedades mecânicas do adesivo de poliuretano derivado do óleo de mamona.** 2009. Tese (Doutorado) – Universidade Federal do Paraná – UFPR, Setor de Tecnologia, Programa de Pós-graduação em Engenharia, Curitiba, 2009.

AZEVEDO, E. C.; NASCIMENTO, E. M.; CHIERICE, G. O.; CLARO NETO, S.; LEPIENSKI, C. M. **UV and gamma irradiation effects on surface properties of polyurethane derivate from castor oil.** *Polímeros*, v.23, n. 3, p. 305-311, 2013.

AZUAN, S. A.; JURAI, J. M.; MUHAMAD, W. M. W. **Evaluation of delamination in drilling rice husk reinforced polyester composites.** In: *Applied Mechanics and Materials*. Trans Tech Publications Ltd, p. 106-110, 2012.

AZWA, Z. N.; YOUSIF, B. F.; MANALO, A. C.; KARUNASENA, W. (2013). **A review on the degradability of polymeric composites based on natural fibres.** *Materials & Design*, v. 47, p. 424-442, 2013.

BABU, G. D.; BABU, K. S.; GOWD, B. U. **Drilling uni-directional fiber-reinforced plastics manufactured by hand lay-up: influence of fibers.** *American journal of materials science and technology*, v. 1, n. 1, p. 1-12, 2012.

BABU, G. D.; BABU, K. S.; GOWD, B. U. **Effect of machining parameters on milled natural fiber-reinforced plastic composites.** *Journal of Advanced Mechanical Engineering*, v.1, p. 1-12, 2013.

BABU, J.; SUNNY, T.; PAUL, N. A.; MOHAN, K. P.; PHILIP, J.; DAVIM, J. P. **Assessment of delamination in composite materials: a review.** *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, v. 230, n.11, p. 1990-2003, 2016.

BAJPAI, P. K.; DEBNATH, K.; SINGH, I. **Hole making in natural fiber-reinforced polylactic acid laminates: an experimental investigation.** *Journal of Thermoplastic Composite Materials*, v. 30, n. 1, p. 30-46, 2017.

BAJPAI, P. K.; SINGH, I. **Drilling behavior of sisal fiber-reinforced polypropylene composite laminates.** *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, v. 32, n. 20, p. 1569-1576, 2013.

BASAK, S.; SAXENA, S.; CHATTOPADHYAY, S. K.; NARKAR, R.; MAHANGADE, R. (2016). **Banana pseudostem sap: a waste plant resource for making thermally stable cellulosic substrate**. Journal of Industrial Textiles, v. 46, n.4, p. 1003-1023, 2016.

CALEGARI, E.P.; OLIVEIRA, B. F. **Compósitos a partir de materiais de fontes renováveis como alternativa para o desenvolvimento de produtos**. Sustentabilidade em debate, v. 7, n. 1, p. 140 – 155, 2016.

CALLISTER, W.D. **Ciência e engenharia de materiais: uma introdução**. 7. ed. Rio de Janeiro:LTC, 2008.

CALLISTER, W. D.; RETHWISCH, D. G. **Ciência e engenharia de materiais: uma introdução**. 9. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2016.

CAMPOS, C.I.; LAHR, F.A. R; CHRISTOFORO, A.L.; NASCIMENTO, M.F. **Castor oil based polyurethane resin used in the production os médium density fiberboard**. International Journal of Composite Materials, v. 4, p. 185-189, 2014.

CANGEMI, J. M. **Biodegradação de poliuretano derivado do óleo de mamona**. 2006. Tese (Doutorado em Química Analítica) - Instituto de Química de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2006.

CANGEMI, J. M.; SANTOS, A. M. D.; C NETO, S.; CHIERICE, G. O. **Biodegradation of polyurethane derived from castor oil**. Polímeros, v. 18, n. 3, p. 201-206, 2008.

CANGEMI, J. M.; SANTOS, A. M.; NETO, S.C. **A Revolução Verde da Mamona**. Química Nova na Escola, p. 3-7, 2010.

CANGEMI, J.M.; SANTOS, A.M.; NETO, S.C. **Poliuretano: de travesseiro a preservativos, um polímero versátil**. Química Nova na Escola, v. 31, n. 3, Agosto, 2009.

CAO, Y.; SHIBATA, S.; FUKUMOTO, I. **Mechanical properties of biodegradable composites reinforced with bagasse fibre before and after alkali treatments**. Composites part A: Applied science and Manufacturing, v. 37, n. 3, p. 423-429, 2006.

CARNAUBA, V. **Convênio viabiliza desenvolvimento de calçados sustentáveis**. **Entreteses, UNIFESP, nº08, p. 62-63, 2017**. Disponível em: [https://www.unifesp.br/reitoria/dci/images/DCl/revistas/Entreteses/EntreTeses\\_8\\_2017.pdf](https://www.unifesp.br/reitoria/dci/images/DCl/revistas/Entreteses/EntreTeses_8_2017.pdf) Acessado em 28 Mar 2020

CHANDRAMOHAN, D.; MARIMUTHU, K. **Drilling of natural fiber particle reinforced polymer composite material**. International journal of advanced engineering research and studies, v. 1, n. 1, p. 134-145, 2011.

CHANDRAMOHAN, D.; MARIMUTHU, K. **A review on natural fibers**. International Journal of Research and Reviews in Applied Sciences, v. 8, n. 2, p. 194-206, 2011.

CHEGDANI, F.; MEZGHANI, S.; EL MANSORI, M.; MKADDEM, A. . **Fiber type effect on tribological behavior when cutting natural fiber reinforced plastics**. Wear, v. 332, p. 772-779, 2015.

CHOUDHURY, M. R.; SRINIVAS, M. S.; DEBNATH, K. **Experimental investigations on drilling of lignocellulosic fiber reinforced composite laminates**. Journal of Manufacturing Processes, v. 34, p. 51-61, 2018.

CIUPAN, E.; CIUPAN, C., CÂMPEAN, E. M.; STELEA, L.; POLICSEK, C. E.; LUNGU, F.; JUCAN, D. C. **Opportunities of Sustainable Development of the Industry of Upholstered Furniture in Romania. A Case Study**. Sustainability, v. 10, n. 9, p. 3356, 2018.

CLARO NETO, S. **Caracterizações físico-química de um poliuretano derivado de óleo de mamona utilizado para implantes ósseos**. 1997. Tese (Doutorado)-Instituto de Química de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 1997.

D'SOUZA, K. P., & D'SOUZA, L. **Processing and characterization of banana fiber reinforced polymer nano composite**. Nanoscience and Nanotechnology, v.7, n.2, p. 34-37, 2017.

DAS, H.; SAIKIA, P.; KALITA, D. **Physico-mechanical properties of banana fiber reinforced polymer composite as an alternative building material**. Key Engineering Materials, v. 650, p. 131-138, 2015.

DAVIM, J. P.; MATA, F.; GAITONDE, V. N.; KARNIK, S. R. **Machinability evaluation in unreinforced and reinforced PEEK composites using response surface models**. Journal of thermoplastic composite materials, v.23, n. 1, p.5-18, 2010.

DAVIM, J. P.; RUBIO, J. C.; ABRAO, A. M. **A novel approach based on digital image analysis to evaluate the delamination factor after drilling composite laminates**. Composites Science and Technology, 67, n. 9, p. 1939-1945, 2007.

DE ALBUQUERQUE, V. H. C.; TAVARES, J.R.M.S.; DURÃO, L. M. P. **Evaluation of delamination damages on composite plates using techniques of image processing and analysis and a backpropagation artificial neural network**. In: EngOpt 2008-International Conference on Engineering Optimization, Rio de Janeiro, Brazil, Jun. 2008.

DEBNATH, K.; SINGH, I.; DVIVEDI, A. **Drilling characteristics of sisal fiber-reinforced epoxy and polypropylene composites**. *Materials and Manufacturing Processes*, v. 29, n. 11-12, p. 1401-1409, 2014.

DEBNATH, K.; SINGH, I.; DVIVEDI, A. **On the analysis of force during secondary processing of natural fiber-reinforced composite laminates**. *Polymer Composites*, v. 38, n. 1, p. 164-174, 2017.

DEVI, L. U.; BHAGAWAN, S. S.; THOMAS, S. **Dynamic mechanical properties of pineapple leaf fiber polyester composites**. *Polymer composites*, v. 32, n. 11, p. 1741-1750, 2011.

DIAS, F. M.; LAHR, F. A. R. **Alternative castor oil-based polyurethane adhesive used in the production of plywood**. *Materials Research*, v.7, n.3, p. 413-420, 2004.

DÍAZ-ÁLVAREZ, A.; RUBIO-LÓPEZ, Á.; SANTIUSTE, C.; MIGUÉLEZ, M. H. **Experimental analysis of drilling induced damage in biocomposites**. *Textile Research Journal*, v. 88, n. 22, p. 2544-2558, 2018

DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG. **DIN 8589-2:2003-09**; Manufacturing processes chip removal - Part 2: Drilling, countersinking and counterboring, reaming; Classification, subdivision, terms and definitions. Berlin, Germany, 2003.

DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG. **DIN 1412:2001-03**; Twist drills made of high-speed steel - Shapes of points. Berlin, Germany, 2001.

DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG. **DIN 1836:1984-01**; Groups of tool application for chip removal. Berlin, Germany, 1984.

DINIZ, A. E., MARCONDES, F. C., COPPINI, N. L. **Tecnologia da Usinagem dos Materiais**. 7.ed. São Paulo: Artiber, 2010

DUNGANI, R.; KARINA, M.; SUBYAKTO, A. S.; HERMAWAN, D.; HADIYANE, A. **Agricultural waste fibers towards sustainability and advanced utilization: A review**. *Asian Journal of Plant Sciences*, v.15, n.1-2, p.42-55, 2016.

DURÃO, L. M. P.; TAVARES, J. M. R.; DE ALBUQUERQUE, V. H. C.; MARQUES, J. F. S.; ANDRADE, O. N. **Drilling damage in composite material**. *Materials*, v. 7, n. 5, p. 3802-3819, 2014.

DURÃO, L. M. P., GONÇALVES, D. J. S., DE ALBUQUERQUE, V.H.C., TAVARES, J.M.R.S. **Avaliação de ferramentas para a furação de laminados**. *In: 8º Congresso Nacional de Mecânica Experimental*, Guimarães, Portugal, 2010.

ELLENBERGER, A.; POLLI, M.L.; AZEVEDO, E.C.; SANTOS, R.O. **Quality of machining in the composite of banana stem fiber and polyurethane derived from castor oil.** In proceedings of the 24th ABCM International Congress of Mechanical Engineering – COBEM. Curitiba, Brazil, 2017.

ELLENBERGER, A.; POLLI, M.L.; AZEVEDO, E.C.; DE LARA, A.P.; SANTOS, R.O. **End Milling of Banana Stem Fiber and Polyurethane Derived from Castor Oil Composite.** Journal of Natural Fibers, v.18, n.10, p.1491-1500, 2019.

ELLENBERGER, A.; POLLI, M.L.; AZEVEDO, E.C.; SANTOS, R.O. **Drilling in natural fiber composites with polyurethane derived from castor oil.** In proceedings of the 25th ABCM International Congress of Mechanical Engineering – COBEM. Uberlândia, Brazil, 2019.

ELLENBERGER, A.; POLLI, M. L.; AZEVEDO, E.C.; DE PAULA, C. R. P. (2022). **Drilling of natural fiber-reinforced based polyurethane foam composite.** Journal of Composite Materials, v.56, n.6, p.899-909, 2022.

EL-SONBATY, I.; KHASHABA, U. A.; MACHALY, T. **Factors affecting the machinability of GFR/epoxy composites.** Composite structures, v. 63, n. 3-4, p. 329-338, 2004.

EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION. **EN317:** Determination of swelling in thickness after immersion in water, CEN: Brussels, Belgium, 2002.

EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION. **EN323:** Wood-based panels - Determination of density, CEN: Brussels, Belgium, 2002.

EZEMA, I. C.; MENOM, A. R.; OBAVI, C. S.; OMAH, A. D. **Effect of surface treatment and fiber orientation on the tensile and morphological properties of banana stem fiber reinforced natural rubber composite.** Journal of Minerals and Materials Characterization and Engineering, 2014.

FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS. **Statistic of crop production in the world.** Rome, 2018.

FARAZ, Ali; BIERMANN, Dirk; WEINERT, Klaus. **Cutting edge rounding: An innovative tool wear criterion in drilling CFRP composite laminates.** International Journal of Machine Tools and Manufacture, v. 49, n. 15, p. 1185-1196, 2009.

FARUK, O.; BLEDZKI, A. K.; FINK, H. P.; SAIN, M. **Biocomposites reinforced with natural fibers: 2000–2010.** Progress in polymer science, v. 37, n. 11, p. 1552-1596, 2012.

FIBANDCO. Disponível em: <https://fibandco.com/#s-home> Acesso em: 13 abr 2020

FUQUA, M.A.; HUO, S.; ULVEN, C.A. **Natural fiber reinforced composites**. Polymer Reviews, v. 52, p. 259-320, 2012.

GAY, D. **Composite materials: design and applications**. 3 ed. Florida: CRC Press, 2014.

GEIER, N.; DAVIM, J. P.; SZALAY, T. **Advanced cutting tools and technologies for drilling carbon fibre reinforced polymer (CFRP) composites: a review**. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, p. 105552, 2019.

GIRIJAPPA, T.G.Y.; RANGAPPA S.M.; PARAMESWARANPILLAI, J.; SIENGCHIN, S. **Natural fibers as sustainable and renewable resource for development of eco-friendly composites: a comprehensive review**. Frontiers in Materials, v. 6, p. 226, 2019.

GODAVARI BIOREFINERIES LTD. **NaturoMer® (Natural Fiber Biocomposite)**. Disponível em: <https://www.somaiya.com/naturomer-%C2%AE-natural-fiber-biocomposite> . Acessado em 11 Mar. 2020.

GOHIL, P. P.; CHAUDHARY, V.; PATEL, K. **Challenges in machining of natural fibre composites**. Manufacturing of Natural Fibre Reinforced Polymer Composites, p. 139-153. Cham: Springer, 2015.

GOKUL, K.; RAJASEKARAN, T. **Cutting force analysis on drilling parameters of sugarcane fibre reinforced polymer composite**. In: IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. IOP Publishing, 2018. p. 012183.

GOPAKUMAR, R; RAJESH, R. **Development, Processing and Characterization of Natural Rubber-Banana Fibre Composite**. International Journal of Scientific & Engineering Research, v.7, n.6, 2016.

GUIMARÃES, J. L.; FROLLINI, E.; DA SILVA, C. G.; WYPYCH, F.; SATYANARAYANA, K. G. **Characterization of banana, sugarcane bagasse and sponge gourd fibers of Brazil**. Industrial Crops and Products, v. 30, n. 3, p.407-415, 2009.

GUHRING, INC. Disponível em: <https://www.guhring.com/media/support/pdf/DIN-1412.pdf> Acesso em: 05 out 2022.

HART, S.L.; MILSTEIN, M.B. **Creating sustainable value**. Academy of Management Perspectives, v. 17, n. 2, p. 56-67, 2003.

HO, M. P.; WANG, H.; LEE, J. H.; HO, C. K.; LAU, K. T.; LENG, J.; HUI, D. **Critical factors on manufacturing processes of natural fibre composites**. Composites Part B: Engineering, v. 43, n. 8, p. 3549-3562, 2012.

HOECHENG, H.; PUW, H.Y. **On drilling characteristics of fiberreinforced thermoset and thermoplastics**. International Journal of Machine Tools and Manufacture. v. 32, n. 4, p. 583–592, 1992.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Produção Agrícola Municipal 2020**, IBGE: Brasília, 2020. Disponível em: [http://www.cnpmf.embrapa.br/Base\\_de\\_Dados/index\\_pdf/dados/brasil/banana/b1\\_banana.pdf](http://www.cnpmf.embrapa.br/Base_de_Dados/index_pdf/dados/brasil/banana/b1_banana.pdf). Acessado em 17 Set. 2021

INTERGOVERNMENTAL SCIENCE-POLICY PLATFORM ON BIODIVERSITY AND ECOSYSTEM SERVICES. **Summary for policymakers of the thematic assessment report on land degradation and restoration of the Intergovernmental Science-Policy Platform on Biodiversity and ecosystem Services**. IPBES Secretariat: Bonn, Germany, 2018.

ISMAIL, S. O.; DHAKAL, H. N.; POPOV, I.; BEAUGRAND, J. **Comprehensive study on machinability of sustainable and conventional fibre reinforced polymer composites**. Engineering Science and Technology, an International Journal, v. 19, n. 4, p. 2043-2052, 2016.

ISMAIL, S.O.; DHAKAL, H.N.; DIMLA, E.; BEAUGRAND, J.; POPOV, I. **Effects of drilling parameters and aspect ratios on delamination and surface roughness of lignocellulosic HFPR composites laminates**. Journal of Applied Science, v. 133, p.1-8, 2016.

JAYABAL, S.; NATARAJAN, U. **Drilling analysis of coir-fibre-reinforced polyester composites**. Bulletin of Materials Science, v. 34, n. 7, p.1563-1567, 2011.

JÚNIOR, I. B.; BELINI, U. L.; ELLENBERGER, A.; KEINERT, A. C. **Fibras naturais e compósitos nas indústrias da mobilidade**. Mix Sustentável, v.6, n.4, p. 129-138, 2020.

KALIDASS, M.; MEGALINGAM, A.; KUMAR, T. N. **Experimental Analysis of Tensile and Impact Properties of Banana-Borassus/Polyester Composite**. In proceedings of the International Conference on Advances in Materials, Manufacturing and Applications, p. 106, Trichy, India, 2015.

KESIKIDOU, F.; STEFANIDOU, M. **Natural fiber-reinforced mortars**. Journal of Building Engineering, v. 25, p. 100786, 2019.



KEYA, K. N.; KONA, N. A.; KOLY, F. A., MARAZ, K. M., ISLAM, M. N., KHAN, R. A. **Natural fiber reinforced polymer composites: history, types, advantages and applications.** Materials Engineering Research, v. 1, n. 2, p. 69-85, 2019.

KHASHABA, U. A.; EL-SONBATY, I. A., SELMY, A.I. **Machinability analysis in drilling woven GFR/epoxy composites: part I - Effect of machining parameters.** Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, v. 41, p. 1130–1137, 2010.

KHASHABA, U. A. Drilling of polymer matrix composites: a review. **Journal of composite materials**, v. 47, n. 15, p. 1817-1832, 2013.

KIRUTHIKA, A. V.; PRIYADARZINI, T. R.; VELURAJA, K. **Preparation, properties and application of tamarind seed gum reinforced banana fibre composite materials.** Fibers and Polymers, v.13, n.1, pp. 51-56, 2012.

KISTLER GROUP. Brochure: Cutting Force Measurements. Disponível em: <https://www.kistler.com/pt/solucoes/tecnologia-de-sensores/medicao-de-forcas-de-corte/> Acessado em: 25 Mar 2020.

KLOCKE, F; KUCHLE, A. **Manufacturin Process 1 – Cutting.** Aachen: Springer, 2011.

KORONIS, G.; SILVA, A.; FONTUL, M. **Green composites: A review of adequate materials for automotive applications.** Composites Part B: Engineering, v. 44, n. 1, p. 120-127, 2013.

KUMAR, D. R.; VARMA, P. S. S. K.; RAO, B. N. **Optimum drilling parameters of coir fiber-reinforced polyester composites.** American Journal of Mechanical and Industrial Engineering, v. 2, n. 2, p. 92-97, 2017.

LA MANTIA, F.P.; MORREALE, M. **Green composites: A brief review.** Composites: Part A, p. 579–588, 2011.

LALY, A.; ZACHARIAH, O.; SABU, T. **Dynamic mechanical analysis of banana fiber reinforced polyester composites.** Composites Science and Technology, v.63, n. 2, p.283-293, 2003.

LIMA, M. B.; DE OLIVEIRA, S.; FERREIRA, S. C. F. **Banana: O produtor pergunta, a Embrapa responde.** 2 ed., Brasília: Embrapa, 2012.

LIU, D.; TANG, Y.; CONG, W. L. **A review of mechanical drilling for composite laminates.** Composite structures, v. 94, n. 4, p. 1265-1279, 2012.

LOPEZ-ARRAIZA, A.; AMENABAR, I.; AGIRREGOMEZKORTA, A.; SARRIONANDIA, M.; AURREKOETXEA, J. **Experimental analysis of drilling damage in carbon-fiber reinforced thermoplastic laminates manufactured by resin transfer molding.** Journal of Composite Materials, v.6, n. 6, p.717–725, 2012.

LOTFI, A.; LI, H.; DAO, D.V. **Drilling behavior of flax/poly(lactic acid) bio-composite laminates:an experimental investigation.** Journal of Natural Fibers, v.00, p. 1–17, 2018.

LOTFI, A.; LI, H.; DAO, D. V.; PRUSTY, G. **Natural fiber–reinforced composites: a review on material, manufacturing, and machinability.** Journal of Thermoplastic Composite Materials, v. 32, p. 238-284, 2019.

LUZI, F.; PUGLIA, D.; TORRE, L. **Natural fiber biodegradable composites and nanocomposites: A biomedical application.** Biomass, Biopolymer-Based Materials, and Bioenergy, p. 179-201, 2019.

MACHADO, Á. R.; COELHO, R. T., ABRÃO, A. M.; DA SILVA, M. B. **Teoria da usinagem dos materiais.** 3ª ed. São Paulo: Blucher, 2015.

MARINHO, N. P.;NASCIMENTO, E. M.;NISGOSKI, S.;MAGALHAES, W. L. E.;CLARO NETO, S.;AZEVEDO, E. C. **Caracterização física e térmica de compósito de poliuretano derivado de óleo de mamona associado com partículas de bambu.** Polímeros, v. 23, n. 2, p. 201-205, 2013.

MARQUES, A. R.; DE OLIVEIRA PATRÍCIO, P. S.; DOS SANTOS, F. S.; MONTEIRO, M. L.; DE CARVALHO URASHIMA, D.; DE SOUZA RODRIGUES, C. **Effects of the climatic conditions of the southeastern Brazil on degradation the fibers of coir-geotextile: Evaluation of mechanical and structural properties.** Geotextiles and Geomembranes, v. 42, n. 1, p. 76-82, 2014.

MASROL, S. R.; SUDIN, S. A.; IBRAHIM, M. H. I. **Mechanical and physical behavior of short and randomly oriented banana pseudo-stem fiber reinforced epoxy composite.** In: International Conference on Mechanical Engineering Research, v.1, p.3, 2013

MAYA, M. G.; GEORGE, S. C.; JOSE, T.; SREEKALA, M. S.; THOMAS, S. **Mechanical properties of short sisal fibre reinforced phenol formaldehyde eco-friendly composites.** Polymers from Renewable Resources, v. 8, n. 1, p. 27-42, 2017.

MAZUMDER, P.; REDDY, Y. H. K.; BORSAIKIA, M. P.; KASHYA, S. **Optimization of process parameters in drilling of bamboo fibre reinforced polymeric composites.** International Journal of Science Technology and Managment, v. 5, n. 5, p. 422-34, 2016.

MERLINI, C.. **Análise experimental de compósito de poliuretano derivado de óleo de mamona e fibras de bananeira**. 2011. Dissertação (Mestrado em Ciência e Engenharia dos Materiais) – Programa de Pós-graduação em Ciência e Engenharia de Materiais, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2011.

MERLINI, C.; SOLDI, V.; BARRA, G. M. **Influence of fiber surface treatment and length on physico-chemical properties of short random banana fiber-reinforced castor oil polyurethane composites**. Polymer Testing, v.30, n.8, p. 833-840, 2011.

MITSUBISHI MATERIALS. **Terminologia das brocas e características de usinagem**. Disponível em: [http://www.mitsubishicarbide.com/application/files/5914/8178/7915/tec\\_drilling\\_terminology\\_pt-br.pdf](http://www.mitsubishicarbide.com/application/files/5914/8178/7915/tec_drilling_terminology_pt-br.pdf) . Acessado em 02 Abr. 2021.

MOCHANE, M. J.; MOKHENA, T. C.; MOKHOTU, T. H.; MTIBE, A.; SADIKU, E. R.; RAY, S. S.; DARAMOLA, O. O. **Recent progress on natural fiber hybrid composites for advanced applications: A review**. Express Polymer Letters, v.13, n. 2, p.159–198, 2019.

MOHAMMED, L.; ANSARI, M. N. M.; PUA, G.; JAWAID, M.; ISLAM, M.S. **A Review on natural Fiber Reinforced Polymer Composite and applications**. International Journal of Polymer Science, Article ID 243947, 15 p, 2015.

MOHANTY, A. K., VIVEKANANDHAN, S., PIN, J. M., MISRA, M. **Composites from renewable and sustainable resources: Challenges and innovations**. Science, v. 362, n. 6414, p. 536-542, 2018.

MOHAPATRA, D.; MISHRA, S.; SUTAR, N. (2010). **Banana and its by-product utilisation: an overview**. Journal of Scientific and Industrial Research, v. 69, p. 323-329, 2010.

MONTEIRO, S. N.; SATYANARAYANA, K. G.; FERREIRA, A. S.; NASCIMENTO, D. C. O.; LOPES, F. P. D.; SILVA, I. L. A.; PORTELA, T. G. **Selection of high strength natural fibers**. Matéria, v.15, n. 4, p. 488-505, 2010.

MOTHÉ, C. G.; ARAUJO, C. R. de. **Caracterização térmica e mecânica de compósitos de poliuretano com fibras de curauá**. Polímeros, v. 14, n. 4, p. 274-278, 2004.

MÜZEL, S. D. (2017). **Estudo da Usinagem dos Compósitos Plástico Madeira e Madeira Plástica**. 2017. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2017.

NAGARAJAN, V. A.; RAJADURAI, J. S. **A digital image analysis to evaluate delamination factor for wind turbine composite laminate blade**. Composites Part B: Engineering, v. 43, n. 8, p. 153-3159, 2012.

NAIDU, A. L.; KONA, S. **Experimental study of the mechanical properties of banana fiber and groundnut shell ash reinforced epoxy hybrid composite.** International Journal of Engineering-Transactions A: Basics, v.31, n. 4, p. 659-665, 2017.

NASSAR, M. M.; ARUNACHALAM, R.; ALZEBDEH, K. I. **Machinability of natural fiber reinforced composites: a review.** The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, v. 88, n. 9, p. 2985-3004, 2017.

NATIONAL INSTRUMENTS. Disponível em: <https://www.ni.com/pt-br.html> Acessado em: 17 abr 2020.

NELSON, P. M., NASCIMENTO, E. M., NISGOSKI, S., MAGALHÃES, W. L., C NETO, S.; AZEVEDO, E. C. **Caracterização física e térmica de compósito de poliuretano derivado de óleo de mamona associado com partículas de bambu.** Polímeros, v. 23, n. 2, p. 201-205, 2013.

PANNU, A. S.; SINGH, S.; DHAWAN, V. **Thermo-mechanical and morphological characterization of biodegradable composite rod composed of banana waste reinforcement in PLA matrix.** Materials Research Express, v.6, n.10, 2019.

PAPPU, A.; PATIL, V.; JAIN, S., MAHINDRAKAR, A., HAQUE, R.; THAKUR, V. K. **Advances in industrial prospective of cellulosic macromolecules enriched banana biofibre resources: A review.** International journal of biological macromolecules, v. 79, p. 449-458, 2015.

PATEL, K.; CHAUDHARY, V.; GOHIL, P. P.; PATEL, K. **Investigation on drilling of banana fibre reinforced composites.** 2nd International Conference on Civil, Materials and Environmental Sciences. Atlantis Press, 2015.

PAUL, V.; KANNY, K.; REDHI, G. G. **Mechanical, thermal and morphological properties of a bio-based composite derived from banana plant source.** Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, v.68, p. 90-100, 2015.

PAULA, C. R. P. D. **Caracterização de compósitos de poliuretano de óleo vegetal com madeira de Pinus taeda e fibras de Agave sisalana.** 2017. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica e de Materiais – PPGEM, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2017.

PICKERING, K. L.; EFENDY, M. A.; LE, T. M. **A review of recent developments in natural fibre composites and their mechanical performance.** Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, v. 83, p. 98-112, 2016.

PLEPIS, A. M. G. **Caracterização térmica e viscoelástica de resinas poliuretanas derivadas do óleo de mamona**. 1991. Tese (Doutorado) - Instituto de Química de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 1991.

PRAKASHREDDY, B.; SATISH, S.; THOMASRENALD, C. J. **Investigation on tensile and flexural properties of coir fiber reinforced isophthalic polyester composites**. International Journal of Current Engineering and Technology, v. 39, p. 220-225, 2014.

PRIYADARSHANA, R. W. I. B.; KALIYADASA, P. E.; RANAWANA, S. R. W. M. C. J. K.; SENARATHNA, K. G. C. **Biowaste management: Banana fiber utilization for product development**. Journal of Natural Fibers, v. 19, n. 4, p. 1461-1471, 2022.

PROTZEK, G. R.; MAGALHÃES, W.L.E.; CLARO NETO, S.; AZEVEDO, E. **Evaluation of mechanical properties of composite of pinhão with polyurethane derived from castor oil**. In: Brazilian Conference on Composite Materials. 3. 2016, Gramado.

PROTZEK, G. R.; MAGALHÃES, W.L.E.; BERTI, L. F., AZEVEDO, E. C. **On Mechanical Behavior of Pine Nut Shell and Polyurethane Derived from Castor Oil Green Composite**. Journal of Natural Fibers, p.1-16, 2021.

RAI, B., KUMAR, G., TYAGI, V.K., DIWAN, R.K., NIYOGI, U.K. **Development and Characterization of Green Composite from Euphorbia Coagulum and Banana Fiber**. Journal of Polymer Materials, v.32 n.3, pp.305-316, 2015.

RAJ, A. M.; DAS, S. L.; PALANIKUMARR, K. **Influence of drill geometry on surface roughness in drilling of Al/SiC/Gr hybrid metal matrix composite**. Indian journal of science and technology, v. 6, n. 7, p. 5002-5007, 2013.

RAMESH, M.; PALANIKUMAR, K.; REDDY, K. H. **Plant fibre based bio-composites: Sustainable and renewable green materials**. Renewable and Sustainable Energy Reviews, v. 79, p. 558-584, 2017.

RAMESH, M.; PALANIKUMAR, K.; REDDY, K. **Experimental investigation and analysis of machining characteristics in drilling hybrid glass-sisal-jute fiber reinforced polymer composites**. In: 5th international & 26th all india manufacturing technology, design and research conference AIMTDR. 2014.

RANI, K.; JAJPURA, L.; BEHERA, B. K. **Comfort Behavior of Unconventional Natural Fiber Based Union Fabrics**. Journal of Textile Science and Technology, v. 5, n. 4, p. 125, 2019.

RAO, K. M. M.; RAO, K. M. **Extraction and tensile properties of natural fibers: Vakka, date and bamboo**. Composite structures, v. 77, n. 3, p. 288-295, 2007.

REZGHI MALEKI, H.; HAMED, M.; KUBOUCHI, M.; ARAO, Y. **Experimental study on drilling of jute fiber reinforced polymer composites**. Journal of Composite Materials, v. 53, n. 3, p. 283–295, 2019.

SANJAY, M. R.; SIENGCHIN, S.; PARAMESWARANPILLAI, J.; JAWAID, M.; PRUNCU, C. I.; KHAN, A. (2019). **A comprehensive review of techniques for natural fibers as reinforcement in composites: Preparation, processing and characterization**. Carbohydrate polymers, v. 207, p. 108-121, 2019.

SANJAY, M.R.; ARPITHA, G.R.; NAIK, L.L.; GOPALARISHA, K.; YOGESHA, B. **Applications of Natural Fibers and Its Composites: An Overview**. Natural Resources, v. 7, p. 108-114, 2016.

SANTOS, W. L. F.; SILVA, A. J. P.; CABRAL JUNIOR, A. A.; MERCURY, J. M. R. **Fabricação de painéis de partículas de madeira tauari (Couratari oblongifolia) utilizando resina poliuretana de mamona**. Scientia Agraria, v.14, n.3, p.95-101, 2013.

SAPUAN, S. M., HARUN, N., ABBAS, K. A. **Design and fabrication of a multipurpose table using a composite of epoxy and banana pseudostem fibres**. Journal of Tropical Agriculture, v.45, n.1, p. 66-68, 2008.

SARAVANA BAVAN, D.; MOHAN KUMAR, G. C. **Potential use of natural fiber composite materials in India**. Journal of Reinforced Plastics and Composites, v. 29, n. 24, p. 3600-3613, 2010.

SATYANARAYANA, K. G.; GUIMARÃES, J. L.; WYPYCH, F. **Studies on lignocellulosic fibers of Brazil. Part I: Source, production, morphology, properties and applications**. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, v. 38, n. 7, p.1694-1709, 2007.

SCHULZE, V., BECKE, C., WEIDEN MANN, 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, v. 211, n. 3, p. 329-338, 2011.

SEZEN, B.; CANKAYA, S.Y. **Effects of green manufacturing and eco-innovation on sustainability performance**. Procedia-Social and Behavioral Sciences, v. 99, p. 154-163, 2013.

SHAH, D. U. **Natural fibre composites: Comprehensive Ashby-type materials selection charts**. Materials & Design, v. 62, p. 21-31, 2014.

SHALWAN, A.; YOUSIF, B.F. **In state of art: mechanical and tribological behaviour of polymeric composites based on natural fibres**. Materials & Design, v. 48, p. 14-24, 2013.

SHAW, M. C. **Metal Cutting Principles**. 2<sup>a</sup> ed. New York: Oxford University Press, 2005.

SHEIKH-AHMAD, J. Y.; DAVIM, J.P. **Cutting and machining processes of composite fibers**. Wiley Encyclopedia of Composites. Cutting and Machining of Polymer Composites. p.648, ISBN: 978-0-470-12828-2, 2012.

SILVA, I. F., **Potencial do pseudocaule de bananeira (cultivar Prata anã) para a produção de etanol de segunda geração**. 2016. Tese (Doutorado) - Programa de Pós-Graduação em Bioquímica Aplicada, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2016.

SILVA, R. V. **Compósito de resina poliuretano derivado de óleo de mamona e fibras vegetais**. 2003. Tese (Doutorado em Ciências e Engenharia dos Materiais) – Área Interunidades em Ciências e Engenharias de Materiais, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2003.

SILVESTRE FILHO, G. D. **Comportamento mecânico do poliuretano derivado de óleo de mamona reforçado por fibra de carbono: contribuição para o projeto de hastes de implante de quadril**. 2001. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2001

SOUZA, G. N. S.; SELOS, P. P.; DE MOURA, T. R. C.; COSTA, W. O.; CARVALHO, F.A. **Substituição da fibra de vidro por fibra de bananeira em compósitos**. ÚNICA Cadernos Acadêmicos, v.2, n.1, 2017.

STEPHENSON, D. A.; AGAPIOU, J. S. **Metal cutting theory and practice**. CRC press, 2016.

SUBAGYO, A.; CHAFIDZ, A. **Banana pseudo-stem fiber: Preparation, characteristics, and applications**. Banana Nutrition-Function and Processing Kinetics, IntechOpen, 2018.

SUMAILA, M.; AMBER, I.; BAWA, M. **Effect of fiber length on the physical and mechanical properties of random oriented, nonwoven short banana (musa balbisiana) fibre/epoxy composite**. Advances in Natural and Applied Sciences, v. 2, p. 39-49, 2013.

SUN, Z. **Progress in the research and applications of natural fiber-reinforced polymer matrix composites**. Science and Engineering of Composite Materials, v. 25, n. 5, p. 835-846., 2018.

SYDOW, Z.; BIENCZAK, K. (2019). **The overview on the use of natural fibers reinforced composites for food packaging**. Journal of Natural Fibers, v. 16, n. 8, p. 1189-1200, 2019.

TABET, Z.; BELAADI, A.; BOUMAAZA, M.; BOURCHAK, M. **Drilling of a bidirectional jute fibre and cork-reinforced polymer biosandwich structure: ANN and RSM approaches for modelling and optimization**. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, v. 117, n. 11, p. 3819-3839, 2021.

TAMOIOS. Disponível em: <http://tamoioستecnologia.com.br/> Acesso em: 13 abr 2020

THANGAMANI, K., SOMASUNDARAM, P. **Design and development of natural composite board using banana, bagasse and sisal fibre (Green Composite)**. International Journal of Innovative Research in Technology, v.1, n.10, p. 190-195, 2014.

TOCK, J. Y.; LAI, C. L.; LEE, K. T.; TAN, K. T.; BHATIA, S. **Banana biomass as potential renewable energy resource: A Malaysian case study**. Renewable and sustainable energy reviews, v. 14, n. 2, p. 798-805, 2010.

TRENT, E. M.; WRIGHT, P. K. **Metal cutting**. Butterworth-Heinemann, 2000.

TRIPATHI, N.; TRIPATHI, N.; HILLS, C. D.; SINGH, R. S.; ATKINSON, C. J. **Biomass waste utilisation in low-carbon products: harnessing a major potential resource**. Nature, npj Climate and Atmospheric Science, v. 2, n. 1, p. 1-10, 2019.

UNITED NATIONS ENVIRONMENT PROGRAMME. **Converting waste agricultural biomass into a resource**. United Nations Environment Programme (UNEP), Division of Technology, Industry and Economics International Environmental Technology Centre, Osaka/Shiga, 2015.

VÄISÄNEN, T.; HAAPALA, A.; LAPPALAINEN, R.; TOMPO, L.. **Utilization of agricultural and forest industry waste and residues in natural fiber-polymer composites: A review**. Waste Management, v. 54, p. 62-73, 2016.

VASCO, M. C.; CLARO NETO, S.; NASCIMENTO, E. M.; AZEVEDO, E. **Gamma radiation effect on sisal/polyurethane composites without coupling agents**. Polímeros, v. 27, n. 2, p. 165-170, 2017.

VENKATESHWARAN, N., PERUMAL, A. E. **Banana fiber reinforced polymer composites - a review**. Journal of Reinforced Plastics and Composites, v.29, n.15, p. 2387-2396, 2010.



VENKATESHWARAN, N.; PERUMAL, A. E. **Hole quality evaluation of natural fiber composite using image analysis technique.** Journal of Reinforced Plastics and Composites, v. 32, n. 16, p. 1188–1197, 2013.

VENKATESHWARAN, N.; PERUMAL, A. E.; JAGATHEESHWARAN, M. S. **Effect of fiber length and fiber content on mechanical properties of banana fiber/epoxy composite.** Journal of Reinforced Plastics and Composites, v. 30, n. 19, p. 1621-1627, 2011.

VENKATESHWARAN, N.; PERUMAL, A. E.; ARUSUNDARANAYAGAM, D. **Fiber surface treatment and its effect on mechanical and visco-elastic behavior of banana/epoxy composite.** Materials & Design, v.47, p.151-159, 2013.

VENTURA, A.M.F.M. **Os Compósitos e a sua aplicação na Reabilitação de Estruturas metálicas.** Ciência & Tecnologia dos Materiais, v. 21, n.3-4, 2009.

VIKASDHAWAN, D.; SINGH, S.; PANNU, A.S. **Effect of alkali treatment on mechanical properties of jute, sisal, banana, hemp and abaca fibers for polymer composite reinforcement.** International Journal of Mechanical Engineering and Technology, v.8, n. 7, p. 1775–1784, 2017.

WANG, J.; QIAN, W.; HE, Y.; XIONG, Y.; SONG, P.; WANG, R. M. **Reutilization of discarded biomass for preparing functional polymer materials.** Waste Management, v.65, p.11-21, 2017.

WESTMAN, M.P.; LADDHA, S.G.; FIFIELD, L.S.; KAFENTZIZ, T.A.; SIMMON, K.L. **Natural fiber composites: a review.** Report n. PNNL-19220. Report prepared for US Department of Energy, 2010.

WONG, S.L.; NGADI, N.; ABDULLAH, T.A.T.; INUWA, I.M. **Current state and future prospects of plastic waste as source of fuel: A review.** Renewable and Sustainable Energy Reviews, v.50, p.1167–1180, 2015.

WORLD WILDLIFE FUND. **Living Planet Report - 2018: Aiming Higher.** Grooten, M.; Almond, R.E.A. WWF, Gland, Switzerland, 2018

YALLEW, T. B.; KUMAR, P.; SINGH, I. **A study about hole making in woven jute fabric-reinforced polymer composites.** Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part L: Journal of Materials: Design and Applications, v. 230, n. 4, p. 888-898, 2016.

YASHAS GOWDA, T. G.; SANJAY, M. R.; SUBRAHMANYA BHAT, K.; MADHU, P.; SENTHAMARAIKANNAN, P.; YOGESHA, B. (2018). **Polymer matrix-natural fiber composites: An overview.** Cogent Engineering, v. 5, n. 1, p. 1446667, 2018.

ZHU, Y.; ROMAIN, C.; WILLIAMS, C. K. **Sustainable polymers from renewable resources**. *Nature*, v. 540, n. 7633, p. 354-362, 2016.

ZIMNIEWSKA, M.; MYALSKI, J.; KOZIOL, M.; MANKOWSKI, J.; BOGACZ, E. **Natural fiber textile structures suitable for composite materials**. *Journal of Natural Fibers*, v. 9, p. 229–239, 2012.

ZINI, E.; SCANDOLA, M. **Green composites: an overview**. *Polymer Composites*, v. 32, n. 12, p. 1905-1915, 2011.

## PUBLICAÇÕES

ELLENBERGER, A.; POLLI, M.L.; AZEVEDO, E.C.; DE LARA, A.P.; SANTOS, R.O. **End Milling of Banana Stem Fiber and Polyurethane Derived from Castor Oil Composite**. Journal of Natural Fibers, v.18, n.10, p.1491-1500, 2019.

ELLENBERGER, A.; POLLI, M.L.; AZEVEDO, E.C.; SANTOS, R.O. **Drilling in natural fiber composites with polyurethane derived from castor oil**. In proceedings of the 25th ABCM International Congress of Mechanical Engineering – COBEM. Uberlândia, Brazil, 2019.

ELLENBERGER, A.; BELINI, U. L.; JÚNIOR, I. B.; KEINERT, A. C. **Utilização das fibras do pseudocaule da bananeira**. Revista Científica Rural, v. 22, n. 1, p. 185-204, 2020.

JÚNIOR, I. B.; BELINI, U. L.; ELLENBERGER, A.; KEINERT, A. C. **Fibras naturais e compósitos nas indústrias da mobilidade**. Mix Sustentável, v.6, n.4, p. 129-138, 2020.

ELLENBERGER, A.; POLLI, M. L.; AZEVEDO, E.C.; DE PAULA, C. R. P. (2022). **Drilling of natural fiber-reinforced based polyurethane foam composite**. Journal of Composite Materials, v.56, n.6, p.899-909, 2022.