

LUCAS ARAUJO SILVA

**Análise quantitativa e qualitativa do processo de furação em compósitos
de fibra de carbono de matriz termoplástica**

Lucas Araujo Silva

**Análise quantitativa e qualitativa do processo de furação em compósitos
de fibra de carbono de matriz termoplástica**

Trabalho de Graduação apresentado ao Conselho de Curso de Graduação em Engenharia Mecânica da Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, como parte dos requisitos para obtenção do diploma de Graduação em Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. Dr. Marcos Valério Ribeiro

Guaratinguetá - SP
2018

S586a	Silva, Lucas Araujo Análise quantitativa e qualitativa do processo de furação de compósitos de fibra de carbono de matriz termoplástica / Lucas Araújo Silva – Guaratinguetá, 2019. 61 f : il. Bibliografia: f. 60-61 Trabalho de Graduação em Engenharia Mecânica – Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, 2019. Orientador: Prof. Dr. Marcos Valério Ribeiro 1. Materiais compostos. 2. Fibras de carbono. 3. Usinagem. I. Título. CDU 620.1
-------	---

Luciana Máximo

Bibliotecária CRB-8/3595

LUCAS ARAUJO SILVA

ESTE TRABALHO DE GRADUAÇÃO FOI JULGADO ADEQUADO COMO
PARTE DO REQUISITO PARA A OBTENÇÃO DO DIPLOMA DE
"GRADUADO EM ENGENHARIA MECÂNICA"

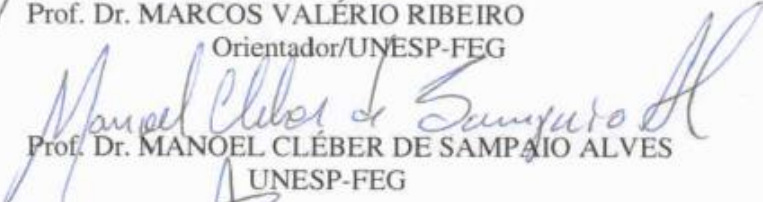
APROVADO EM SUA FORMA FINAL PELO CONSELHO DE CURSO DE
GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

Prof. Dr. MARCELO SAMPAIO MARTINS
Coordenador

BANCA EXAMINADORA:


Prof. Dr. MARCOS VALÉRIO RIBEIRO

Orientador/UNESP-FEG


Prof. Dr. MANOEL CLÉBER DE SAMPAIO ALVES

UNESP-FEG


MSc. SARAH DAVID MUZZEL

UNESP-FEG

Dezembro de 2018

Dedico este trabalho
de modo especial aos meus pais

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar agradeço pela minha vida, minha inteligência, minha família e meus amigos, que me fizeram acreditar que isso era possível,

ao meu orientador, *Prof. Dr. Marcos Valério Ribeiro*, e ao *Prof. Dr. Manoel Cleber de Sampaio Alves* que me deram a oportunidade de realizar este trabalho. Sem a sua orientação, dedicação e auxílio, o estudo aqui apresentado seria praticamente impossível.

aos meus pais *Andréa* e *Sílvio*, que apesar das dificuldades enfrentadas, sempre incentivaram meus estudos.

aos meus irmãos *Kimberly*, *João Vitor* e, principalmente, à minha irmã *Amanda* que me ajudou a realizar este trabalho com muito esforço.

aos funcionários da Faculdade de Engenharia do Campos de Guaratinguetá pela dedicação e aos professores pelo empenho em transmitir seus conhecimentos.

aos meus irmãos de alma da REP 4A que me acompanharam durante toda a caminhada até aqui.

“A glória é tanto mais tardia quanto mais duradoura há de ser, porque todo fruto delicioso amadurece lentamente.”

Arthur Schopenhauer

RESUMO

Este trabalho tem como objetivo avaliar qualitativamente e quantitativamente o processo de furação em compósitos de fibra de carbono de matriz termoplástica para obtenção das melhores condições de furação com vistas a obter um furo com boa qualidade dimensional e pouca delaminação. Para isso foram realizados ensaios de furação em dezoito placas do material, variando os parâmetros de avanço e rotação da ferramenta e coletando dados referentes a potência, força, vibração e diâmetros dos furos. Foram analisadas estatisticamente as interferências dos parâmetros nas variáveis de força, potência e vibração durante o processo de usinagem. Posteriormente, a mesma análise foi realizada para a interferência na precisão dimensional do furo. Além disso, são analisadas imagens dos corpos de prova para avaliar a delaminação. Das variáveis analisadas somente os resultados para força de usinagem estiveram de acordo com a literatura. Resultados mostraram que há interferência direta do avanço da ferramenta na precisão diametral do furo e que o mesmo parâmetro também gera maior delaminação superficial do compósito.

PALAVRAS-CHAVE: Material composto. Delaminação. Broca.

ABSTRACT

This present coursework has as its principal objective the evaluation qualitatively and quantitatively of the process of drilling fiber carbon composites with thermoplastic matrix to obtain the best conditions to make a hole with better dimensional quality and less delamination. For this, it was made eighteenth experiments using the material, varying the tool advance and rotation and collecting power, force, vibration and hole dimension data. The data were analyzed statistically to see the interference of the parameters on the force, power and vibration during the process of drilling. Afterwards, the same analysis was made to check the interference on the hole dimension precision. Furthermore, delamination analyses were made using microscopic images. From all the variables analyzed, only the results for force machining were according to theory. Results show that there is a direct interference of the tool advance on the hole diametric precision and that the same parameter generates bigger superficial delamination on the composite.

KEYWORDS: Composite material. Delamination. Drill.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Modalidades de furação	14
Figura 2 – Broca helicoidal	16
Figura 3 – CVD x PVD: tensões residuais e trincas.....	18
Figura 4 – Direção dos movimentos de corte	21
Figura 5 – Representação do desgaste VB da aresta principal de corte	22
Figura 6 – Representação do desgaste VBQ da aresta transversal	23
Figura 7 – Representação do desgaste VBF na aresta secundária de corte	23
Figura 8 – Força de usinagem e suas componentes em uma operação de fresamento	25
Figura 9 – Propriedades das diferentes classes de materiais: (a) resistência mecânica; (b) módulo de elasticidade	28
Figura 10 – Delaminação (a) na entrada <i>peel-up</i> ; (b) na saída <i>push-down</i>	35
Figura 11 – Centro de usinagem DMG	37
Figura 12 – Sistema de fixação.....	38
Figura 13 – Sistema de aquisição de dados	38
Figura 14 – Transmissor de vibração	39
Figura 15 – Pinos padrão de 4,00 a 5,00mm	40
Figura 16 – Delaminação superficial CDP: (a) 7 – 200x; (b) 3 – 1000x.....	54
Figura 17 – Delaminação superficial CDP 17 – 200x	55
Figura 18 – Delaminação CDP (1000x): (a) 7 e (b) 4	56
Figura 19 – Delaminação CDP (1000x): (a) 16 e (b) 17	56
Figura 20 – Desgaste na Broca com aumento de (a) 50X e (b) 244X.....	57
Figura 21 – Desgaste do revestimento da broca	58

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Resultados do ensaio para força, potência e vibração	42
Tabela 2 – Valor-p para potência máxima.....	42
Tabela 3 – Valor-p para força máxima	44
Tabela 4 – Valor-p para vibração máxima	45
Tabela 5 – Diâmetros medidos nas faces de entrada e saída da broca	47
Tabela 6 – Valor-p para Δ_{entrada}	48
Tabela 7 – Teste Tukey para Δ_{entrada} x Avanço.....	49
Tabela 8 – Valor-p para $\Delta_{\text{saída}}$	50
Tabela 9 – Teste Tukey para $\Delta_{\text{saída}}$ x Avanço	51
Tabela 10 – Imagens (50x) dos CDP's 1, 4 e 6	52
Tabela 11 – Imagens (50x) dos CDP's 7, 10 e 12	52
Tabela 12 – Imagens (50x) dos CDP's 13, 16 e 17	53

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	12
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	13
2.1	FURAÇÃO	13
2.1.1	Geometria da ferramenta	15
2.1.2	Materiais de ferramentas	17
2.1.2.1	Revestimentos para ferramentas	18
2.1.3	Movimentos de usinagem	19
2.1.4	Desgaste e avaria de ferramentas	21
2.1.5	Forças e potências de corte	24
2.1.5.1	Forças durante a usinagem	24
2.1.5.2	Potência de usinagem	25
2.2	MATERIAIS COMPÓSITOS	26
2.2.1	Estrutura dos materiais compósitos.....	29
2.2.1.1	Materiais de reforço	29
2.2.1.2	Matrizes	31
2.2.2	Laminados	32
2.2.3	Processamento.....	33
2.2.4	Defeitos na furação	34
3	MATERIAIS E MÉTODOS	37
3.1	PREPARAÇÃO DAS PLACAS	37
3.2	REALIZAÇÃO DOS ENSAIOS.....	37
3.3	INSTRUMENTOS DE ANÁLISE.....	40
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	41
4.1	ANÁLISE ESTATÍSTICA.....	41
4.1.1	Potência, força e vibração	41
4.1.1.1	Potência máxima	42
4.1.1.2	Força máxima	44
4.1.1.3	Vibração máxima.....	45
4.1.2	Análise Diametral	47
4.1.2.1	Diâmetro de entrada.....	47
4.1.2.2	Diâmetro de saída	49
4.2	ANÁLISE DA DELAMINAÇÃO	51

4.2.1	Delaminação superficial	53
4.3	DESGASTE DA FERRAMENTA	57
5	CONCLUSÕES	59
5.1	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	59
	REFERÊNCIAS	60
	BIBLIOGRAFIA CONSULTADA	61

1 INTRODUÇÃO

No atual nível de desenvolvimento tecnológico, as indústrias automobilística e aeroespacial têm se mostrado abertas a novas possibilidades de materiais que possam substituir, sem prejuízos estruturais, os metais já consagrados na fabricação dos mais diversos componentes. Novas alternativas também se mostram interessantes para a indústria de bens de consumo, como a de artefatos esportivos, celulares, eletrodomésticos, etc.

Neste cenário, os compósitos, que vêm ganhando destaque, apresentam valores de resistência específica maiores que os dos metais. Estes materiais podem ser desenvolvidos para que suas propriedades mecânicas sejam melhoradas em detrimento de outras de acordo com o desejável para uma determinada aplicação, sendo que para isso são usados componentes que isoladamente apresentariam desempenho inferior ao que apresentam juntos. Para composição correta do material variam-se alguns parâmetros como: os componentes, suas proporções, suas distribuições, etc.

Contudo, a fabricação de peças utilizando estes materiais requer alterações nos processos de usinagem devido ao comportamento diferente que apresentam ao serem submetidos às mais diversas operações em relação aos fabricados em metal, por isso é necessário realizar um reestudo dos parâmetros de usinagem – velocidade de corte e avanço da ferramenta.

A partir destas colocações inicia-se este trabalho com o objetivo central de avaliar o processo de usinagem de furação com broca de metal duro em placas de compósitos comerciais de fibra de carbono, com vistas a obter os parâmetros necessários para um furo com a melhor qualidade possível, avaliando o avanço, a potência de corte e a vibração, analisando-os em seu dimensional e analisando imagens microscópicas para verificar a delaminação.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Segundo Machado et al. (2009) o processo a ser utilizado para produção de uma determinada peça passa pela definição do engenheiro responsável, cujos conhecimentos devem contemplar todas as possibilidades de processos e as propriedades dos materiais envolvidos. A usinagem pode ser considerada como o processo mais utilizado na indústria e, apesar de sua alta aplicabilidade e simplicidade, devem-se considerar as várias dificuldades que a imprevisibilidade das condições ideais de corte provoca. A busca da diminuição dos custos e do melhor acabamento e dimensões especificadas para a peça se torna então alvo de estudos detalhados, apesar de se tratar de um processo essencialmente prático.

Dentre os processos de usinagem, destaca-se neste trabalho, a furação. A furação é uma operação complexa que se caracteriza pela existência de mecanismos de extrusão e corte, o primeiro efetuado pela ponta da broca, cuja velocidade é nula ou quase nula, e o segundo pelas arestas cortantes em movimento de rotação a uma dada velocidade (DURÃO et al., 2008).

Para o estudo da aplicação do processo de furação em materiais compósitos devem ser consideradas as diferenças entre o comportamento desses materiais em relação aos metais comumente utilizados. Normalmente estas operações são realizadas recorrendo aos métodos e ferramentas tradicionalmente utilizadas em peças metálicas, com algumas adaptações. Contudo, a natureza não homogênea dos materiais compósitos levanta algumas dificuldades na operação de furação, sendo frequente a existência de uma orla de dano à volta da periferia do furo efetuado (GONÇALVES et al., 2011).

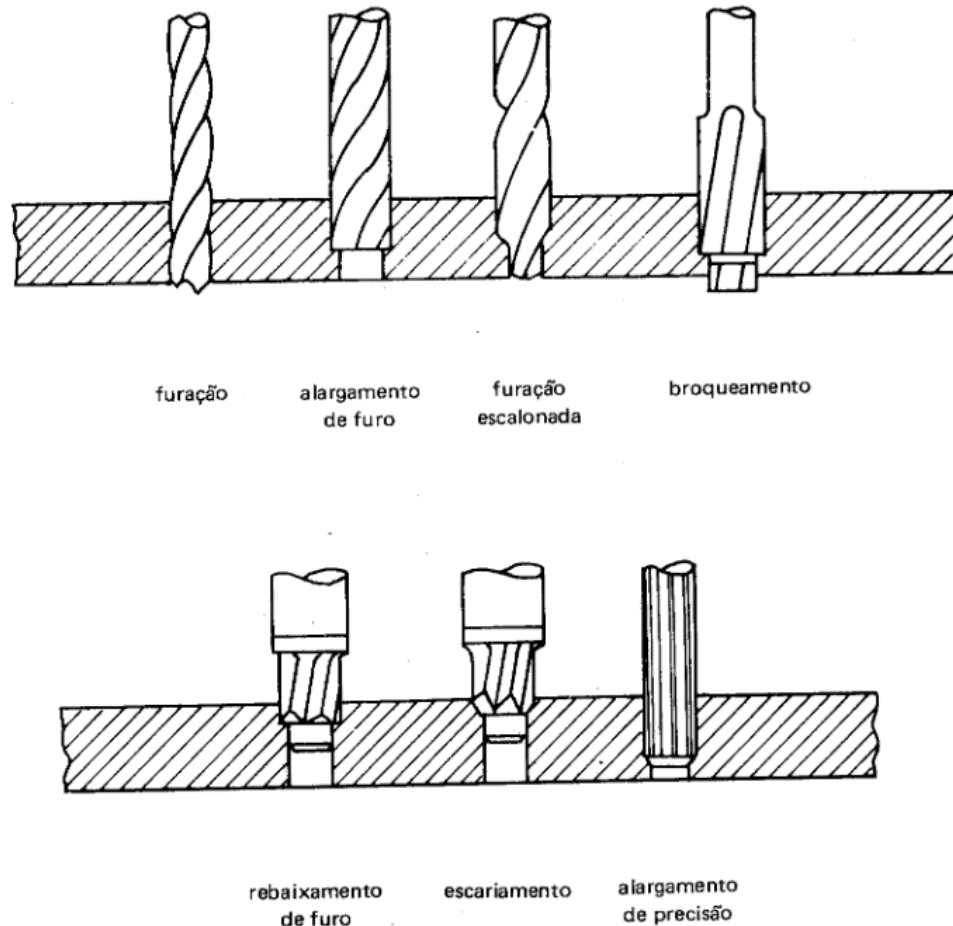
2.1 FURAÇÃO

Processo mecânico de usinagem destinado a obtenção de um furo geralmente cilíndrico numa peça, com auxílio de uma ferramenta geralmente multicortante. Para tanto, a ferramenta ou a peça giram e simultaneamente a ferramenta ou a peça se deslocam segundo uma trajetória retilínea, coincidente ou paralela ao eixo principal da máquina (FERRARESI, 1977).

A ferramenta utilizada no processo chama-se broca. A broca é dotada de um movimento retilíneo de avanço segundo o eixo de perfuração. As arestas cortantes da ferramenta arrancam material, e o cavaco resultante, à medida que é retirado, se enrola em forma de espiral cilíndrica, deslizando pelos dois canais helicoidais de descarga (CHIAVERINI, 1986).

Na Figura 1 são ilustradas os principais processos de furação utilizados.

Figura 1 – Modalidades de furação.



Fonte: Chiaverini (1986).

Segundo Diniz, Marcondes e Coppini (2013) a grande maioria das peças em qualquer tipo de indústria possui ao menos um furo, sendo que uma porcentagem pequena já vem com o furo pronto do processo de obtenção da peça bruta. Em geral as peças devem ser furadas em cheio ou terem seus furos aumentados através do processo de furação, o que torna seu estudo aprofundado muito importante. Neste processo a ferramenta mais utilizada ainda é a broca helicoidal de aço rápido, sendo que em outros processos as ferramentas progrediram mais rapidamente. Tal atraso tem diversas razões, mas a principal delas é o diâmetro dos furos, pois para utilizar brocas de diâmetros comuns em metal duro seriam necessárias rotações altas demais para furadeiras convencionais.

2.1.1 Geometria da ferramenta

Existem vários tipos de brocas, dentre as quais se destacam as brocas helicoidais, as brocas de canhão e as brocas BTA (*Broaching Trepaning Association*). Entre os tipos existentes, a broca helicoidal é sem dúvida a ferramenta de furação usada com mais frequência, motivo pelo qual, será a ferramenta a ser estudada (NOVASKI, 1996).

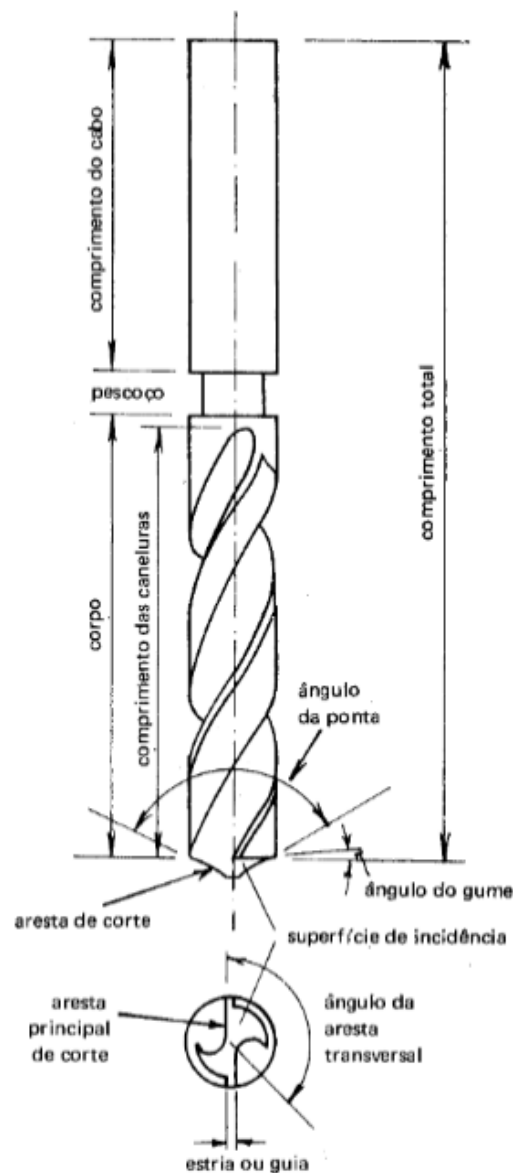
A profundidade máxima de furação com broca helicoidal em execução normal é de 4 a 10 vezes o diâmetro. Em furações nas quais a profundidade do furo ultrapassa 4 vezes o diâmetro, torna-se necessário uma parada frequente e retorno da broca para facilitar a saída do cavaco. Para furações acima dos valores estipulados acima, recomenda-se utilizar outros tipos de ferramentas específicas para estes casos (NOVASKI, 1996).

A ferramenta comumente utilizada para realizar furações é a broca helicoidal. Um exemplo genérico deste tipo de ferramenta é apresentado na Figura 1. As principais partes a serem descritas, de acordo com Diniz, Marcondes e Coppini (2013) são:

- **Cabo:** destina-se a fixação da broca na máquina. Em brocas de diâmetro pequeno (até 15 mm) em geral usa-se brocas de haste cilíndrica e a fixação à máquina se dá por intermédio de mandris. Em brocas de diâmetros maiores, prefere-se prender a broca a um cone morse, que por sua vez é preso à máquina, o que possibilita maior força de fixação.
- **Núcleo:** parte interior da broca. Serve para conferir rigidez à broca.
- **Estria ou guia:** a superfície externa de uma broca helicoidal apresenta duas regiões (uma em cada aresta de corte) que tem diâmetro maior que o diâmetro das paredes da broca. Tais regiões são denominadas guias. Tem duas funções básicas - a primeira, como o próprio nome diz, é a de guiar a broca dentro do furo; a segunda é a de evitar que toda a parede externa da broca atrite com as paredes do furo, diminuindo assim os esforços necessários para a furação.
- **Canais helicoidais:** são as superfícies de saída da ferramenta. O ângulo de hélice de brocas normais, que na periferia da broca coincide com o ângulo de saída, pode ser 28 graus para brocas de aplicação geral [...] 15 graus para brocas destinadas à usinagem de materiais com cavacos curtos [...] e 40 graus para brocas destinadas à usinagem de materiais com cavacos longos. [...] O comprimento do canal helicoidal também pode variar dependendo do diâmetro da broca e do comprimento do furo que se deseja usinar.

- **Aresta de corte:** numa broca helicoidal as duas arestas principais de corte não se encontram em um ponto, mas existe uma terceira aresta ligando-as. Esta terceira aresta é chamada de aresta transversal de corte. O ângulo formado entre as duas arestas principais, chamado de ângulo de ponta [...] é normalmente igual a 118 graus. Em brocas para usinagem de materiais moles seu valor é de 140 graus.

Figura 2 - Broca Helicoidal



Fonte: Chiaverini (1986).

Segundo Novaski (1996) o diâmetro do núcleo apresenta uma conicidade crescente (1,75:1000) à medida que se aproxima a haste. Da mesma forma, o diâmetro nominal da broca

diminui no sentido da haste com uma conicidade da ordem de 1:1000, com o objetivo de se diminuir o atrito da ferramenta com a parede do furo. A largura da guia varia de acordo com o diâmetro da broca.

2.1.2 Materiais de ferramentas

Segundo Allegrini (2014), para que se obtenha um aço ferramenta capaz de cumprir sua função removendo material, é necessário que este possua algumas propriedades mecânicas essenciais, que independem do material a ser usinado. Assim, consideram-se a dureza, a resistência à compressão e ao cisalhamento, a resistência ao impacto e à abrasão, ao choque térmico, resistência às altas temperaturas, como sendo importantes. Considerando o fato de que a obtenção de todas estas características em um mesmo material nem sempre é possível, devem-se considerar alguns fatores – como o material a ser usinado, o tipo de operação de usinagem e suas condições, condição de acabamento ou desbaste – para decidir qual ferramenta utilizar.

Segundo Diniz, Marcondes e Coppini (2013) não existe uma classificação geral de materiais para ferramentas. No entanto, com base nas suas características químicas, eles podem ser classificados da seguinte maneira:

- Aços rápidos;
- Aços rápidos com cobertura;
- Metal duro;
- Metal duro com cobertura;
- Nitreto de boro cúbico;
- Diamante.

O aço rápido, segundo Ferraresi (1977) e Diniz, Marcondes e Coppini (2013), é um aço ferramenta de alta liga de tungstênio, molibdênio, cromo vanádio, cobalto e nióbio e sua estrutura metalográfica no estado temperado é martensítica básica com carbonetos encrustrados. Este aço ferramenta reúne uma série de requisitos – sendo um material tenaz, de elevada resistência ao desgaste e elevada dureza a quente – além disso, também pode ser forjado, laminado, usinado, etc., o que o tornam preferido em inúmeras aplicações de usinagem.

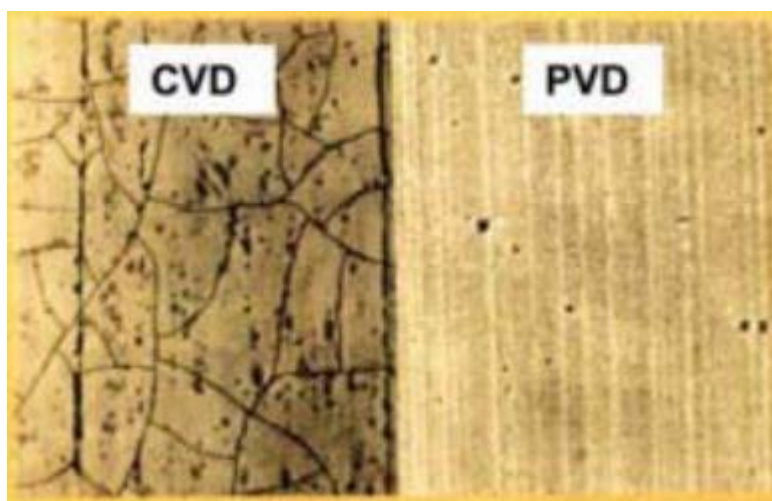
O metal duro, segundo Ferraresi (1977) e Diniz, Marcondes e Coppini (2013), é um produto da metalurgia do pó feito de partículas duras finamente divididas de cabonetos de metais refratários, sinterizados com um ou mais metais do grupo do ferro e que formam um corpo de alta dureza resistência à compressão. O metal duro satisfaz a necessidade de se ter dureza em altas temperaturas e tenacidade para ferramentas, e por isso se aplica na maioria das operações de usinagem.

2.1.2.1 Revestimentos para ferramentas

Ferramentas revestidas possuem uma composição de materiais em sua estrutura, consistindo de substrato coberto por uma camada de alta dureza, quimicamente inerte e isolante térmica, da ordem de 1 μ m. Assim, quando comparadas com ferramentas sem revestimento, ferramentas revestidas oferecem melhor proteção contra esforços mecânicos e térmicos, menor fricção e interações entre a ferramenta e o cavaco e maior resistência em uma ampla faixa de temperatura de trabalho (BOUZAKIS, 2012, tradução nossa).

De acordo com Santos e Sales (2007) o primeiro processo utilizado para aplicação de revestimentos foi a deposição química (CVD) que ocorria através de reações químicas em uma faixa de temperaturas entre 900 e 1100°C. Mais tarde surgiu o processo de deposição física (PVD), que ocorre através de vapores gerados no interior de fornos a baixa pressão. Essa pressão permite que, por meio de aquecimento, os materiais sólidos que participarão da formação dos revestimentos passem diretamente para o estado gasoso.

Figura 3 – CVD x PVD: tensões residuais e trincas.



Fonte: Adaptado de Quinto (2007).

É sabido que revestimentos por PVD possuem maior dureza, grão mais finos e melhor morfologia superficial, livre de trincas e baixas tensões compressivas residuais – vantagens relativas ao CVD estão em operações de usinagem com interrupção como fresamento e quando arestas afiadas são necessárias, como operações de acabamento final. Gerações bem sucedidas de revestimentos por PVD se tornaram disponíveis no mercado, notavelmente TiCN, TiAlN e AlCrN, com sucesso comprovado em diversas áreas de aplicação (QUINTO, 2007, tradução nossa).

As propriedades requeridas dos revestimentos são:

Essenciais:

- Estabilidade química;
- Dureza a quente;
- Boa adesividade com o substrato;

Desejáveis:

- Espessura ótima;
- Tensões residuais de compressão;
- Baixa condutividade térmica;
- Pequena adesividade com o material da peça.

2.1.3 Movimentos de usinagem

Os movimentos no processo de usinagem são movimentos relativos entre a peça e a aresta cortante. Estes movimentos são referidos à peça, considerada como parada (FERRARESI, 1977).

Devem-se distinguir duas espécies de movimentos: os que causam diretamente a saída de cavaco e aqueles que não tomam parte direta na formação do cavaco. Origina diretamente a saída de cavaco o movimento efetivo de corte, o qual na maioria das vezes é o resultante do movimento de corte e do movimento de avanço (FERRARESI, 1977).

Segundo Machado et al. (2009), Ferraresi (1977) e Diniz, Marcondes e Coppini (2013) são movimentos que causam diretamente a saída do cavaco:

- **Movimento de corte:** realizado entre a peça e a aresta que, sem a ocorrência concomitante do movimento de avanço, provoca remoção de cavaco durante uma única rotação ou um curso da ferramenta.

- **Movimento de avanço:** realizado entre a peça e a aresta de corte da ferramenta, que , juntamente com o movimento de corte, origina um levantamento repetido ou contínuo de cavaco, durante várias revoluções ou cursos. No caso da furação, o movimento de avanço é contínuo.
- **Movimento efetivo de corte:** resultante dos movimentos de corte e avanço – para o caso da furação – entre a ferramenta e a peça e a partir do qual resulta o processo de usinagem.

Segundo Machado et al. (2009), Ferraresi (1977) e Diniz, Marcondes e Coppini (2013) são movimentos que não causam diretamente a saída do cavaco:

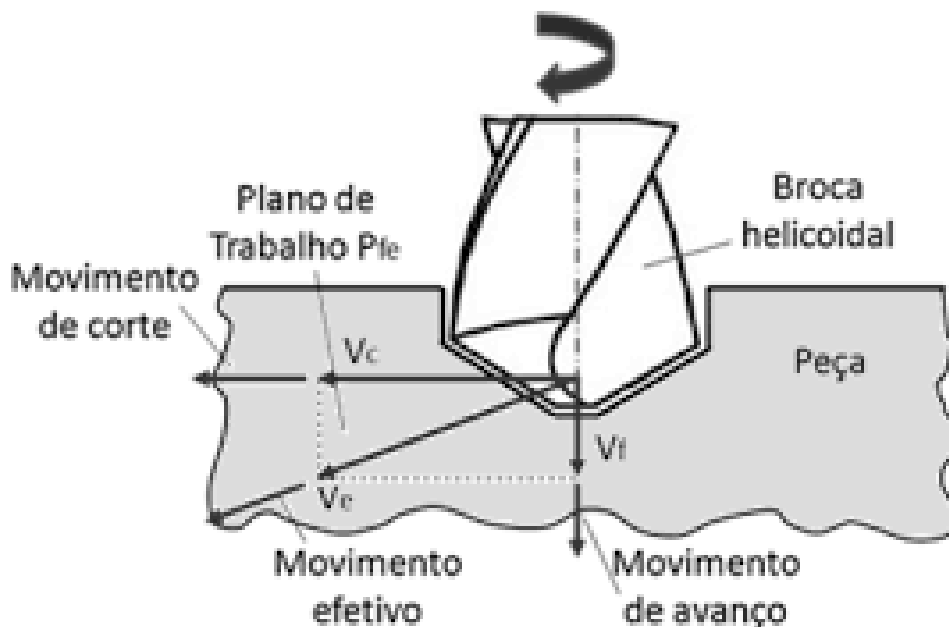
- **Movimento de ajuste:** realizado entre a peça e a ferramenta, no qual é determinada a espessura da camada de material a ser removida. Em processos de furação este movimento não ocorre, pois a espessura de material a ser removida está definida pela geometria da ferramenta.
- **Movimento de correção:** realizado entre a peça e a ferramenta para compensar alterações de posicionamento devidas, como desgaste da ferramenta, variações térmicas, entre outras.
- **Movimento de aproximação:** realizado entre a ferramenta e a peça, com o qual a ferramenta, antes da usinagem, é aproximada da peça.
- **Movimento de recuo:** realizado entre a ferramenta e a peça, com o qual a ferramenta, após a usinagem, é afastada da peça.

A todos estes movimentos estão associados, de acordo com Diniz, Marcondes e Coppini (2013), direções, sentidos, velocidades e percursos. As direções dos movimentos são suas direções instantâneas, os sentidos são aqueles resultantes quando se considera a peça parada e a ferramenta realizando o movimento e as velocidades estão associadas ao tempo de deslocamento em determinada direção e sentido. Na Figura 3 são mostrados os movimentos e suas respectivas velocidades e a seguir tem-se relacionadas: direção, velocidade e percurso.

- **Direção efetiva:** velocidade efetiva (v_e) e percurso efetivo (I_e).
- **Direção de corte:** velocidade de corte (v_c) e percurso de corte (I_c).
- **Direção de avanço:** velocidade de avanço (v_f) e percurso de avanço (I_f).
- **Direção de ajuste:** velocidade de ajuste (v_a) e percurso de corte (I_a).

- **Direção de correção:** velocidade de correção (v_n) e percurso de correção (I_n).
- **Direção de aproximação:** velocidade de aproximação (v_o) e percurso de aproximação (I_o).
- **Direção de recuo:** velocidade de recuo (v_r) e percurso de recuo (I_r).

Figura 4 – Direção dos movimentos de corte.



Fonte: Adaptado de Diniz, Marcondes e Coppini (2013).

2.1.4 Desgaste e avaria de ferramentas

Denomina-se vida de uma ferramenta o tempo que a mesma trabalha efetivamente (deduzindo os tempos passivos), até perder a sua capacidade de corte, dentro de um critério previamente estabelecido. Atingindo esse tempo, a ferramenta deve ser reafiada ou substituída. Logo, a vida da ferramenta é o tempo entre duas afiações sucessivas necessárias, no qual ela trabalha efetivamente (FERRARESI, 1977).

De acordo com Kalpakjian e Schmid (2009) as ferramentas de corte são sujeitas a esforços localizados na ponta da ferramenta e ao longo da aresta principal de corte, onde também ocorrem altas temperaturas e a saída do cavaco. Estas condições induzem o desgaste da ferramenta que afetam sua vida, e por consequência a qualidade superficial e dimensional da operação. A severidade do desgaste depende do material a ser usinado, geometria da ferramenta, parâmetros do processo, fluidos de corte e características da máquina utilizada.

De acordo com Diniz, Marcondes e Coppini (2013) e Ferraresi (1977), a determinação de um determinado desgaste fixo para avaliar a vida da ferramenta pode ser alterado por vários fatores. Sendo assim a ferramenta deve ser retirada de uso quando:

a) o desgaste da superfície da ferramenta atinge proporções tão elevadas que se receie a quebra da aresta de corte.

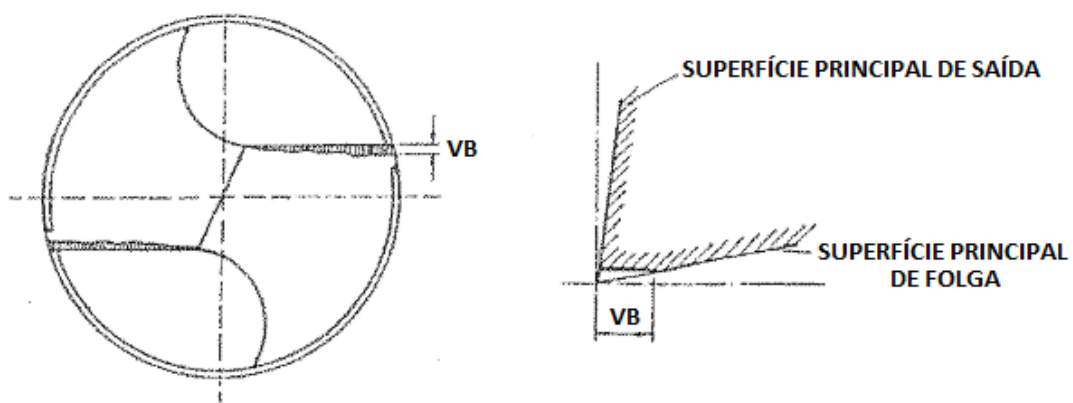
b) devido ao desgaste da superfície de folga da ferramenta não é mais possível a obtenção de tolerâncias apertadas e bons acabamentos superficiais.

c) os desgastes crescem muito, fazendo com que a temperatura da aresta de corte ultrapasse a temperatura na qual a ferramenta perde o fio de corte.

d) o aumento da força de usinagem, proveniente dos desgastes elevados da ferramenta, interfere no posicionamento da máquina.

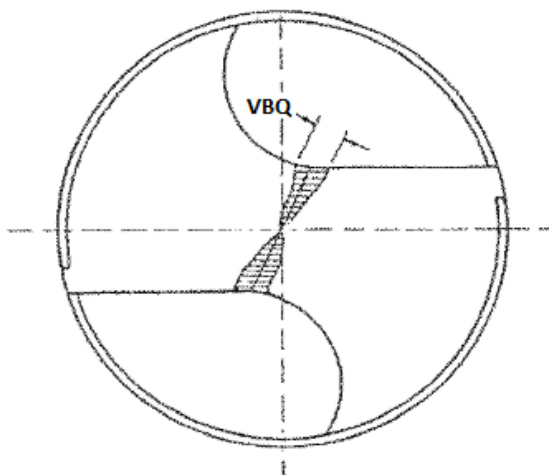
Nas brocas helicoidais o desgaste da ferramenta pode se dar em regiões diferentes, conforme mostrado nas Figuras 4, 5 e 6.

Figura 5 – Representação do desgaste VB da aresta principal de corte.



Fonte: Novaski (1996).

Figura 6 – Representação do desgaste VBQ da aresta transversal.



Fonte: Novaski (1996).

Segundo Novaski (1996) e Ferraresi (1977), para operações com boas condições de ferramenta e máquina e com parâmetros adequados, ocorrem somente desgastes nas arestas transversal e principal de corte, sendo os últimos os mais predominantes. Quando há predominância de desgastes na aresta transversal em relação aos demais, pode-se ter um indício de utilização de avanço acima do desejado.

Figura 7 – Representação do desgaste VBF na aresta secundária de corte



Fonte: Novaski (1996).

Ao se trabalhar no processo de furação com ferramenta incorreta, em más condições ou avariada, as consequências podem ser drásticas no resultado final, podendo afetar, não só a

tolerância exigida para o furo como também a qualidade deste (ALLEGRINI, 2014). São consideradas características de um furo com broca em condições adversas: furo deslocado do centro; diâmetro fora do especificado; com rebarbas na saída; com acabamento superficial ruim.

2.1.5 Forças e potências de corte

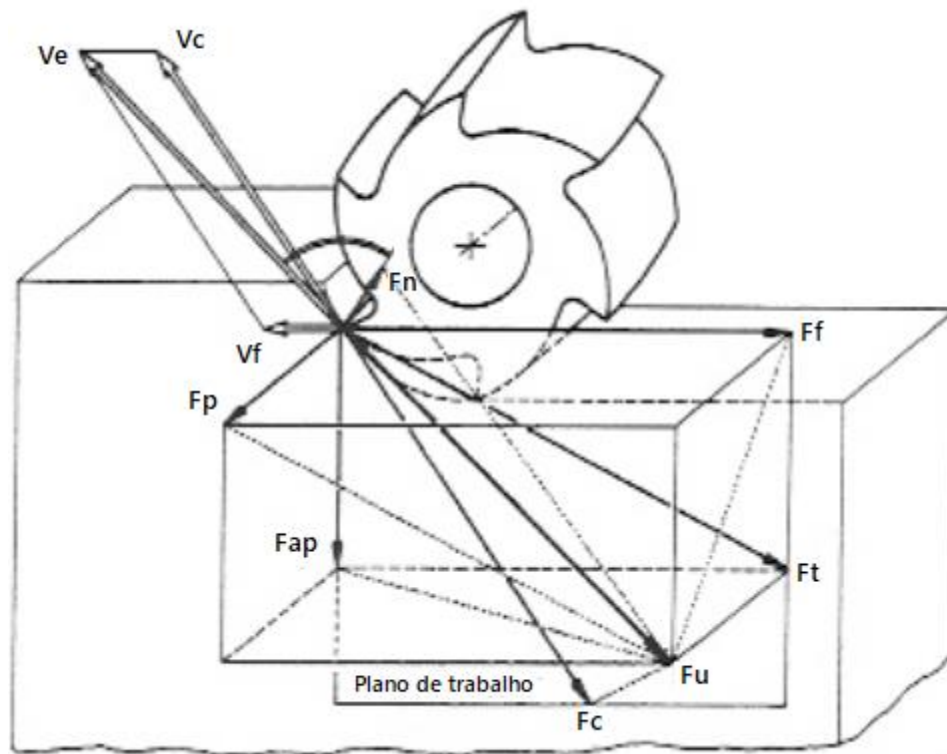
De acordo com Trent e Wright (2000) as forças atuantes na ferramenta são um importante aspecto da usinagem, para que seja possível estimar a potência requerida e para projetar os elementos da máquina ferramenta de maneira adequada, com rigidez e livre de vibrações. É desejável que as forças envolvidas na usinagem sejam relativamente baixas se comparadas com outras operações, porque a camada de material removida é fina. Além disso, a pequena área de contato faz com que os esforços na usinagem sejam mais elevados.

Ainda segundo Trent e Wright (2000), devido aos vários fatores envolvidos – propriedades dos materiais envolvidos, atrito, fluidos de corte e outras variáveis do processo – uma projeção confiável das forças e potências de corte se baseia em dados experimentais.

2.1.5.1 Forças durante a usinagem

Segundo Ferraresi (1977) e Diniz, Marcondes e Coppini (2013), as forças de usinagem são consideradas como agindo em direção e sentido sobre a ferramenta, sendo a força total que atua sobre uma cunha cortante durante o processo. A princípio não se conhece a direção e o sentido da força de usinagem (F_u), por isso é necessário utilizar nas análises suas componentes segundo diversas direções conhecidas, obtidas através de decomposição ortogonal (Figura 8). F_u é decomposta em uma componente perpendicular ao plano de trabalho, chamada força passiva ou força de profundidade (F_p) e uma que está no plano de trabalho, chamada força ativa (F_a).

Figura 8 – Força de usinagem e suas componentes em uma operação de fresamento.



Fonte: Diniz, Marcondes e Coppini (2013).

a) **Força ativa:** os componentes da força ativa contribuem para a potência de usinagem, pois estão no plano de trabalho em que os movimentos são realizados:

- Força de corte (F_c) – projeção de F_u sobre a direção de corte.
- Força de avanço (F_f) – projeção de F_u sobre a direção de avanço.
- Força de apoio (F_{ap}) – projeção de F_u sobre a direção perpendicular à direção de avanço.
- Força efetiva de corte (F_e) – projeção de F_u sobre a direção efetiva de corte.

b) **Força de profundidade:** esta componente não contribui para a potência de usinagem, pois é perpendicular aos movimentos. Porém, deve ser considerada importante por ser responsável pela deflexão elástica da peça e da ferramenta durante o corte.

2.1.5.2 Potências de usinagem

Segundo Ferraresi (1977) e Diniz, Marcondes e Coppini (2013) uma máquina ferramenta gera potência para girar seu eixo-árvore e executar o movimento de corte e para

executar o movimento de avanço. As potências necessárias para a usinagem resultam como produtos das componentes da força de usinagem pelas respectivas componentes de velocidade de corte.

a) **Potência de corte (P_c):** produto da força de corte (F_c) com a velocidade de corte (v_c).

Para F_c em [kgf] e v_c em [m/min]:

$$P_c = \frac{F_c \times v_c}{60 \times 75} = [\text{cv}] \quad (1)$$

b) **Potência de avanço (P_f):** produto da força de avanço F_f com a velocidade de avanço v_f .

Para v_f em [mm/min]:

$$P_f = \frac{F_f \times v_f}{1000 \times 60 \times 75} = [\text{cv}] \quad (2)$$

c) **Potência efetiva de corte (P_e):** produto da força efetiva de corte F_e com a velocidade efetiva de corte v_e .

Para v_e em [mm/min]:

$$P_e = \frac{F_e \times v_e}{1000 \times 60 \times 75} = [\text{cv}] \quad (3)$$

2.2 MATERIAIS COMPÓSITOS

Atualmente, os compósitos são considerados materiais de engenharia heterogêneos e multifásicos, em que pelo menos um dos componentes fornece resistência ao esforço. Por esse motivo, ele é denominado componente estrutural ou reforço, enquanto o outro é o meio de transferência do esforço, sendo chamado de componente matricial ou matriz. Eles podem ser obtidos por diferentes técnicas de processamento, como, por exemplo, a laminação manual, moldagem por compressão quente, bobinagem, moldagem por transferência de resina e pultrusão, entre outras técnicas (REZENDE; COSTA; BOTELHO, 2011).

O material compósito é resultado da combinação de duas ou mais fases quimicamente distintas e insolúveis que possuem uma interface evidente, de maneira que suas propriedades e desempenho estrutural são superiores às que seus constituintes possuem quando atuam separadamente (KALPAKJIAN; SCHMID, 2009, tradução nossa).

Segundo Chung (2010), materiais compósitos podem ser projetados para satisfazer várias propriedades através da escolha apropriada de seus componentes, suas proporções, distribuições, morfologias, tanto quanto suas estruturas e composições de interface. Devido à grande possibilidade de combinações, os materiais compósitos podem ser fabricados de maneira a satisfazer as necessidades tecnológicas relativas às áreas aeroespacial, automobilística, eletrônica, de construção, de energia, biomédica entre outras indústrias. As principais classes de compósitos são: Matriz Polimérica, *Cement-matrix*, Matriz Metálica, Matriz Carbônica e Matriz Cerâmica.

a) **Matriz Polimérica e *Cement-matrix*:** são os mais comuns devido ao baixo custo de fabricação associado. O primeiro é utilizado na fabricação de estruturas leves e resistentes. O segundo é mais aplicado na construção civil e suas ramificações.

b) **Matriz Carbônica** são importantes para estruturas e componentes leves e resistentes que precisam suportar altas temperaturas de trabalho; são caros devido ao processo de fabricação.

c) **Matriz Cerâmica:** são resistentes à oxidação, porém não são tão desenvolvidos quanto os demais tipos de compósitos.

d) **Matriz Metálica:** possuem elevada importância atualmente porque o reforço melhora as propriedades mecânicas e serve como redutor do coeficiente de expansão térmica. O uso de grafite aumenta a condutividade, o que torna esta classe atrativa ao desenvolvimento de eletrônicos.

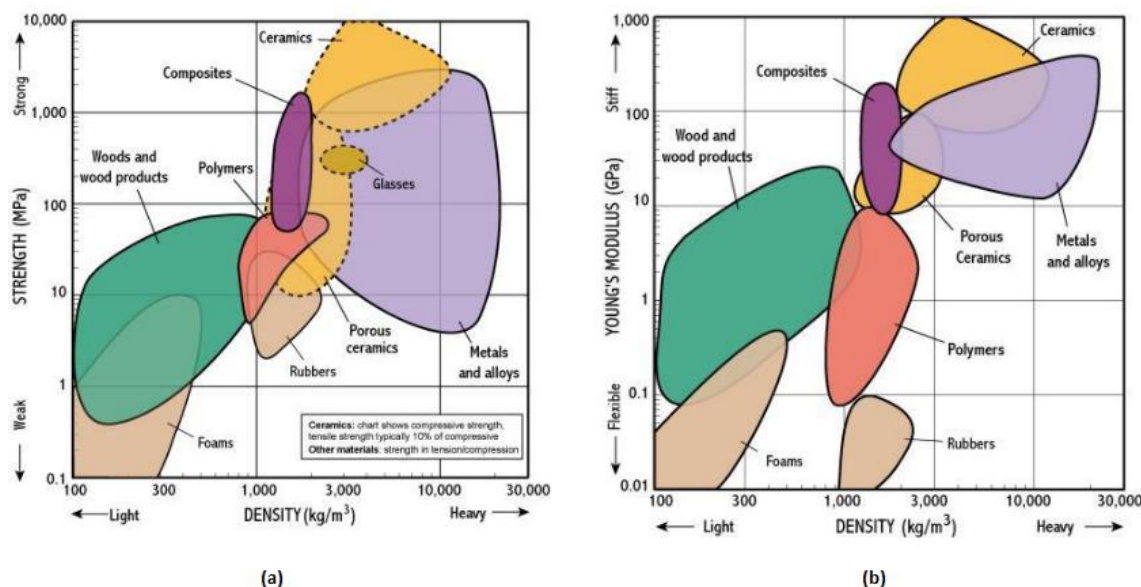
De acordo com Chung (2010) e Rezende, Costa e Botelho (2011) os compósitos poliméricos destacam-se por possuírem maior resistência específica, a qual se explica pela combinação da alta resistência com a baixa densidade. Também são materiais resistentes à fadiga e à corrosão, com expansão térmica controlada – estabilidade dimensional – e possibilitam a moldagem de peças em geometrias complexas com orientação das fibras em direções desejadas. Compósitos reforçados com fibras unidirecionais ou tecidos oferecem uma combinação de resistência e módulo superior, ou ao menos comparável à obtida com os materiais metálicos tradicionais (Figura 9).

A flexibilidade no *design* é acompanhada pela flexibilidade na produção. O uso de compósitos pode melhorar a produtividade. Um conjunto que possui diferentes partes em

metal pode ser substituído por uma única peça em compósito. Além disso, este uso também reduz o custo e o tempo de produção. [...] Uma vez que um conjunto é substituído por uma peça única, torna-se possível a obtenção de melhores tolerâncias dimensionais sem o uso de usinagem de alta precisão (AKKAŞ, 2018, tradução nossa).

O uso de compósitos torna possível a construção de componentes mais resistentes e leves. O aumento da demanda por esses materiais é decorrente de suas aparentes vantagens. Aeroespacial, automotiva, defesa, energias renováveis, petróleo, bens de consumo, vasos de pressão, artigos esportivos são exemplos de setores que se apropriam das vantagens do uso da tecnologia dos materiais compósitos (AKKAŞ, 2018, tradução nossa).

Figura 9 – Propriedades das diferentes classes de materiais: (a) resistência mecânica; (b) módulo de elasticidade.



Fonte: Akkaş (2018).

Na indústria automotiva, a substituição dos materiais tradicionais por compósitos poliméricos de alta tecnologia está levando a uma série de vantagens como a diminuição no peso total do carro, o aumento na segurança dos passageiros e diminuição de manutenção, tudo isso aliado a uma diminuição nos custos e nas etapas do processo produtivo. Isso ocorre devido ao grande módulo de elasticidade e grande capacidade de absorção de energia em conjunto com uma baixa densidade (GUTIÉRREZ et al., 2014).

Na indústria aeronáutica, de acordo com Rezende, Costa e Botelho (2011), fibras de vidro, aramida e carbono têm sido utilizadas na fabricação de peças desde seu advento. A utilização de compósitos poliméricos avançados em partes estruturais de aeronaves cresce a

cada ano, devido às excelentes propriedades mecânicas que esse material confere ao componente que está sendo projetado, além de possibilitar uma maior flexibilidade no projeto de peças complexas, com propriedades locais específicas.

2.2.1 Estrutura dos materiais compósitos

Segundo Chung (2010), a estrutura de um compósito é tal que um dos componentes é a matriz enquanto os outros são fibras que se mantêm juntas pela ação da matriz. Na estrutura carbono/epóxi, por exemplo, o epóxi (resina) é a matriz e o carbono é a fibra.

O material compósito possuirá propriedades que dependem mutuamente das fibras, material de reforço, e da matriz. Cada propriedade, porém, é influenciada de maneira diferente. A resistência à tração, por exemplo, é, basicamente, função da fibra de reforço, enquanto a capacidade de absorção de energia em um impacto depende mais da matriz. O compósito, entretanto, é a junção das duas partes, e pode-se demonstrar isso pelo fato de que, quando algumas fibras se rompem, a deformação elástica ou plástica da matriz produz forças de cisalhamento que gradualmente fazem os fragmentos de fibra exercer resistência novamente. Desse modo, percebe-se que, na ausência da matriz, as fibras ao redor teriam de suportar um aumento maior de tensão o que tornaria o material mais frágil (GUTIÉRREZ et al., 2014)

De acordo com Kalpakjian e Schmid (2009), quando mais de um tipo de fibra é usado em um plástico reforçado, o compósito recebe o nome de híbrido. Híbridos geralmente possuem propriedades ainda melhores que os compósitos de fibra única, exigindo, porém, maior investimento. Compósitos híbridos reforçados com fibra de vidro ou fibra de carbono têm sido desenvolvidos para aplicações de alta temperatura de trabalho, até aproximadamente 300°C. Contudo, tais fibras podem sofrer degradação química quando expostas ao ambiente, além de suas propriedades variarem significativamente conforme a qualidade do material e o método de processamento.

2.2.1.1 Materiais de reforço

O reforço fibroso é o principal constituinte do compósito e ocupa a maior fração em volume do material. Este componente é o responsável pela resistência ao carregamento e tem uma maior influência sobre as propriedades mecânicas do material final. O desempenho estrutural do compósito depende do tipo e da disposição das fibras em uma ou mais direções,

reforço esse que pode ser empilhado em uma sequência de camadas definida no projeto laminado, a fim de se obter produtos com valores desejáveis de resistência (REZENDE; COSTA; BOTELHO, 2011).

As fibras são, geralmente, classificadas como curtas (descontínuas) ou longas (contínuas). A designação fibra “curta” e “longa” é baseada na seguinte distinção: em um dado tipo de fibra, se as propriedades mecânicas melhoram como resultado do aumento do comprimento médio da fibra, esta é então chamada fibra descontínua. Se tal melhora não ocorre, ela é chamada fibra contínua (KALPAKJIAN; SCHMID, 2009, tradução nossa).

Fibras de vidro, carbono e aramida são as mais comuns em reforços para compósitos poliméricos na indústria.

Fibra de vidro é a mais comumente utilizada em fibras de reforço devido ao seu baixo custo, e relativamente alta resistência e rigidez se comparada com outros materiais. Além disso, possui uma alta resistência química e é um excelente isolante. Existem três tipos: *E-Glass*, *S-Glass*, *C-Glass*. *E-Glass* é o tipo mais barato e o mais usado. *S-Glass* é desenvolvido para possuir melhores propriedades mecânicas. Este tipo possui maiores resistência e rigidez entre as fibras de vidro. Para isso possui composição química diferente e custos de produção maiores que o *E-Glass*. *C-Glass* é desenvolvido para ser usado em ambientes que requerem alta resistência a produtos químicos (AKKAŞ, 2018, tradução nossa).

O desenvolvimento de fibras de carbono (ou grafite) foi um passo natural com a finalidade de aumentar a resistência à fratura a um nível mais elevado o qual as fibras de vidro não exibiam. Fibras de carbono de alta resistência apresentam resistência mecânica aproximadamente quatro vezes maior que o aço mais resistente, enquanto a densidade da fibra é também quatro vezes menor (VALSILIEV; MOROZOV, 2001, tradução nossa).

Fibra de carbono, apesar de mais cara que a de vidro, é caracterizada por uma combinação de baixa densidade, alta resistência e rigidez. Apesar dos termos serem utilizados de forma intercambiável, a diferença entre carbono e grafite depende da pureza do material e da temperatura em que ele foi processado. Fibras de carbono possuem pelo menos 90% de carbono; grafite normalmente possui mais de 99% de carbono (KALPAKJIAN; SCHMID, 2009, tradução nossa).

Fibra de aramida, de acordo com Kalpakjian e Schmid (2009) e Akkaş (2018), está entre as fibras mais resistentes, sendo utilizada em aplicações que requerem alta resistência específica e à impactos. É usada excessivamente em capacetes e coletes à prova de balas. Fibras de aramida são sensíveis à umidade, e por isso devem estar protegidas.

2.2.1.2 Matrizes

Outro importante constituinte é a matriz polimérica. Ela é um constituinte vital no desempenho de um compósito [...]. Como já citado, a matriz agrega às fibras, protege sua superfície contra danos por abrasão e atenua os efeitos adversos das condições ambientais na utilização de compósitos. A matriz deve ter uma forte adesão à superfície do reforço, de tal forma que ela se deforme no carregamento aplicado a um componente e transfira a carga entre as fibras contínuas e/ou descontínuas do compósito. As propriedades de resistência à compressão, resistência ao cisalhamento no plano e temperatura de serviço do componente também são determinadas pelo sistema de matriz polimérica (REZENDE; COSTA; BOTELHO, 2011).

Segundo Akkaş (2018) é possível dividir as matrizes poliméricas em dois grupos principais: termoplásticas e termorrígidas.

De acordo com Kalpakjian e Schmid (2009) e Akkaş (2018), matrizes termoplásticas são caracterizadas por mudanças de propriedades de acordo com a temperatura de transição vítrea (T_g). Quando a temperatura é elevada acima da temperatura de transição vítrea, esses polímeros se tornam mais maleáveis para serem moldados na forma desejada. Quando resfriados, estes retornam à suas características originais resistência e rigidez; como resultado as matrizes termoplásticas sofrem reações químicas reversíveis durante a cura.

Comparativamente aos termorrígidos, estes materiais podem apresentar maior resistência ao impacto, maior temperatura de serviço, menor absorção de água, menor custo de processamento em grande escala, menor custo de transporte e estocagem, maior facilidade na execução de reparos e maiores possibilidades de integração e de reciclagem de rejeitos (REZENDE; COSTA; BOTELHO, 2011).

Ainda segundo Rezende, Costa e Botelho (2011), o uso de matrizes termoplásticas não evoluiu como o esperado. Como causa principal que impediu tal desenvolvimento deve-se citar o estabelecimento de processos de conformação com custos competitivos e adequados a estes materiais que exigem altas temperaturas de processamento (300°C a 400°C).

No Quadro 1 são apresentadas as principais características dos tipos de matriz e reforço que são utilizadas como critério para seleção de materiais para determinada aplicação.

Quadro 1 – Seleção dos materiais conforme a natureza das solicitações.

Solicitações	Escolha dos materiais	Área de utilização
Rigidez	Natureza do reforço	Rigidez baixa = vidro Rigidez media = aramida Rigidez alta = carbono
Esforços	Natureza do esforço	Baixa e média solicitação = vidro Alta solicitação = carbono Alta resistência ao impacto = aramida
Inflamabilidade	Natureza do polímero e fibra	Resina epóxi: atende aos requisitos de inflamabilidade Resina fenólica: atende aos requisitos de inflamabilidade, emissão de calor e fumaça Fibras de vidro e carbono: atendem aos requisitos de contenção de chama Fibra de aramida: não atende aos requisitos de contenção de chama

Fonte: Adaptado de Rezende, Costa e Botelho (2011).

Akkaş (2018) destaca que resinas termorrígidas realizam reações químicas irreversíveis durante a cura. Nesta fase são formadas longas cadeias moleculares que garantem resistência e rigidez a matriz. Quando são aquecidas acima da temperatura de transição vítrea, suas propriedades mecânicas pioram.

Resinas epóxi termorrígidas têm sido aplicadas em vários tipos de indústrias incluindo a aeroespacial, automotiva, e de eletrônicos. Essa gama de aplicações é alta devido às propriedades termomecânicas favoráveis destas resinas e seu fácil processamento. Por possuírem alta resistência, epóxios termorrígidos são extensivamente usados como material matriz para compósitos de fibra de carbono de alto desempenho. As propriedades termomecânicas das resinas dependem fortemente da estrutura do polímero formado durante a cura, quando um aumento nos últimos graus de cura acarreta no aumento do módulo e da temperatura de transição vítrea (ESTRIDGE, 2018, tradução nossa).

2.2.2 Laminados

A fabricação de compósitos laminados de alto desempenho de matriz polimérica com fibras contínuas, de acordo com Chung (2010), comumente envolve laminas de *prepreg*. *Prepreg* é uma lamina de fibras contínuas orientadas que foram impregnadas com o polímero

ou seu precursor. Um exemplo de polímero precursor é a resina epóxi, que depois de curada (geralmente sob pressão e alta temperatura) forma o polímero epóxi, termorrígido. Neste caso, o *pregreg* é flexível e possui *tack* enquanto a resina não for curada. Para aumentar a validade de um *pregreg*, o *pregreg* é usualmente estocado em um *freezer*, cuja baixa temperatura ajuda a retardar o processo de cura da resina.

Os pré-impregnados de matrizes termorrígidas devem ter um *tack* adequado para permitir geometrias mais complexas sejam laminada. Em geral, o *tack* pode ser definido como uma ligação incompleta formada com baixa pressão de contato durante um curto período de tempo.

A lâmina obtida é muito resistente e tenaz na direção paralela às fibras, podendo apresentar-se como um material muito útil em duas direções, isto é, no plano da lâmina. As lâminas podem ser empilhadas umas sobre as outras, nas condições de manter as fibras paralelas ou em diferentes direções, em função do desejável para o artefato final. Assim, a proporção de fibras nas diferentes direções é variável. Quando isso é feito, o compósito de fibras retém algumas vantagens, com o sacrifício do máximo da sua propriedade, quando comparado com o compósito obtido com as fibras em uma única direção (REZENDE; COSTA; BOTELHO, 2011).

2.2.3 Processamento

Segundo Valsiliev e Morozov (2001), um grande número de métodos foi desenvolvido até hoje para a manufatura de compósitos estruturais, dois processos durante os quais as micro e macroestrutura do material são formadas são comuns para todos eles. Sendo um meio heterogêneo, o material compósito possui dois níveis de heterogeneidade. O primeiro nível representa a microheterogeneidade induzida por pelo menos duas fases (fibra e matriz) que formam a microestrutura do material. No segundo nível o material é caracterizado pela microheterogeneidade causada pelo laminado ou microestruturas mais complexas do material que consistem, geralmente, de camadas com diferentes orientações.

Pode-se classificar o processamento de compósitos basicamente de duas maneiras: pelo tipo de matriz a ser utilizada (poliméricas, cerâmicas e metálicas), ou pelo tipo de processo utilizado para obtenção do compósito, ou seja, processamento via fase líquida, via fase gasosa ou via partícula sólida. Por exemplo, nos processos de moldagem via fase líquida (moldagem por transferência de resina, injeção, etc.), a matriz apresenta-se líquida durante a fase de

moldagem, sendo posteriormente submetida ao processo de consolidação e cura, após o qual o material adquire a forma final do componente. Nos processos de moldagem via fase gasosa, o material formador da matriz, na forma gasosa, deposita-se continuamente no reforço. A seleção do processo de manufatura para produção de um componente em compósito deve considerar principalmente o tamanho e geometria da peça, a microestrutura desejada, incluindo o tipo de reforço e matriz, o desempenho e a avaliação mercadológica (LEVY; PARDINI, 2006).

Quando os processos de manufatura são considerados, pode-se dizer que eles diferem em sua natureza quando comparados às técnicas de produção tradicionais. Ao contrário da tradicional abordagem de remoção de material aplicada em metais, a manufatura de compósitos depende da produção “aditiva”. Por essa razão, cada método requer molde ou mandril que é responsável por dar forma ao produto. Em cada método de produção, o material de reforço é impregnado de alguma maneira com a matriz, e a consolidação é obtida pelo processo de cura (AKKAŞ, 2018, tradução nossa).

As diferenças nos processos de fabricação de compósitos poliméricos se devem aos processos de transformação físico-química a que são sujeitas as matrizes durante a fase de moldagem. Por exemplo, as matrizes poliméricas termorrígidas são submetidas a um processo físico-químico de cura, enquanto as matrizes termoplásticas passam por estágios em que são submetidas ao amolecimento e fusão, iniciais, para conformação na cavidade do molde e posterior solidificação (LEVY; PARDINI, 2006).

2.2.4 Defeitos na furação

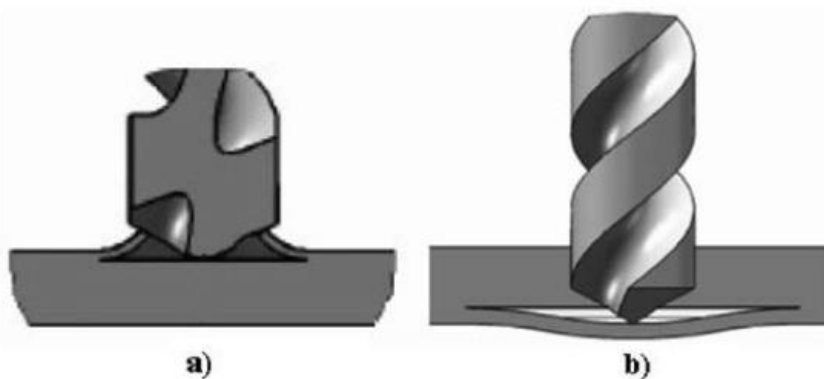
Apesar das vantagens dos materiais compósitos, as quais motivam a sua utilização na indústria aeroespacial, esta classe de materiais tem como desvantagem a susceptibilidade aos danos, em comparação com os metais, o que degrada muito a sua integridade estrutural. Os danos podem ocorrer durante o processamento da matéria prima, fabricação da peça, manuseio, transporte, armazenagem, manutenção ou em serviço (REZENDE; COSTA; BOTELHO, 2011).

Os defeitos mais frequentes são a delaminação à entrada e/ou à saída, as fissuras interlaminares, o descolamento fibra/matriz e alterações térmicas. De referir, ainda, o desgaste excessivo das ferramentas, causando a sua substituição mais frequente. De todos estes problemas, o mais grave é a delaminação. Este tipo de defeito tem maior tendência a verificar-se nas regiões interlaminares, isto é, na transição entre duas camadas adjacentes, pelo que se

pode considerar que é um defeito dependente não só da natureza das fibras, mas igualmente do tipo de matriz/resina e respectivas propriedades aglomerantes. As tensões térmicas que se desenvolvem durante a furação, ao provocarem um certo amaciamento da matriz, também podem facilitar a ocorrência de delaminação (DURÃO et al., 2008)

Este defeito afecta as propriedades mecânicas da placa à volta da zona de ligação e põem em risco a fiabilidade dos componentes, tal como a diminuição de resistência à fadiga. Existem dois tipos de delaminação que podem ocorrer durante a operação de furação. Se o dano ocorre no momento de início do contacto entre a broca e a placa, temos a delaminação à entrada ou *peel-up* (Figura 9.a), em que o material tende a ser puxado para cima ao longo das espiras da broca em vez de ser cortado. Se o dano ocorre quando a ponta da broca se aproxima da extremidade oposta, ocorre a delaminação à saída ou *push-down* (Figura 9.b). Devido à força compressiva, exercida pela ponta da broca as camadas tendem a ser empurradas para o lado oposto da placa provocando a separação entre camadas adjacentes (GONÇALVES et al., 2011).

Figura 10 - Delaminação (a) na entrada *peel-up*; (b) na saída *push-down*.



Fonte: Gonçalves et al. (2011).

O efeito do uso de diferentes tipos de reforço (tecido, fibra contínua, descontínua, *cross-winding*) e os parâmetros da usinagem na delaminação durante a furação tem sido investigado em compósitos laminados. O aumento da delaminação é observado com o aumento da taxa de avanço da ferramenta e com a diminuição da rotação. Também se observa que no lado de saída da ferramenta a delaminação é maior que no de entrada (RAHAMATHULLAH; SHUNMUGAM, 2013, tradução nossa).

O desgaste das ferramentas é consequência da natureza abrasiva destes materiais e da sua baixa condutividade térmica causando um maior aquecimento da ferramenta. O

arrancamento das fibras ocorre ao longo da parede do furo e caracteriza-se pela existência de fibras arrancadas pelas arestas cortantes da broca, durante a execução do furo (DURÃO et al., 2008).

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Com o intuito de analisar qualitativamente e quantitativamente o processo de furação em materiais compósitos foram realizados ensaios em várias placas, variando-se o avanço da ferramenta e a rotação da máquina. Foram colhidos dados referentes à potência, força e vibração para análise estatística.

3.1 PREPARAÇÃO DAS PLACAS

Para realização dos ensaios de furação foram utilizadas 18 placas do compósito de fibra de carbono com matriz termoplástica (PPS). Foram usinadas placas pequenas do material. As placas foram devidamente numeradas com faces identificadas para dar prosseguimento aos ensaios.

3.2 REALIZAÇÃO DOS ENSAIOS

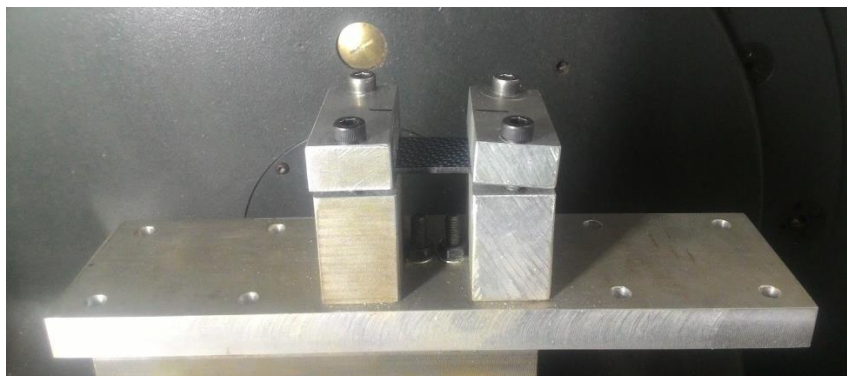
A furação foi realizada no centro de usinagem DMG DMU 50 ECO (Fotografia 1), localizada no Laboratório de Estudo da Usinagem do Departamento de Materiais e Tecnologia da universidade. Foi utilizada uma broca helicoidal de metal duro OSG MD Ø 4,2mm com três canais. Além disso, o sistema de fixação é mostrado na Fotografia 2.

Figura 11 – Centro de usinagem DMG.



Fonte: Produção do próprio autor.

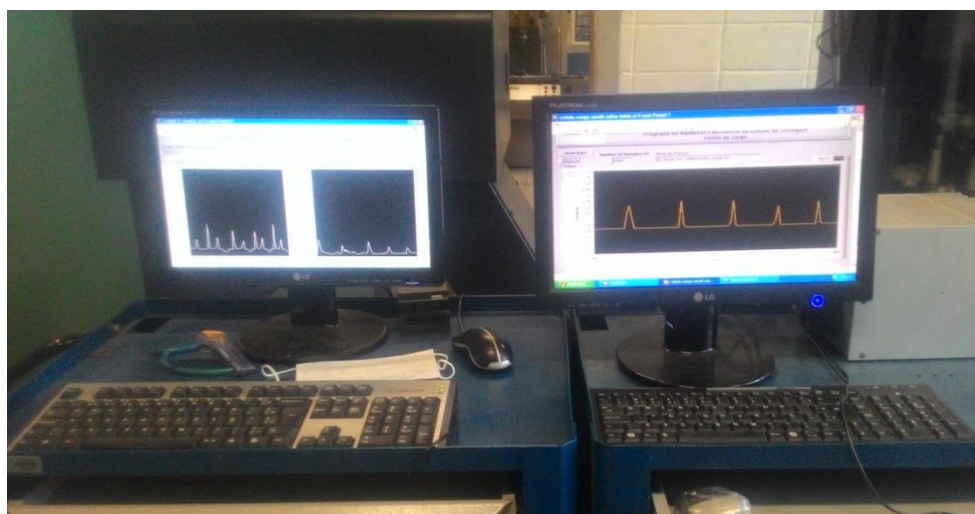
Figura 12 – Sistema de fixação.



Fonte: Produção do próprio autor.

Para a aquisição de dados referentes à potência, força e vibração foram utilizados dois computadores ligados a dispositivos da máquina (Fotografia 3). Para coleta dos dados referentes à vibração foi utilizado um transmissor de vibração VIBROCONTROL (Fotografia 4).

Figura 13 – Sistema de aquisição de dados.



Fonte: Produção do próprio autor.

Figura 14 – Transmissor de vibração.



Fonte: Produção do próprio autor.

O avanço da ferramenta, dado em [mm/rot] e a rotação da máquina, dada em [rpm] foram os parâmetros de controle do processo. A variação dos parâmetros e a sequência dos ensaios são mostradas na Tabela 1.

Quadro 2 – Parâmetros de ensaio.

CDP	Rotação [rpm]	Avanço [mm/rot]
1	7500	0,02
2	7500	0,02
3	7500	0,06
4	7500	0,06
5	7500	0,1
6	7500	0,1
7	5500	0,02
8	5500	0,02
9	5500	0,06
10	5500	0,06
11	5500	0,1
12	5500	0,1
13	3500	0,02
14	3500	0,02
15	3500	0,06
16	3500	0,06
17	3500	0,1
18	3500	0,1

Fonte: Produção do próprio autor.

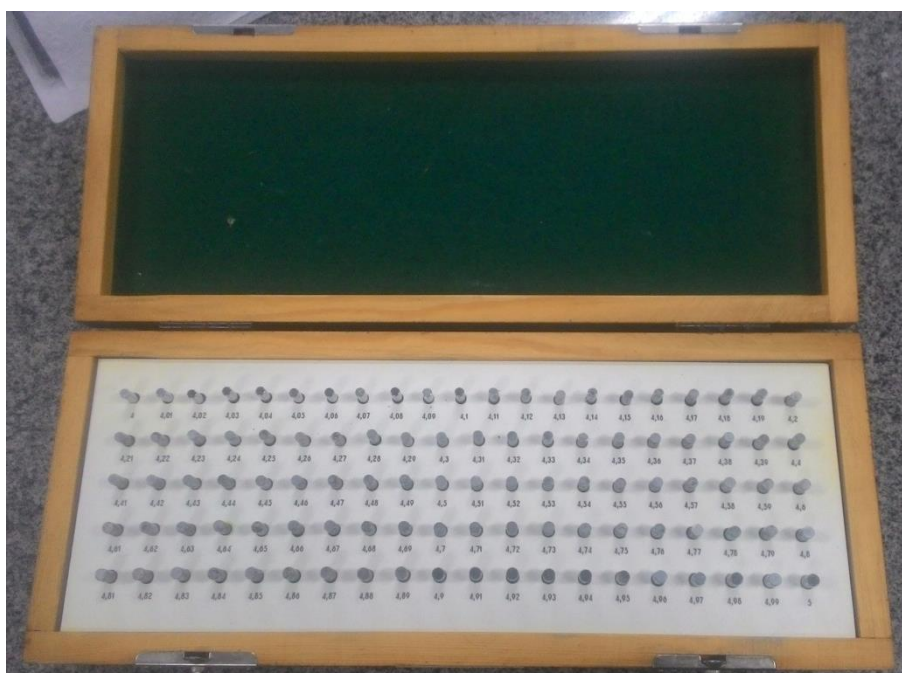
3.3 INSTRUMENTOS DE ANÁLISE

Os dados colhidos referentes à potência, força e vibração foram tratados estatisticamente nos *softwares* MINITAB e MATLAB para posterior análise dos gráficos obtidos.

As placas de material compósito, depois de furadas, foram submetidas à análise no Microscópio Eletrônico de Varredura de Emissão de Campo (MEV-FEG) JEOL, pertencente ao Laboratório Associado de Sensores e Materiais do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) para verificação de danos no compósito. O mesmo microscópio também foi utilizado para analisar o desgaste da broca helicoidal após os ensaios.

Para medir o diâmetro interno dos furos na entrada e na saída da broca foi utilizado o método de medição por comparação com pinos padrão de 4,00 a 5,00 mm mostrados na Fotografia 5. As medições também foram analisadas estatisticamente pelo uso do MINITAB.

Figura 15 – Pinos padrão de 4,00 a 5,00mm.



Fonte: Produção do próprio autor.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste capítulo serão apresentadas as análises pertinentes ao trabalho realizado. Primeiramente serão analisados os resultados referentes às variáveis de controle da usinagem, utilizando-se de ferramentas estatísticas para tal, bem como na análise dos diâmetros dos corpos de prova na entrada e na saída da broca. Posteriormente, será realizada uma análise qualitativa dos furos, de maneira a encontrar os melhores valores para os parâmetros da operação. Por último, será analisado o desgaste da ferramenta após a realização dos dezoito furos nas placas de compósito.

4.1 ANALISE ESTATÍSTICA

Para realizar a análise estatística foi utilizada a ferramenta de análise de variância com a qual é possível obter resultados referentes à interferência de cada um dos parâmetros de usinagem – avanço e rotação – nas variáveis analisadas – potência, força e vibração. Serão colocadas primeiramente as interferências separadamente e, posteriormente, a interação de ambas com cada variável.

O valor-p, chamado de probabilidade de significância, será o valor utilizado nas análises. Sendo que para um valor-p menor ou igual a 5%, infere-se que houve interferência da variável no parâmetro analisado e, caso este seja maior que 5%, que a variação dos resultados não sofreu interferência.

4.1.1 Potência, Força e Vibração

Os resultados coletados dos ensaios para Potência Máxima (W), Vibração Máxima (mm/s) e Força Máxima (kgf), apresentados na Tabela 1, serão analisados estatisticamente a seguir.

Tabela 1 – Resultados do ensaio para força, potência e vibração.

CDP	Potência Máxima (W)	Força Máxima (kgf)	Vibração Máxima (mm/s)
1	560,18	2,57	3,03
2	558,34	4,38	3,28
3	557,41	6,96	3,15
4	557,41	6,36	3,06
5	557,41	6,72	3,12
6	556,49	4,35	3,03
7	576,38	3,43	2,95
8	558,34	3,49	2,85
9	558,34	7,68	3,05
10	558,34	7,52	3,12
11	537,12	8,27	2,95
12	536,19	8,57	3,09
13	570,23	4,38	3,08
14	570,23	4,32	3,00
15	556,49	7,76	3,03
16	540,81	7,73	3,03
17	555,57	9,97	2,85
18	558,34	10,17	3,19

Fonte: Produção do próprio autor.

4.1.1.1 Potência máxima

Na Potência Máxima, pela análise do valor-p (Tabela 2), tem-se como resultado que o valor da rotação de maneira independente não interfere na variação dos valores de potência máxima, e que o avanço da ferramenta interfere significativamente, mais que a interação de ambos os parâmetros.

Tabela 2 – Valor-p para potência máxima.

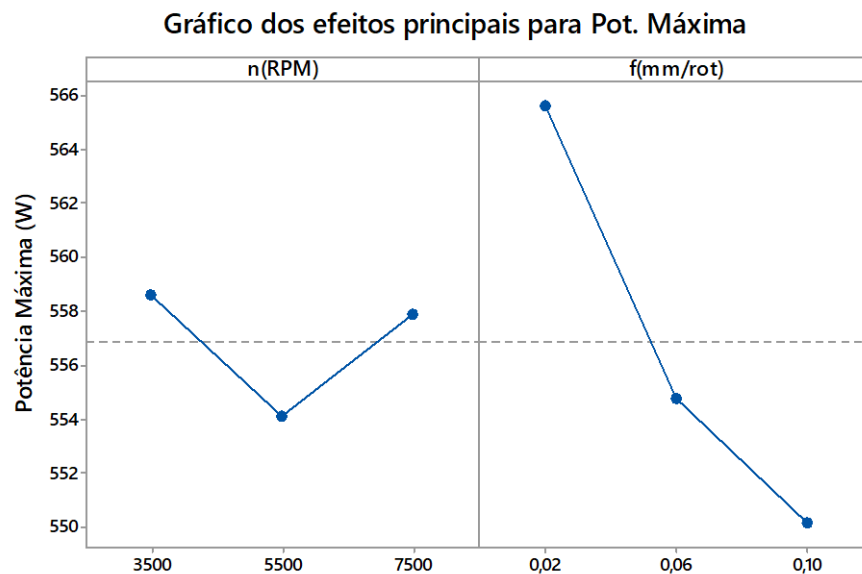
Parâmetro	Valor-p (%)
n [rpm]	34,0
f [mm/rot]	0,3
n [rpm]* f [mm/rot]	1,3

Fonte: Produção do próprio autor.

Pelo Gráfico 1, observa-se a tendência de interferência do avanço na potência máxima que, conforme os valores de rotação aumentam, diminui. Tal tendência difere do esperado

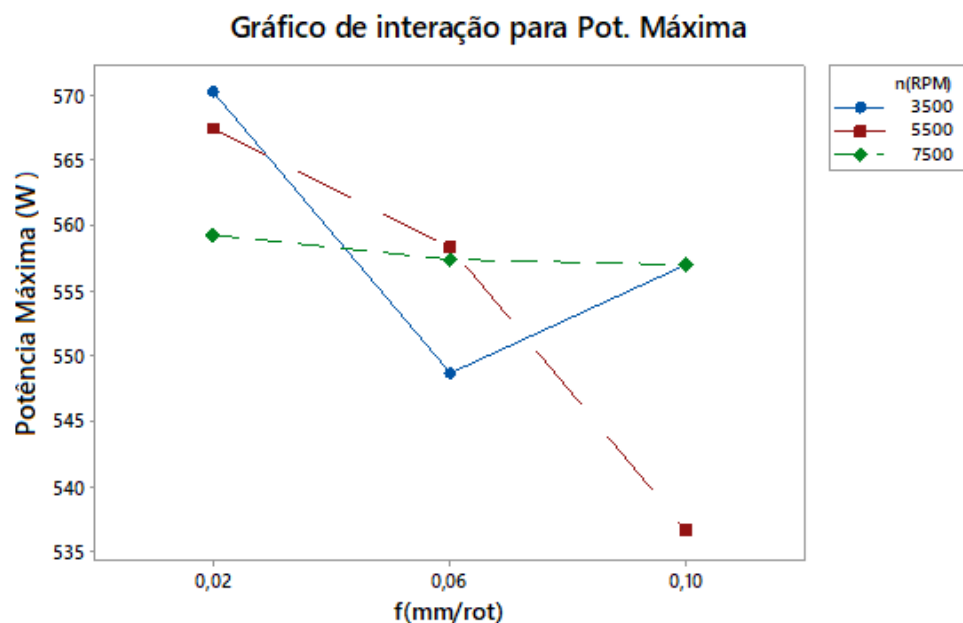
pela literatura, o que pode ser explicado pelo fato de que, durante o processo de usinagem, a matriz do compósito atinge temperaturas elevadas o suficiente para se tornar um líquido viscoso, alterando as características do processo. No Gráfico 2 a tendência apresentada na interação dos dois parâmetros é a mesma, pelo fato de que a interferência do avanço é alta o suficiente para compensar a não interferência da rotação.

Gráfico 1 – Efeitos principais para potência máxima.



Fonte: Produção do próprio autor.

Gráfico 2 – Interação para potência máxima.



Fonte: Produção do próprio autor.

4.1.1.2 Força máxima

Na Força Máxima, pela análise do valor-p (Tabela 3), tem-se como resultado que o valor da rotação e do avanço, de maneira independente, interfere significativamente na variação dos valores de potência máxima, assim como a interação entre os dois parâmetros.

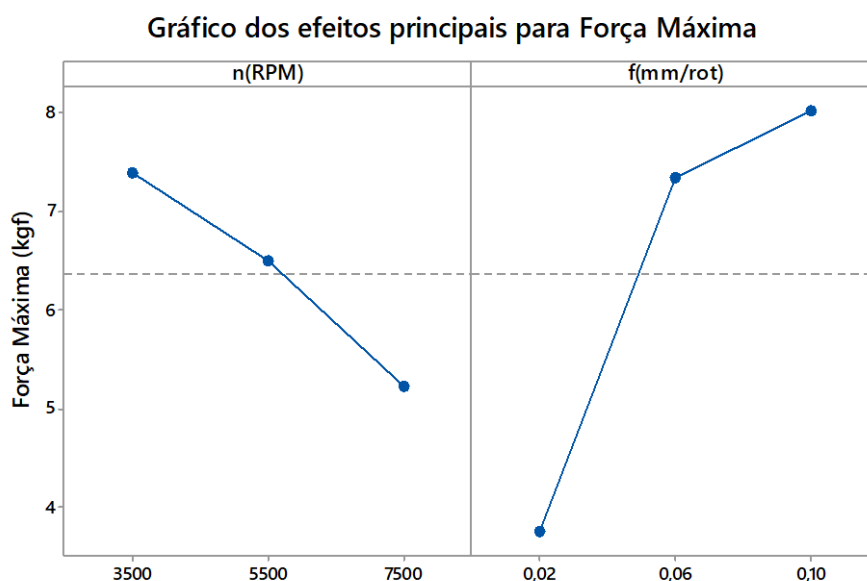
Tabela 3 – Valor-p para força máxima.

Parâmetro	Valor-p (%)
n [rpm]	0,4
f [mm/rot]	0,0
n [rpm]* f [mm/rot]	4,6

Fonte: Produção do próprio autor.

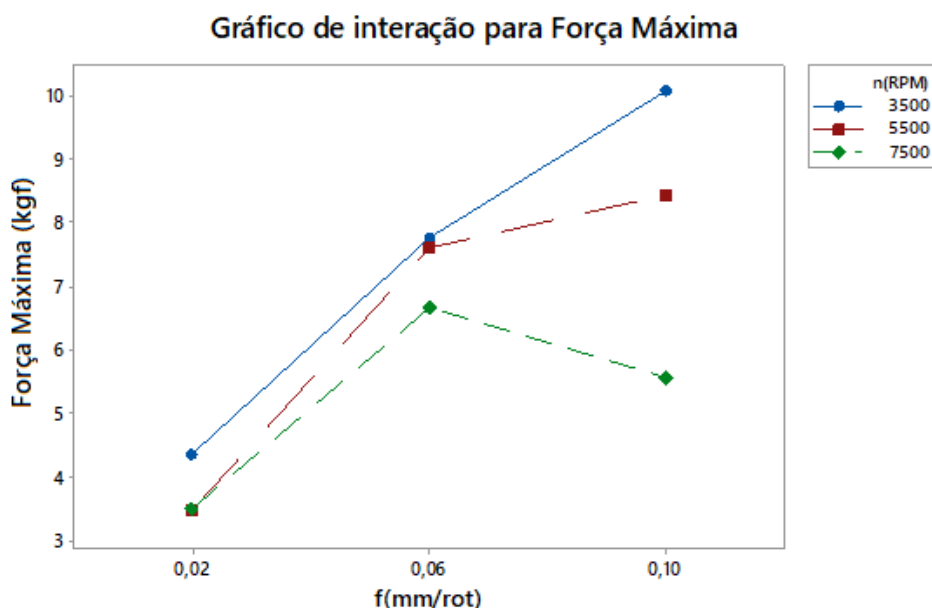
Pelo Gráfico 3, observa-se a tendência de interferência da rotação na força máxima que, conforme os valores de rotação aumentam, diminui. O aumento do avanço, por outro lado, causa o aumento da força máxima. Tais tendências talvez possam ser explicadas pelo fato de que o aumento na rotação da ferramenta ocasiona a diminuição da força necessária para a usinagem, enquanto o aumento do avanço dificulta a usinagem e leva ao aumento da força máxima necessária. Quando se analisa a interação dos dois fatores (Gráfico 4), observa-se a confirmação do que foi analisado anteriormente pela ação dos parâmetros isolados.

Gráfico 3 – Efeitos principais para força máxima.



Fonte: Produção do próprio autor.

Gráfico 4 – Interação para força máxima.



Fonte: Produção do próprio autor.

4.1.1.3 Vibração máxima

Na Vibração Máxima, pela análise do valor-p (Tabela 4), é possível inferir que nenhum dos parâmetros interfere nas vibrações do sistema durante a operação de usinagem, nem isoladamente, nem quando considerada sua interação. Os resultados podem ter sido alterados pelo sistema de fixação, que ao ser ajustado manualmente pelo operador – analisando o torque nos parafusos de fixação – em cada ensaio, possivelmente interferiu nos resultados obtidos.

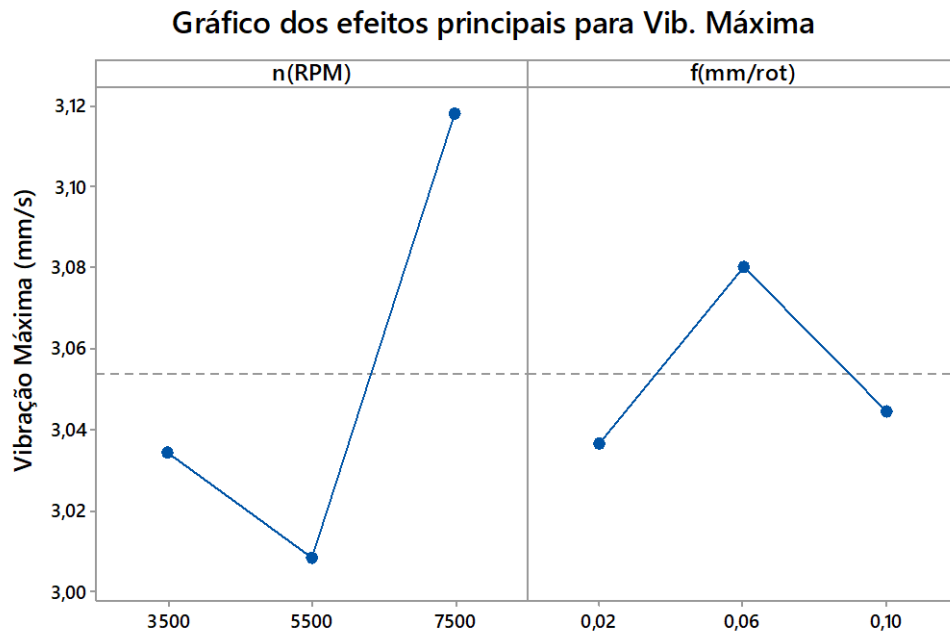
Tabela 4 – Valor-p para vibração máxima.

Parâmetro	Valor-p (%)
n [rpm]	28,0
f [mm/rot]	78,7
n [rpm]* f [mm/rot]	63,4

Fonte: Produção do próprio autor.

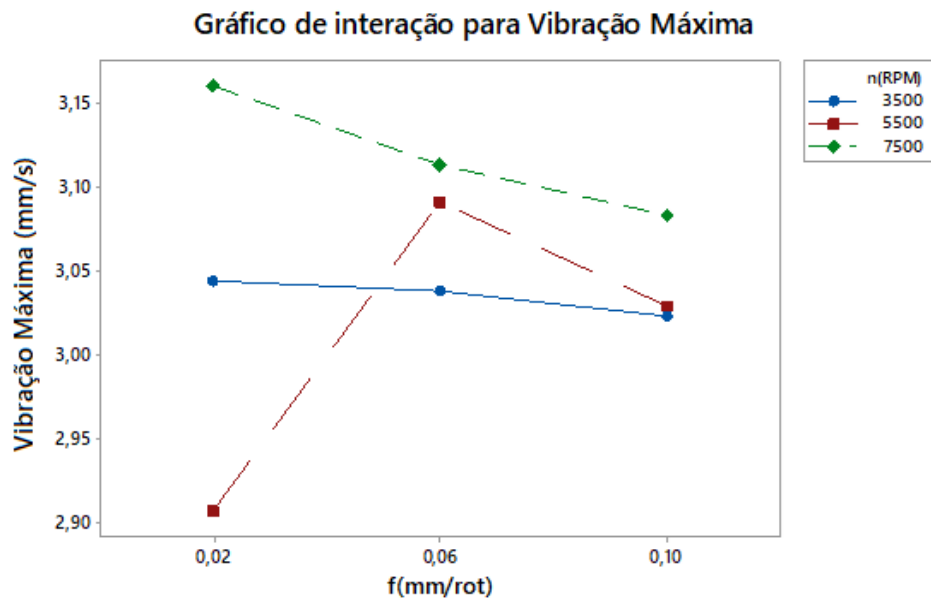
Pelos Gráficos 5 e 6 não é possível observar nenhuma tendência de interferência dos valores de rotação e avanço da ferramenta e na vibração durante o processo.

Gráfico 5 – Efeitos principais para vibração máxima.



Fonte: Produção do próprio autor.

Gráfico 6 – Interação para vibração máxima.



Fonte: Produção do próprio autor.

4.1.2 Análise Diametral

Os resultados das medições dos diâmetros dos furos na entrada e saída da broca são apresentados na Tabela 5, considerando-se o diâmetro ideal do furo como sendo 4,2mm para o cálculo dos deltas de entrada e saída.

Tabela 5 – Diâmetros medidos nas faces de entrada e saída da broca.

CDP	$\varnothing_{\text{entrada}}$ [mm]	$\varnothing_{\text{saída}}$ [mm]	Δ_{entrada} [mm]	$\Delta_{\text{saída}}$ [mm]
1	4,56	4,26	0,36	0,06
2	4,57	4,35	0,37	0,15
3	4,41	4,44	0,21	0,24
4	4,41	4,42	0,21	0,22
5	4,23	4,23	0,03	0,03
6	4,35	4,38	0,15	0,18
7	4,60	4,24	0,40	0,04
8	4,54	4,55	0,34	0,35
9	4,61	4,52	0,41	0,32
10	4,42	4,46	0,22	0,26
11	4,22	4,20	0,02	0,00
12	4,29	4,29	0,09	0,09
13	4,51	4,24	0,31	0,04
14	4,52	4,31	0,32	0,11
15	4,41	4,39	0,21	0,19
16	4,48	4,45	0,28	0,25
17	4,43	4,29	0,23	0,09
18	4,42	4,29	0,22	0,09

Fonte: Produção do próprio autor.

4.1.2.1 Diâmetro de entrada

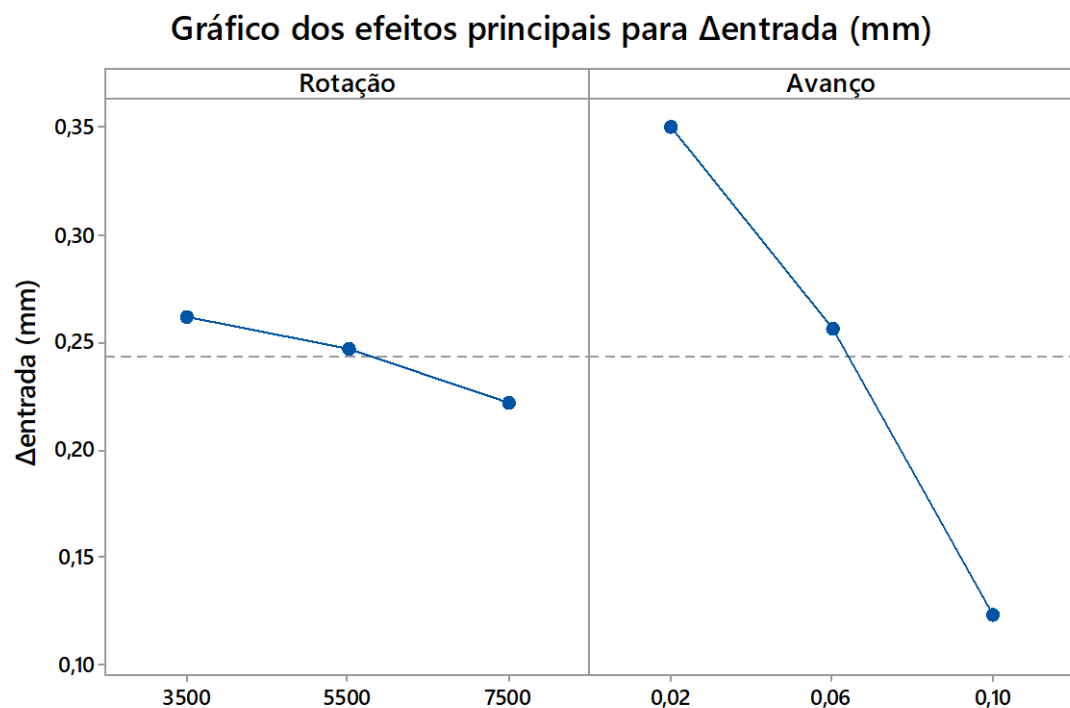
Os resultados encontrados para o Valor-p (Tabela 6) no diâmetro da face de entrada da broca, mostram que apenas o avanço teve interferência significativa nas medições. Rotação e interação entre Avanço e Rotação, não apresentaram interferência.

Tabela 6 – Valor-p para Δ_{entrada} .

Parâmetro	Valor-p (%)
n [rpm]	56,6%
f [mm/rot]	0,1%
n [rpm]* f [mm/rot]	11,2%

Fonte: Produção do próprio autor.

O gráfico dos efeitos principais para o diâmetro de entrada evidencia que quanto maior o avanço, menor a variação do diâmetro do furo em relação ao diâmetro nominal da broca (4,2mm).

Gráfico 7 – Efeitos principais para Δ_{entrada} .

Fonte: Produção do próprio autor.

Para melhor analisar a interferência do avanço no resultado obtido na furação, foi realizado o teste de Tukey, que possibilita avaliar quais diferenças de valores de avanço resultaram em variações no diâmetro. Pelo agrupamento mostrado na Tabela 7 os avanços 0,06-0,02 foram incluídos no mesmo grupo o que significa que, para um nível de significância de 5%, a hipótese de igualdade nas médias do diâmetro para estes avanços não pode ser

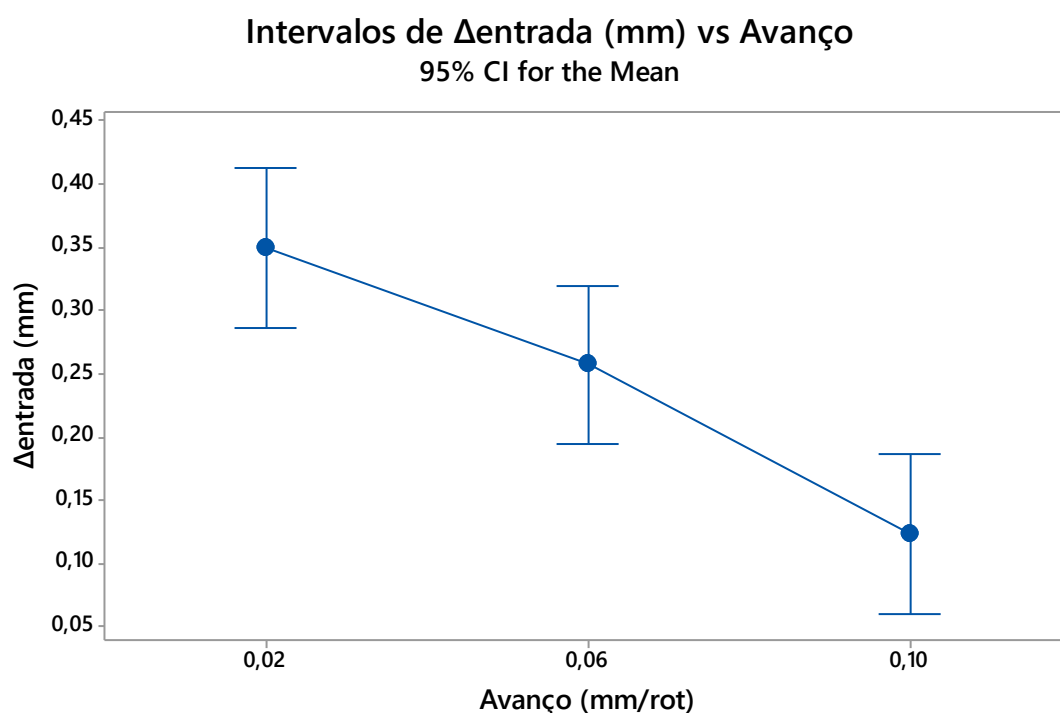
rejeitada – vide Gráfico 8. Portanto, para 0,06-0,10 e 0,02-0,10 a hipótese de igualdade nas médias é rejeitada, havendo assim uma diferença no diâmetro o furo nestes casos.

Tabela 7 – Teste Tukey para Δ_{entrada} x Avanço.

Avanço [mm]	Grupo
0,02	A
0,06	A
0,10	B

Fonte: Produção do próprio autor.

Gráfico 8 – Intervalos para Δ_{entrada} x Avanço.



Fonte: Produção do próprio autor.

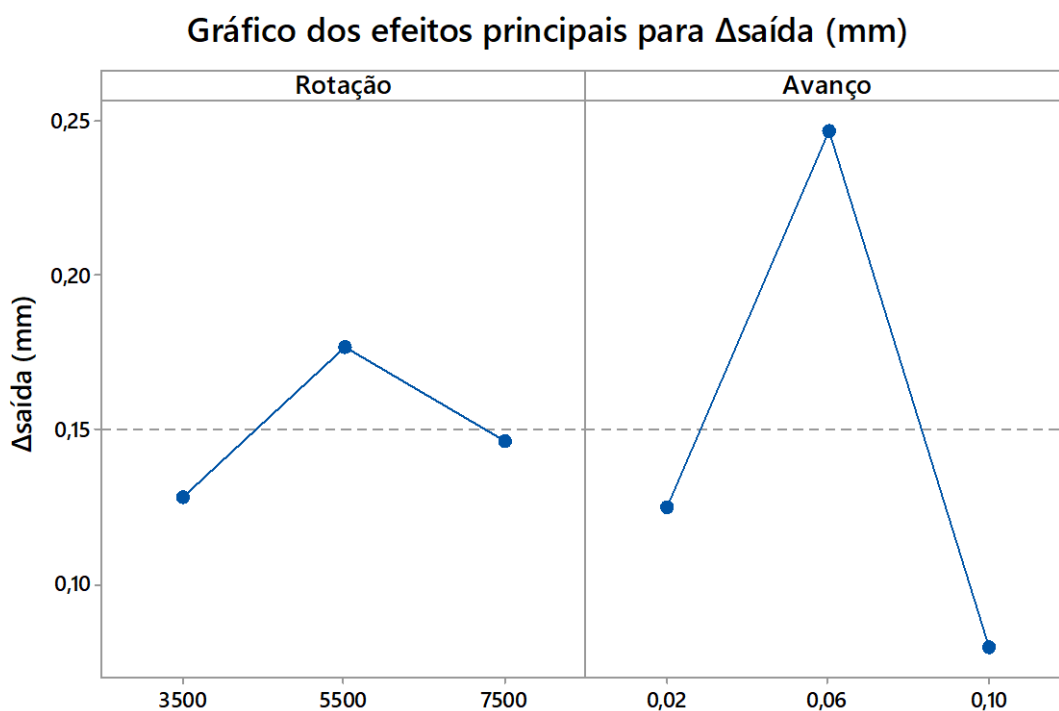
4.1.2.2 Diâmetro de saída

Assim como observado nas análises do diâmetro da face de entrada da broca, as análises da face de saída da broca, coerentemente, apresentam pelo Valor-p (Tabela 8) que apenas o avanço da ferramenta interfere no resultado encontrado, sendo que neste caso não é possível observar (Gráfico 8) nenhuma tendência como no caso anterior.

Tabela 8 – Valor-p para $\Delta_{saída}$.

Parâmetro	Valor-p (%)
n [rpm]	56,9%
f [mm/rot]	1,4%
n [rpm]* f [mm/rot]	57,6%

Fonte: Produção do próprio autor.

Gráfico 9 – Efeitos principais para $\Delta_{saída}$.

Fonte: Produção do próprio autor.

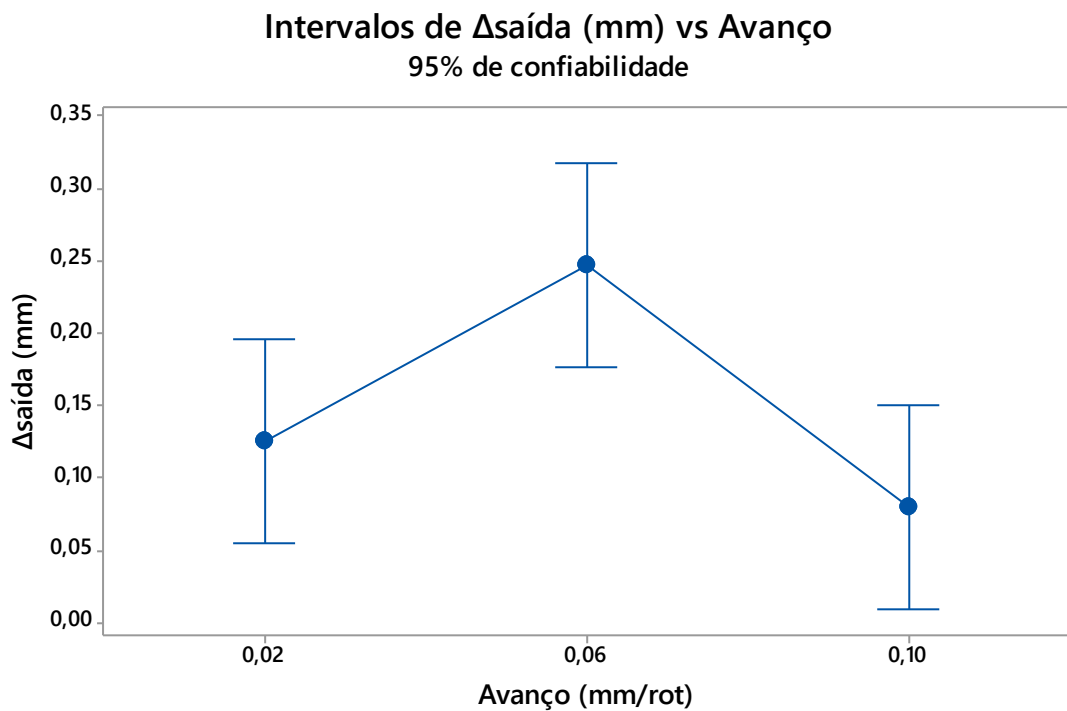
O teste de Tukey foi realizado para avaliar a interferência dos valores do parâmetro de avanço da ferramenta no diâmetro de saída da broca, idem ao processo realizado para o diâmetro de entrada da ferramenta.

O agrupamento neste caso mostra pela Tabela 9 que o valor de 0,06 está separado dos demais. Assim, para um nível de significância de 5%, a hipótese de igualdade entre as médias dos valores de diâmetro do furo para 0,02-0,10 não pode ser rejeitada. Havendo, neste caso, a rejeição da hipótese e, conseqüentemente, diferença entre as médias de diâmetros para 0,02-0,06 e 0,06-0,10.

Tabela 9 – Teste Tukey para $\Delta_{saída}$ x Avanço.

Avanço [mm]	Grupo
0,02	B
0,06	A
0,10	B

Fonte: Produção do próprio autor.

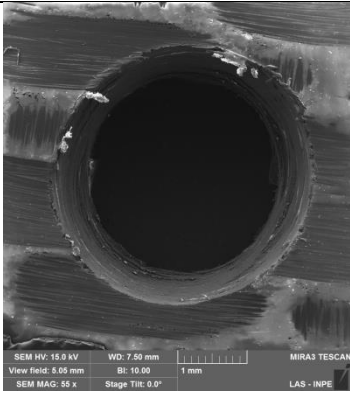
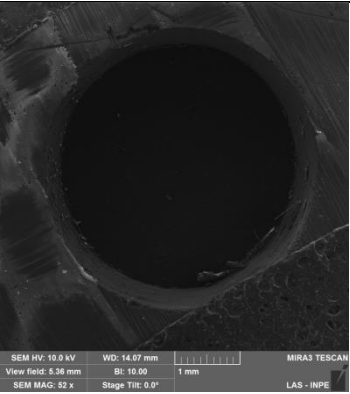
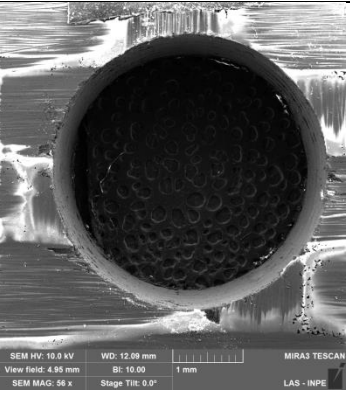
Gráfico 10 – Intervalos para $\Delta_{saída}$ x Avanço.

Fonte: Produção do próprio autor.

4.2 ANÁLISE DA DELAMINAÇÃO

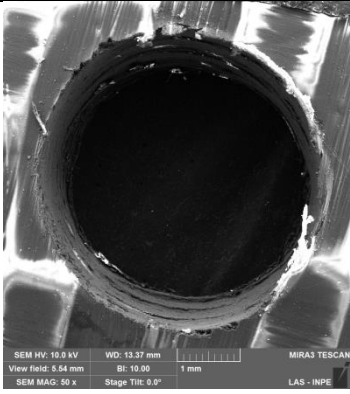
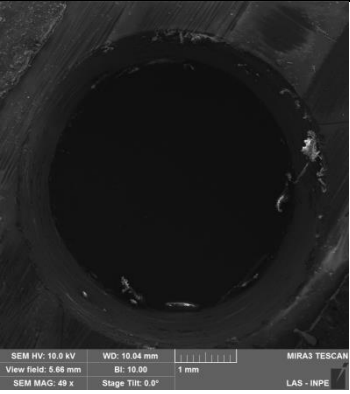
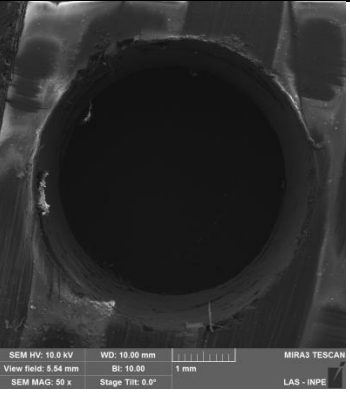
Foram feitas imagens de todos os dezoito corpos de prova com aumentos de 50x, 200x e 1000x para cada um, com a finalidade de analisar qualitativamente o processo de furação no compósito. Para efeitos de análise serão colocadas neste trabalho apenas as imagens relevantes, que contribuam com o desenvolvimento do mesmo. As Tabelas 10, 11 e 12 mostram imagens de 50x de aumento para cada combinação de parâmetros utilizada – os ensaios tiveram repetitividade de 2 vezes.

Tabela 10 – Imagens (50x) dos CDP's 1, 4 e 6.

CDP	1	4	6
Rotação [rpm]	7500	7500	7500
Avanço [mm/rot]	0,02	0,06	0,10
Imagem (50x)			

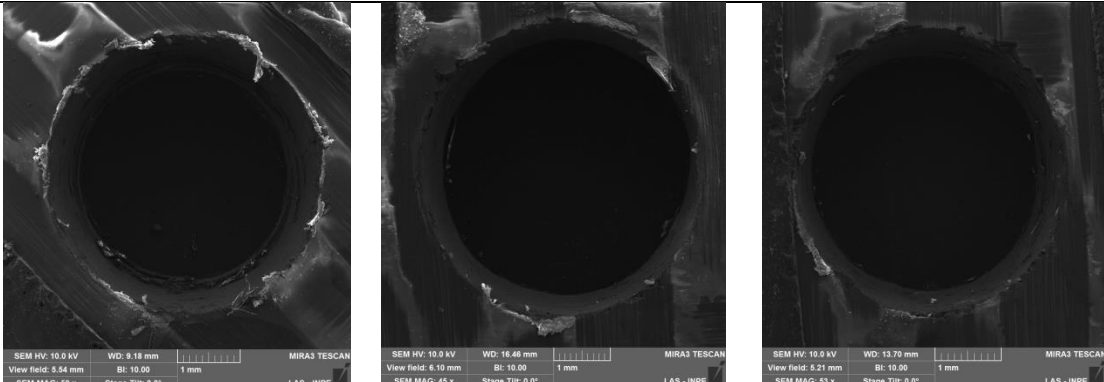
Fonte: Produção do próprio autor.

Tabela 11 - Imagens (50x) dos CDP's 7, 10 e 12.

CDP	7	10	12
Rotação [rpm]	5500	5500	5500
Avanço [mm/rot]	0,02	0,06	0,10
Imagem (50x)			

Fonte: Produção do próprio autor.

Tabela 12 - Imagens (50x) dos CDP's 13, 16 e 17.

CDP	13	16	17
Rotação [rpm]	3500	3500	3500
Avanço [mm/rot]	0,02	0,06	0,10
Imagem (50x)			

Fonte: Produção do próprio autor.

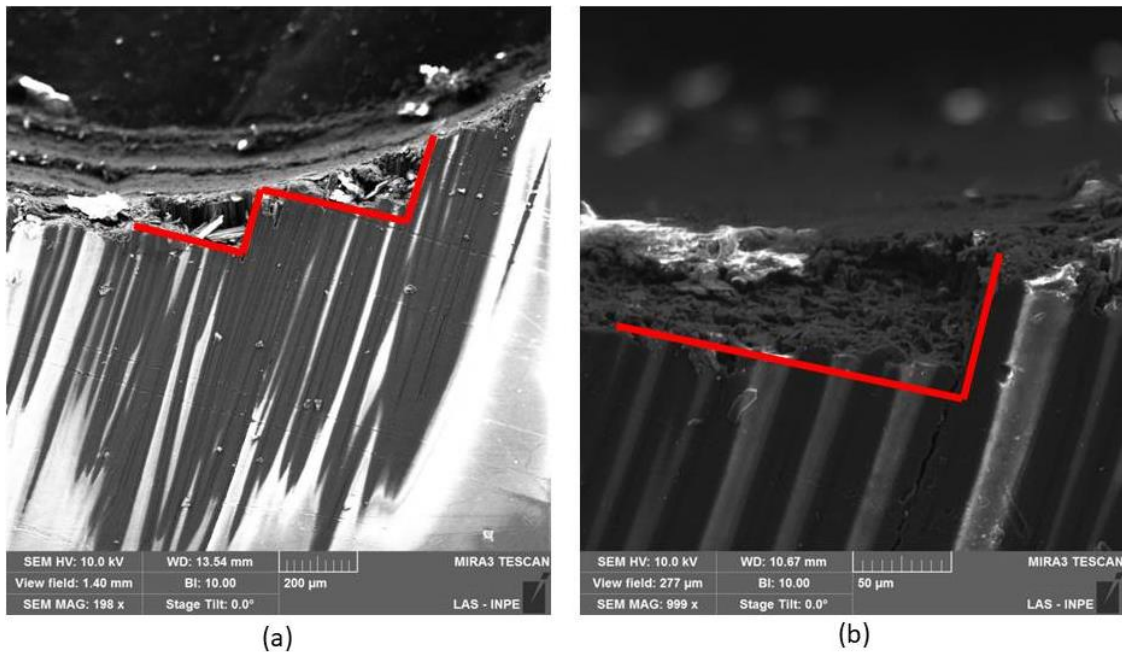
Antes de analisar as imagens apresentadas nas Tabelas 10, 11 e 12 é importante ressaltar que, a olho nu, nenhum dos corpos de prova apresentou avarias ou danos mais severos, sendo que para analisar os danos apresentados foi necessário fazer uso de imagens aumentadas. Observando as imagens inicialmente apresentadas, pode-se avaliar que os furos nos quais foi utilizado o avanço de 0,10 mm/rot apresentaram delaminações superficiais mais evidentes que serão vistos em detalhes posteriormente. Em alguns CDP's – 1, 7, 12, 16 e 17 – é possível observar a presença de furos ovalizados – avaliação feita visualmente, análise mais criteriosa pode identificar mais CDP's com o problema – indesejáveis a aplicações em que são especificadas baixas tolerâncias dimensionais, como em peças críticas. Não há um padrão na ovalização dos furos, podendo ser este um problema inerente à ferramenta utilizada no processo.

4.2.1 Delaminação superficial

Alguns corpos de prova apresentaram delaminação superficial maior, que poderia ser considerada um defeito. Porém a maioria destes apresentou características de delaminação em comum. Ambas serão analisadas a seguir.

Com imagens de maior aumento (200x e 1000x) foi observado o que poderia ser um padrão de delaminação no compósito para este processo de furação. A delaminação é superficial – não é possível mensurar quantas camadas abrange – e apresenta cantos vivos bem definidos em sequência, formando uma figura próxima a de uma “escada” como é possível observar na Figura 16.

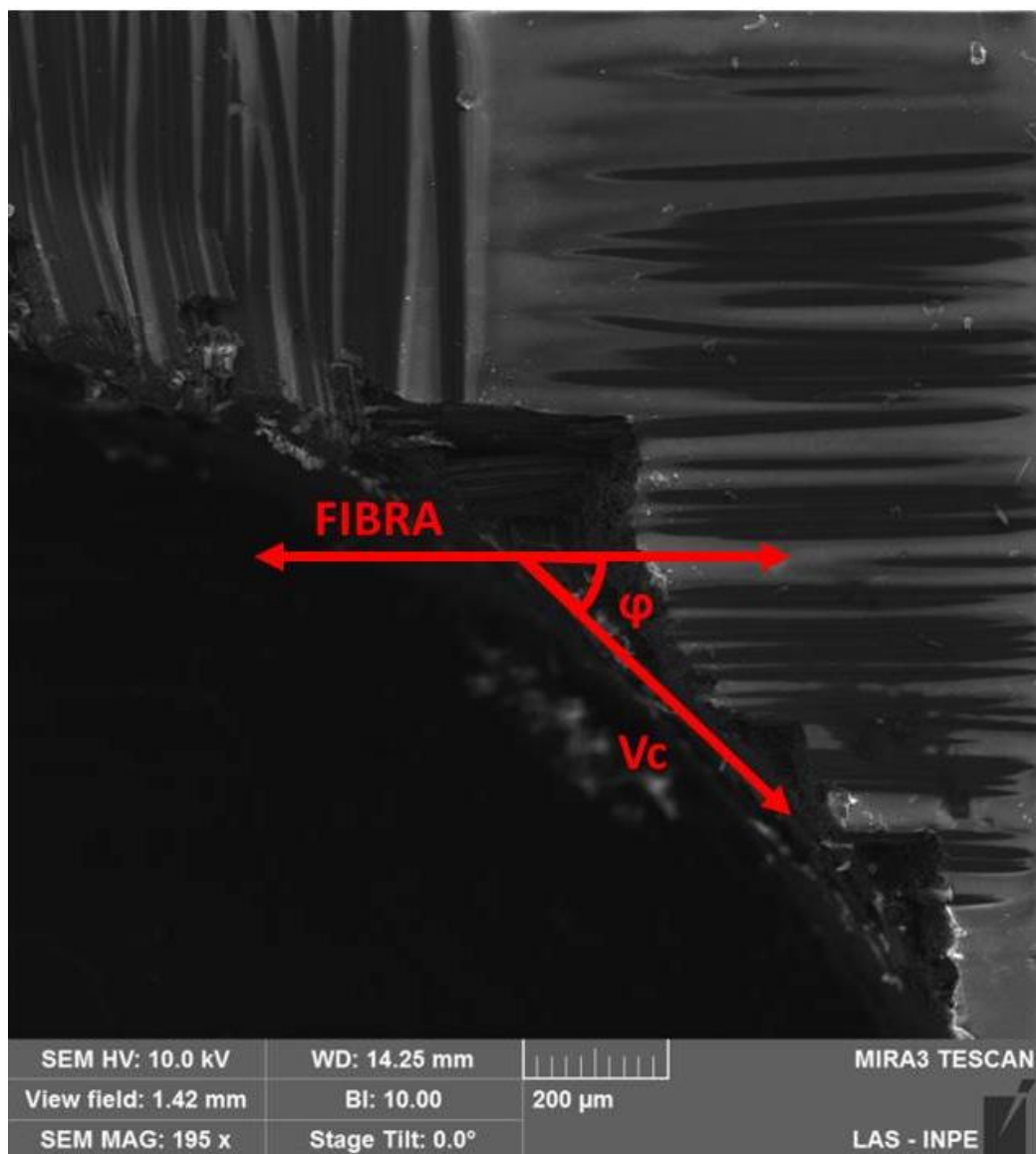
Figura 16 – Delaminação superficial CDP: (a) 7 – 200x; (b) 3 – 1000x.



Fonte: Produção do próprio autor.

A suposição feita para explicar tal fenômeno foi a de que a presença de ângulos pequenos, representado por ' ϕ ' na Figura 17, entre a direção da fibra e o vetor V_c (velocidade de corte) resultam em tal delaminação de forma que para ângulos maiores, a delaminação é notavelmente menor – nula em alguns casos.

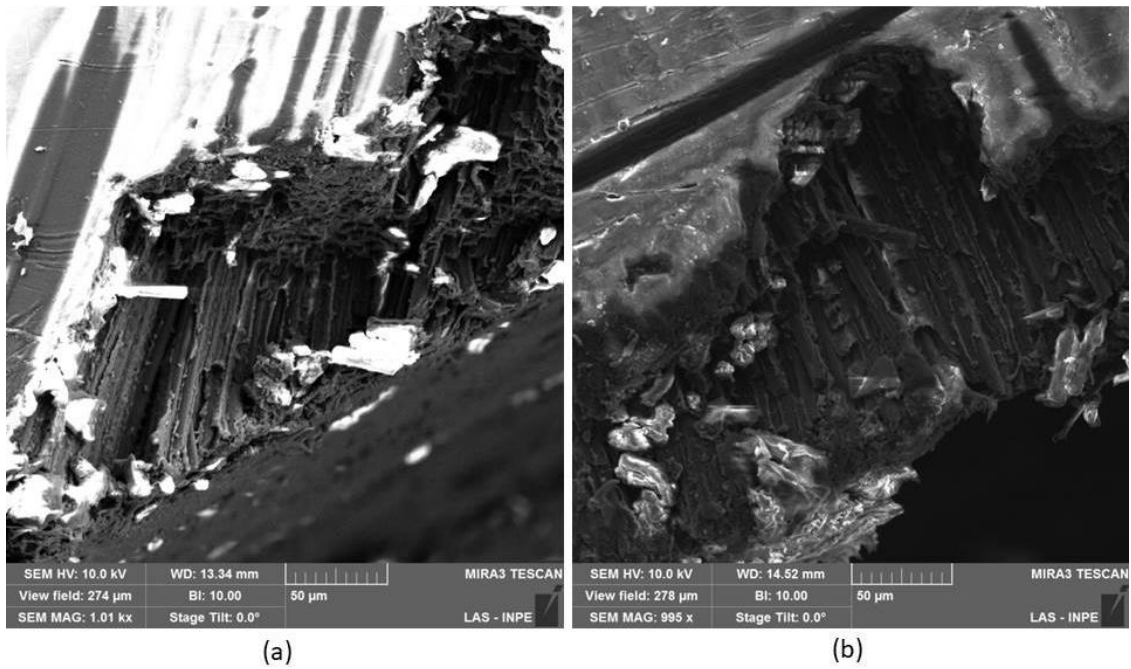
Figura 17 – Delaminação superficial CDP 17 – 200x.



Fonte: Produção do próprio autor.

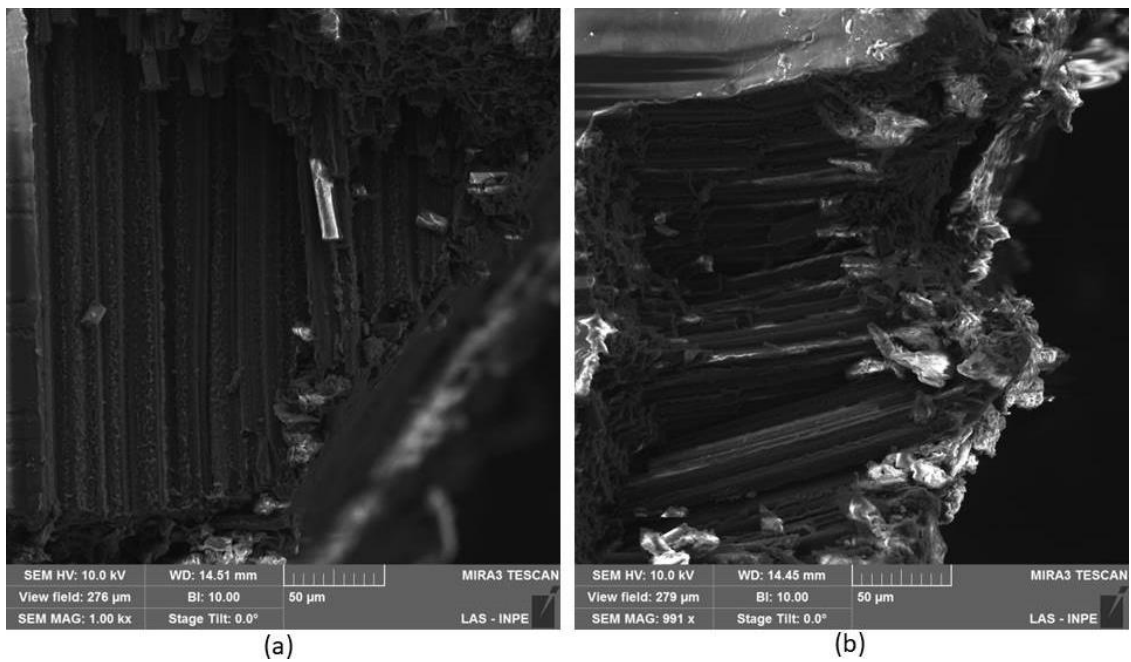
Delaminações maiores e sem padrão também ocorreram em alguns corpos de prova. Nas Figuras 18 e 19 observa-se a direção das fibras do reforço e os pontos onde ocorreram as rupturas. Não há presença de matriz nas fibras expostas pela delaminação, isto pode ser explicado pelo fato de que o reforço com pouca ou nenhuma matriz é mais suscetível ao descolamento das camadas. Nos corpos de prova 7 e 17 é visível a ocorrência do *peel up* superficial na borda dos furos.

Figura 18 – Delaminação CDP (1000x): (a) 7 e (b) 4.



Fonte: Produção do próprio autor.

Figura 19 – Delaminação CDP (1000x): (a) 16 e (b) 17.

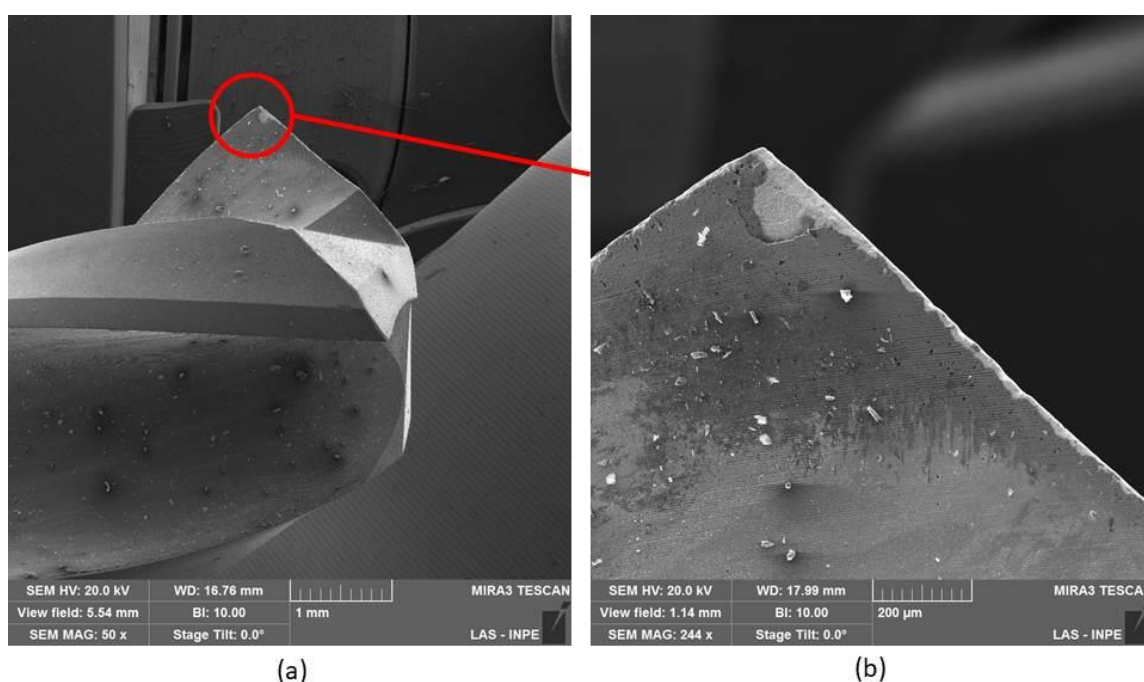


Fonte: Produção do próprio autor.

4.3 DESGASTE DA FERRAMENTA

A ferramenta utilizada na furação dos compósitos, broca helicoidal de metal duro OSG MD Ø 4,2mm com três canais, possui um revestimento Balinit Helica que visa aumentar a resistência superficial da ferramenta e, conseqüentemente, sua vida. Segundo Paiva et al. (2013), o revestimento Helica é composto por TiSiN e AlCrN. Na Figura 20 é possível observar que houve desgaste e remoção de revestimento na aresta principal de corte.

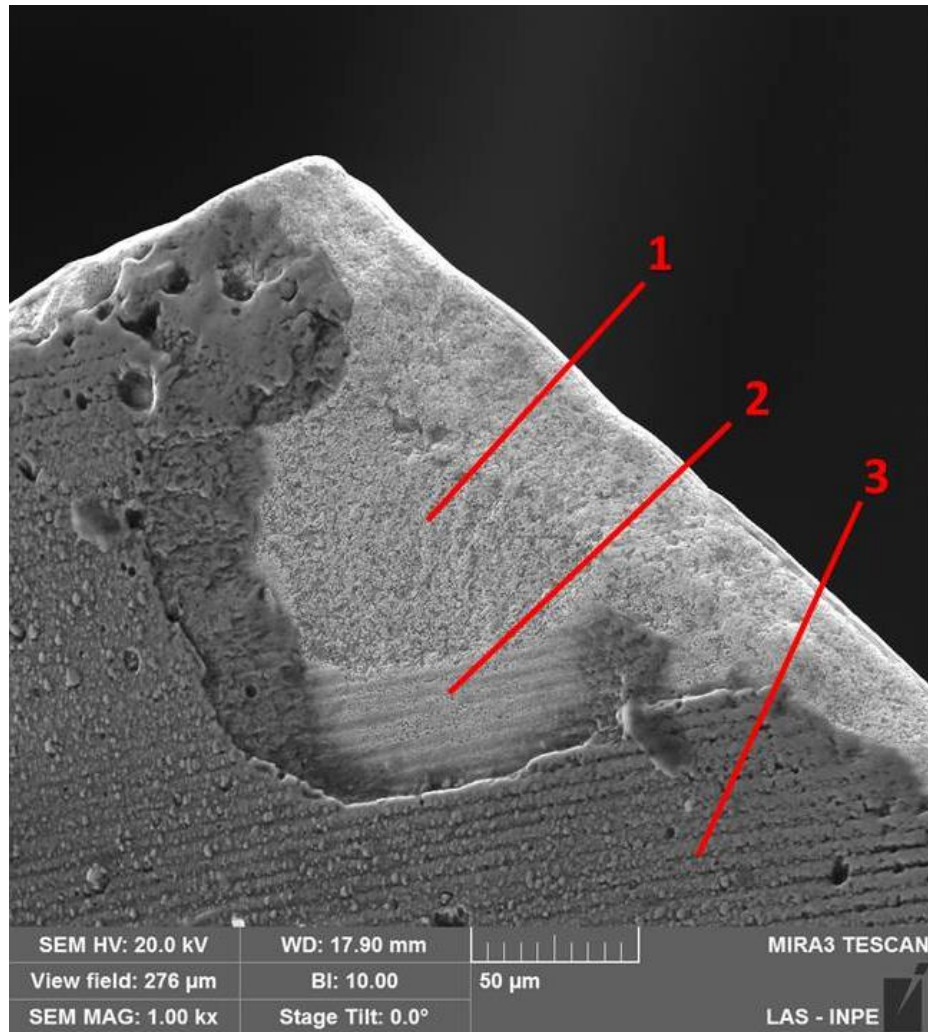
Figura 20 – Desgaste na Broca com aumento de (a) 50X e (b) 244X.



Fonte: Produção do próprio autor.

Pela Figura 21 é possível ver de maneira mais detalhada o desgaste ocorrido. A região 3 apresenta o revestimento tal como é com ranhuras aparentes resultantes da aplicação do revestimento por deposição física de vapor (PVD) e alguns poros. Na região 2, é possível observar a presença do que pode ser a segunda camada de revestimento que ficou aparente pelo lascamento da primeira devido aos esforços de corte que são maiores na aresta principal, e uma descaracterização das ranhuras onde a primeira camada ainda está presente devido à deformação plástica causada pela usinagem. Na região 1, considera-se que todo o revestimento foi removido e o material da ferramenta ficou exposto.

Figura 21 – Desgaste do revestimento da broca.



Fonte: Produção do próprio autor.

5 CONCLUSÕES

Neste trabalho o estudo realizado a respeito da usinagem de material compósito, trouxe resultados a serem destacados.

Os resultados obtidos para potência de usinagem foram discrepantes ao que se espera pela literatura, vide fórmulas (1), (2) e (3), pois o aumento do avanço da ferramenta acarretou a diminuição da potência de usinagem.

Os dados obtidos para força de usinagem apresentaram resultados coerentes com a literatura pela diminuição da rotação e aumento do avanço ocasionar aumento da força.

A análise diametral para ambos os diâmetros de entrada da broca e de saída da broca obteve interferência somente do avanço, sendo a variação da rotação indiferente. O avanço mais alto utilizado teve o mesmo efeito nos dois diâmetros, ao diminuir o erro diametral.

A avaliação da qualidade dos furos levou a conclusão de que rotações mais altas, no caso estudado 7500 rpm, geraram furos com melhor qualidade, ou seja, menor delaminação no geral. Porém, também foi observado que para avanço mais alto, de 0,1 mm/rot, os furos apresentaram delaminações superficiais consideravelmente maiores.

No objetivo de encontrar as melhores condições para realização da furação no compósito de fibra de carbono de matriz termoplástica, obtiveram-se resultados discrepantes entre a análise da delaminação e diametral do furo.

Sendo assim, para aplicações críticas deve-se optar por aplicar os parâmetros mais favoráveis à precisão diametral do furo, com valores de avanço maiores, para os quais seria necessário levar em consideração os danos causados às camadas superficiais tanto na entrada da broca como na saída para cálculos estruturais.

5.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Como uma maneira de dar continuidade ao estudo aqui apresentado recomenda-se:

- Realizar cálculos teóricos com os dados colhidos a respeito de coeficientes de usinagem do material analisado.
- Analisar melhor o desgaste da broca através da espectroscopia de energia dispersiva (EDS).

REFERÊNCIAS

- AKKAŞ, O. **Design of a frangible composite cover for missile launch**. 2018. 156 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Middle East Technical University, Turquia, 2018.
- ALLEGRINI, A. **Aspectos da furação do titânio 6Al4V com broca de aço rápido sinterizado e broca de metal duro**. 2014 123 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, Universidade Estadual Júlio de Mesquita Filho, Guaratinguetá, 2014.
- BOUZAKIS, K. et al. Cutting with coated tools: coating technologies, characterization methods and performance optimization. **CIRP Annals: manufacturing technology**, Munique, v. 61, n. 2, p. 703-723, 2012.
- CHIAVERINI, V. **Tecnologia mecânica**. 2. ed. São Paulo: McGraw Hill, 1986. 315 p. v.2.
- CHUNG, D. L. **Composite materials: science and applications**. 2. ed. Nova Iorque: Springer, 2010. 349 p.
- PAIVA, J. M. F. et al. Evaluation of hard coating performance in drilling compacted grafite iron (CGI). **Journal of Materials Engineering and Performance**, Nova Iorque, v. 22, n. 10, p. 3155-3160, 2013.
- DINIZ, A. E; MARCONDES, F. C; COPPINI, N. L., **Tecnologia da usinagem dos materiais**. 8. ed. São Paulo: Art Liber, 2013. 272 p.
- DURÃO, L. M. P. et al. Estudo da influência da pré-furação no dano em laminados carbono/epóxico. **Revista da Associação Portuguesa de Análise Experimental de Tensões**, Lisboa, v. 15, p. 73-81, 2008.
- ESTRIDGE, C. E. The effects of competitive primary and secondary amine reactivity on the structural evolution and properties of an epoxy thermoset resin during cure: a molecular dynamics study. **Polymer**, v.141, p. 12-20, 2018.
- FERRARESI, D. **Fundamentos da usinagem dos metais**. São Paulo: Edgard Blücher, 1969, 751 p. v.1.
- GONÇALVES, D. J. S. et al. Avaliação de ferramentas na furação de laminados compósitos. **Ciência & Tecnologia dos Materiais**, Lisboa, v. 23, n. 1/2, p. 114-118, 2011.
- GUTIÉRREZ, J. C. H. et al. Usinabilidade de materiais compósitos poliméricos para aplicações automotivas. **Polímeros**, São Carlos, v. 24, n. 6, p. 711-719, 2014.
- KALPAKJIAN, S; SCHMID, S. **Manufacturing, engineering and technology**. 6. ed. Prentice Hall, 2009. 1200p.

LEVY, F.; PARDINI, L. C. **Compósitos estruturais: ciência e tecnologia**. São Paulo: Edgard Blücher, 2006. 313 p.

MACHADO, A.R.; ABRÃO, A.M.; COELHO, R.T.; SILVA, M.B. **Teoria da usinagem dos materiais**. São Paulo: Editora Blücher, 2009. 371p.

NOVASKI, O. **Contribuições ao processo de furação com brocas helicoidais**. 1996. 131 f. Tese (Livre Docência em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 1996.

QUINTO, D. T. Twenty-five years of PVD coatings at the cutting edge. **News Bulletin**, Louisville, v. 5, n. 20, p. 17-22, 2007.

RAHAMATHULLAH, I.; SHUNMUGAN, M. S. Analyses of forces and hole quality in micro-drilling of carbon fabric laminate composites. **Composite Materials**, Newbury Park, v. 47, n. 9, p. 1129-1140, 2013.

REZENDE, M. C; COSTA, M. L; BOTELHO, E. C. **Compósitos estruturais: tecnologia e prática**. São Paulo: Artliber, 2011. 396p.

SANTOS, S. C.; SALES, W. F. **Aspectos tribológicos da usinagem dos materiais**. São Paulo: Artliber, 2007. 246 p.

TRENT, E.M.; WRIGHT, P. K. **Metal cutting**. 4. ed. Woburn: Butterworth-Heinemann, 2000.

VALSILIEV, V. V.; E. V. MOROZOV. **Mechanics and analysis of composite materials**. Inglaterra: Elsevier, 2001.

BIBLIOGRAFIA CONSULTADA

ROMÃO, E. G. M.; COSTA, M. L. GUIMARÃES, V. A.; BOTELHO, E. C. Avaliação de tack de pré-impregnados de epóxi reforçados com fibra de carbono: uma nova metodologia de ensaios. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE POLÍMEROS (CBPOL), 11., 2011, Campos do Jordão. **Anais [...]** Guaratinguetá: Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá (FEG-UNESP), 2011.