

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS - UFSCar
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E DE TECNOLOGIA - CCET
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA - PPGEMec**

WESLEY SOARES CAMARGO

**ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DA VIBRAÇÃO DE MÁQUINA NA QUALIDADE DO
ACABAMENTO SUPERFICIAL E NO SURGIMENTO DE DELAMINAÇÃO
DURANTE O FRESAMENTO LATERAL DE LAMINADOS DE CFRP (*CARBON
FIBER REINFORCED POLYMER*)**



São Carlos - SP
2022

WESLEY SOARES CAMARGO

**ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DA VIBRAÇÃO DE MÁQUINA NA QUALIDADE DO
ACABAMENTO SUPERFICIAL E NO SURGIMENTO DE DELAMINAÇÃO
DURANTE O FRESAMENTO LATERAL DE LAMINADOS DE CFRP (*CARBON
FIBER REINFORCED POLYMER*)**

Dissertação de mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de São Carlos, para obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. Dr. Gustavo Franco Barbosa

Coorientador: Prof. Dr. Sidney Bruce Shiki

São Carlos - SP
2022



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS

Centro de Ciências Exatas e de Tecnologia
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica

Folha de Aprovação

Defesa de Dissertação de Mestrado do candidato Wesley Soares Camargo, realizada em 21/02/2022.

Comissão Julgadora:

Prof. Dr. Gustavo Franco Barbosa (UFSCar)

Prof. Dr. Carlos Eiji Hirata Ventura (UFSCar)

Prof. Dr. Jonas de Carvalho (USP)

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001.

O Relatório de Defesa assinado pelos membros da Comissão Julgadora encontra-se arquivado junto ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica.

Agradecimentos

Primeiramente agradeço a Deus.

Agradeço a minha amada esposa e minha filha, pelo apoio incondicional ao longo dessa jornada, pela motivação nos momentos difíceis e acima de tudo por fazerem parte da minha vida.

Agradeço meu orientador Prof. Dr. Gustavo Franco Barbosa (DEMec/UFSCAR) e ao meu coorientador Prof. Dr. Sidney Bruce Shiki (DEMec/UFSCAR) por todos os direcionamentos ao longo de todo o período do Mestrado.

Agradeço aos colegas de estudo Sr. José Otávio Savazzi e Sr. Ricardo Aparecido Buzinari, pela parceria e paciência desde o início da nossa jornada.

Agradeço as instituições Centro de Treinamento SENAI Oscar Lucio Baldan por me conceder o uso de equipamentos e recursos de usinagem, a minha querida Etec Sylvio de Mattos Carvalho, onde tive a honra de ser aluno e tenho a honra de ser Professor por me conceder o uso de equipamentos e recursos de usinagem e também agradeço a toda a Diretoria da empresa HidrauService pelo apoio, nas ausências do trabalho, para que eu conseguisse realizar os estudos do Mestrado.

Resumo

A utilização de materiais compósitos na fabricação de produtos tem crescido em diversos setores da indústria, o que promove pesquisas e desenvolvimentos voltados ao beneficiamento desses materiais. Porém, as condições de usinagem impostas no processo de fabricação de um material são fatores determinantes na qualidade final do produto, devido às mudanças estruturais decorrentes das forças de corte, vibrações e temperatura, além de outras interferências geradas pelo processo no acabamento superficial da peça usinada. Assim, o projeto de pesquisa em questão propõe um estudo comparativo por meio de combinações, envolvendo diferentes taxas de velocidade de avanço durante o processo de usinagem utilizados no fresamento de peças em laminados de CFRP, material amplamente utilizado na indústria de manufatura aeronáutica. Foram realizadas análises quanto à integridade do laminado de CFRP, em relação às condições de acabamento superficial e de delaminação do compósito, ocasionadas pelas condições de usinagem impostas. Paralelamente, foi realizado o monitoramento do nível e das características da vibração mecânica exercida na fresagem, de acordo com os diferentes parâmetros de velocidade de avanço adotadas, de forma a permitir uma correlação entre as diferentes variáveis aplicadas no processo. Corpos de prova de laminados de CFRP foram fresados com diferentes taxas de avanço mantendo a rotação constante, em um centro de usinagem Romi D800 CNC. Durante o processo de fresamento, os sinais de vibração mecânica foram capturados com um acelerômetro triaxial MEMS ADXL335 fixado na peça fresada. Uma fresa de topo do tipo rômica foi utilizada durante a usinagem. Para avaliar os resultados estruturais obtidos na superfície usinada das peças fresadas, foi utilizada a técnica de microscopia eletrônica de varredura ficando evidente o melhor acabamento da superfície usinada com taxas de avanço de corte mais altas.

Palavras-chave: Fresamento. CFRP. Delaminação. Vibração de Máquina.

Abstract

The use of composite materials in the manufacture of products has grown in several sectors of the industry, which promotes research and development aimed at the improvement of these materials. However, the machining conditions imposed in the manufacturing process of a material are determining factors in the final quality of the product, due to structural changes resulting from cutting forces, vibrations and temperature, in addition to other interference generated by the process in the surface finish of the machined part. . Thus, the research project in question proposes a comparative study through combinations, involving different rates of feed speed during the machining process used in the milling of parts in CFRP laminates, a material widely used in the aeronautical manufacturing industry. Analyzes were carried out regarding the integrity of the CFRP laminate, in relation to the surface finish and delamination conditions of the composite, caused by the imposed machining conditions. At the same time, the level and characteristics of the mechanical vibration exerted in the milling were monitored, according to the different parameters of feed speed adopted, in order to allow a correlation between the different variables applied in the process. CFRP laminated specimens were milled at different feed rates keeping constant rotation, on a Romi D800 CNC machining center. During the milling process, mechanical vibration signals were captured with a MEMS ADXL335 triaxial accelerometer fixed to the milled part. A rhombic-type end mill was used during machining. To evaluate the structural results obtained on the machined surface of the milled parts, the scanning electron microscopy technique was used, showing the best finish of the machined surface with higher cutting feed rates.

Keywords: Milling. CFRP delamination. Machine vibration.

Lista de Figuras

1	Materiais utilizados na fabricação das aeronaves.	16
2	Representação esquemática de compósitos laminados.	17
3	Movimentos responsáveis pela retirada de cavaco no fresamento	18
4	Dois tipos básicos de fresamento: (a) fresamento periférico (b) fresamento frontal.	20
5	Duas formas de fresamento periférico com fresa de 20 dentes: (a) fresamento discordante e (b) fresamento concordante.	20
6	Diagrama esquemático do processo de fresagem. Note que a_p é a profundidade axial de corte e a_e é a profundidade radial de corte	22
7	Três tipos de vibração presentes em processos de usinagem: (a) Livre, (b) Forçada e (c) Auto Excitada.	23
8	Tipos de delaminação da camada de superfície	24
9	Centro de Usinagem ROMI D800.	26
10	Posicionamento gabarito morsa.	27
11	Fresa utilizada nos ensaios de usinagem.	28
12	Corpo de prova.	28
13	Diagrama esquemático do processo de aquisição e análise dos dados de vibração.	30
14	Microscópio eletrônico de alta resolução de emissão por campo.	31
15	Sinais de aceleração coletados durante os experimentos.	33
16	Densidade espectral de potência dos sinais coletados.	34
17	Análise MEV superfície amostra a, b e c ampliada em 25x.	35
18	Análise MEV 3D superfície amostra a, b e c ampliada em 25x.	36
19	Gráfico rugosidade análise de superfície amostra a ampliada em 25x.	37
20	Gráfico rugosidade análise de superfície amostra b ampliada em 25x.	37
21	Gráfico rugosidade análise de superfície amostra c ampliadas em 25x.	38
22	Análise MEV superfície amostra a, b e c ampliada em 40x.	38
23	Análise MEV superfície amostra a, b e c ampliada em 80x.	39
24	Análise MEV superfície amostra a, b e c ampliada em 200x.	39
25	Análise MEV superfície amostra a, b e c ampliada em 1000x.	40

Lista de Tabelas

1	Propriedades físicas e mecânicas do corpo de prova.	29
2	Parâmetros de usinagem.	29
3	Parâmetros sinal.	35
4	Dados calculados de rugosidade das superfícies usinadas ampliada em 25x.	36

Lista de Siglas

AMARC	-	Additive Manufacturing and Automation Research Center
CDP	-	Corpo de Prova
CFRP	-	Carbon Fiber Reinforced Polymer
CNC	-	Comando Numérico Computadorizado
GFRP	-	Glass Fiber Reinforced Polymer
MEV	-	Microscopia Eletrônica de Varredura
PCD	-	Poly-Crystalline Diamond
RPM	-	Rotações Por Minuto
Vc	-	Velocidade de corte

Sumário

1	Introdução	13
1.1	Objetivo geral	14
1.2	Objetivos específicos	14
2	Revisão da literatura	15
2.1	Materiais compósitos	15
2.1.1	Compósitos laminados	16
2.2	Processos de usinagem	17
2.2.1	Fresamento	17
2.3	Vibração mecânica	21
2.4	Análise de sinais de vibração mecânica	22
2.5	Delaminação em compósitos	23
3	Materiais e métodos	26
3.1	Máquina-ferramenta	26
3.2	Ferramenta de corte	27
3.3	Corpo de prova	28
3.4	Parâmetros de usinagem	29
3.5	Sistema de aquisição de dados	29
3.6	Análise da superfície usinada	31
4	Resultados e discussões	32
4.1	Análise dos dados de vibração coletados	32
4.2	Análise da superfície usinada	34
5	Conclusões	41
	Referências	43

1 Introdução

Em um mercado cada vez mais competitivo, os ciclos de vida dos produtos estão cada vez menores e mais dinâmicos, exigindo uma gestão de projetos para melhoria de produtos e processos cada vez mais robusta (FORCELLINI et al., 2006), onde as indústrias de forma geral veem desenvolvendo tecnologias e materiais que lhes permitam otimizar processos de fabricação e característica específicas de produto, promovendo novas formas de realização de seus negócios (MONROY; ARTO, 2010). Neste contexto o uso de materiais compósitos na fabricação de produtos tem crescido nos diferentes setores da indústria, principalmente na tecnologia de ponta como aeronáutica e automobilística, o que fomenta pesquisas e desenvolvimentos voltados ao processamento desses materiais. Isso gera avanços como aprimoramento da química orgânica, desenvolvimento de resinas para as mais diversas aplicações e fibras de vidro, de aramida e de carbono garantindo competitividade dos compósitos como materiais de engenharias para as mais diversas aplicações (MARTINS, 2014).

Neste trabalho será avaliado de forma dedicada os laminados de *CFRP* (*Carbon Fiber Reinforced Polymer*) que mesmo sendo fabricados no conceito de *near net shape technology*, ou seja, muito próximos da sua forma final, ainda demandam a necessidade de processos de usinagem como o fresamento para atingir a geometria final desejada (SHEIKH-AHMAD, 2009), garantindo que a peça final esteja em conformidade com os requisitos do projeto de produto. De forma geral, para garantia da eficiência de toda a cadeia produtiva, o processo de usinagem requer um alto monitoramento nos indicadores de custo, prazo e qualidade, uma vez que apresenta custos relevantes com ferramental, manutenção de máquinas, depreciação dos ativos, insu-
mos (NOVASKI, 1991; SLACK et al., 2009).

No processo de usinagem um dos recursos amplamente utilizados é o fresamento lateral ou de borda, em que as condições de usinagem impostas no processo de fabricação de um material são fatores determinantes na qualidade final do produto, devido a alterações estruturais provenientes das forças de corte, vibrações e tempera-

tura, além de outras interferências geradas pelo processo no acabamento superficial da peça usinada. Diante dessas exigências, estudos relacionados à influência das diferentes condições de usinagem nos processos de fresamento de um material compósito tornam-se importante para identificar as intercorrências geradoras da delaminação, sendo esta uma das não conformidades mais severas presentes na superfície usinada do CFRP, tendo como característica para estudo o efeito da intensidade da vibração de máquina no surgimento da delaminação superficial da peça usinada.

1.1 Objetivo geral

O objetivo geral deste trabalho é avaliar a influência da vibração de máquina durante o fresamento lateral na qualidade do acabamento superficial e no surgimento de delaminações em uma superfície usinada de material laminado de CFRP.

1.2 Objetivos específicos

- Implementar técnicas para a aquisição de dados de vibração da máquina durante fresamento de CFRP;
- Aplicar técnicas para processamento de sinais de vibração;
- Identificar a relação de diferentes taxas de velocidade de avanço na vibração de máquina durante o processo de fresamento lateral;
- Identificar a relação de diferentes níveis de vibração de máquina na delaminação e na rugosidade da superfície usinada;
- Investigar e usar técnicas de para análise da superfície usinada de CFRP por meio de análises de imagem da superfície usinada.

2 Revisão da literatura

Neste capítulo, apresento de forma aprofundada no estado da arte os conceitos dos processos envolvidos na análise do projeto desenvolvido, permeando o estudo através das características dos materiais compósitos, processo de usinagem por fresamento, vibração mecânica e análise de sinais vibratórios.

2.1 Materiais compósitos

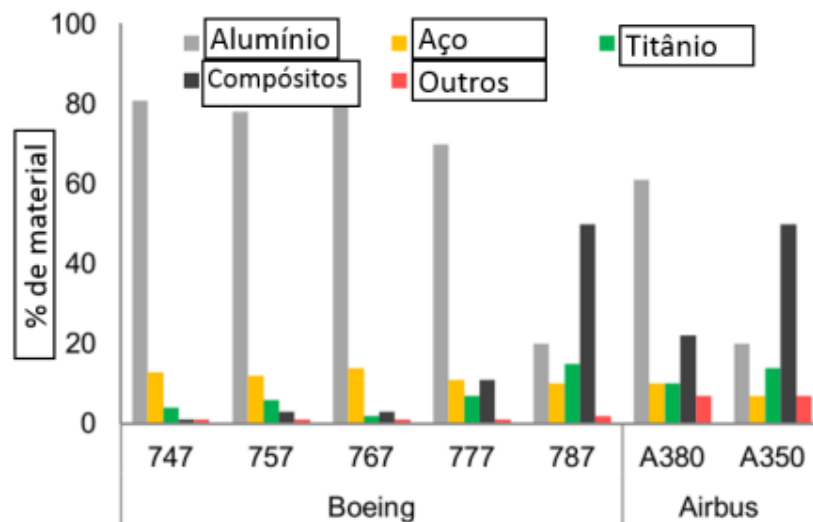
Os materiais compósitos cada vez mais vem sendo utilizados na industria de forma geral a fim de se garantir não somente uma estrutura mecânica que atenda os requisitos de projeto, mas também como um recurso eficiente de otimização de projeto, do ponto de vista de redução de custos, redução de peso e aumento da resistência mecânica, alta capacidade de amortecimento, boa estabilidade dimensional, excelente tolerância a danos, e as boas resistências à corrosão e à fadiga (NIKBAKT et al., 2018; WANG; ZHANG, 2003), os CFRPs consistem em reforços de alta resistência e rigidez, geralmente descontínuos, combinados com uma matriz, geralmente menos rígida e resistente, formando duas interfaces distintas entre eles. Dessa forma, os reforços e a matriz mantêm suas identidades físicas e químicas, porém, combinando propriedades que não podem ser alcançadas com somente um dos elementos de forma isolada (CAMPBELL, 2003).

Cada componente do laminado exerce uma função específica quanto aos esforços solicitados em condições de uso, os reforços atuam na resistência às cargas, já a matriz mantém os reforços no local e na orientação desejada, atua como um meio de transferência de carga entre os reforços e os protege de danos químicos e mecânicos (CALLISTER; RETHWISCH, 2020).

Os materiais compósitos podem ser definidos como uma montagem de dois ou mais materiais ou componentes cuja as propriedades finais são superiores ou mais eficientes que os seus constituintes se avaliados separadamente, atendendo as ne-

cessidades de alta performance em suas características mecânicas e térmicas (HSIS-SOU et al., 2021). Isso garante uma ampla e nova gama de aplicações na indústria de forma geral utilizando materiais já existentes no mercado a Figura 1 apresenta dados referente a aplicação de materiais compósitos na indústria aeronáutica.

Figura 1 – Materiais utilizados na fabricação das aeronaves.



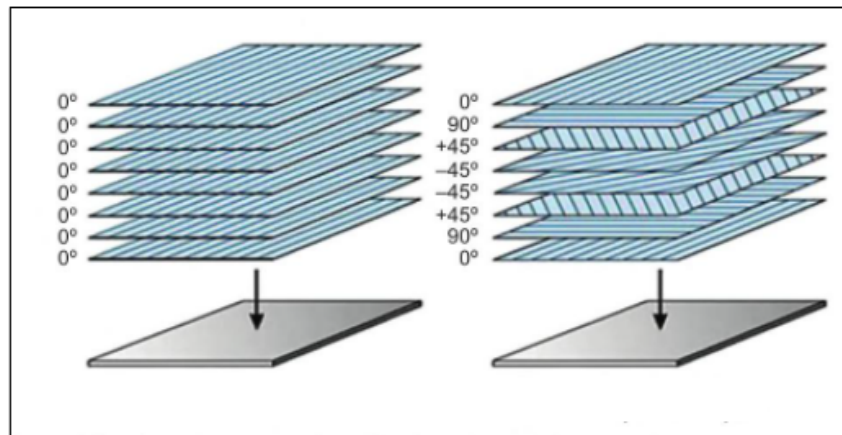
Fonte: Adaptado de Aamir et al. (2020).

2.1.1 Compósitos laminados

Esse tipo de material é fabricado por meio da montagem de uma série determinada de camadas de um material específico podendo-se variar a orientação das camadas ou não. Conforme Figura 2, a esquerda é apresentada uma estrutura unidirecional onde todas as camadas do material compósito estão direcionadas a 0° (mesma direção), sendo que a resistência a rigidez é apenas na direção da fibra já a direita é apresentada uma estrutura quase isotrópica, onde as camadas estão orientadas variando-se a direção das camadas do material, neste tipo de configuração a resistência a rigidez está nas duas direções (RANA; FANGUEIRO, 2016; MALLICK, 2007).

Segundo (CARLSSON et al., 2014) o *Air Force Flight Dynamics Laboratory* desenvolveu um código para identificação de estruturas laminadas como guia para orientar quanto ao processo de construção de um determinado laminado compósito, sendo esta configuração fator determinante de suas propriedades mecânicas e é definida pelo número de lâminas sobrepostas, bem como pelo ângulo de orientação entre as fibras. Materiais compósitos são identificados da seguinte maneira: $[0^\circ]_n$, onde $[0^\circ]$

Figura 2 – Representação esquemática de compósitos laminados.



Fonte: Adaptado de Rana e Fanguero (2016).

é a orientação da camada devendo ser descrito todas as orientações utilizadas na configuração do laminado e n é o número total de camadas utilizadas para se atingir a espessura final desejada do laminado.

2.2 Processos de usinagem

Na indústria manufatureira de forma geral é comum a necessidade de conferir a um determinado material e ou peça uma forma geométrica específica, dentro deste contexto o processo de usinagem é amplamente utilizado nessas indústrias, (FERRARESI, 1970) apresentou de forma ampla uma definição do processo de usinagem como sendo aquele que confere forma ou dimensões a uma peça por meio da remoção de material formando o cavaco. Para (GROOVER, 2019) a remoção do material é feita por meio do uso de uma ferramenta de corte afiada que remove o material em excesso e obtêm a geometria final desejada.

Existe uma série considerável de processos de usinagem, sendo que cada um é utilizado de forma específica dentro das características geométricas da peça que se pretende obter, dentro do contexto do presente projeto é apropriado identificar o processo de usinagem por fresamento.

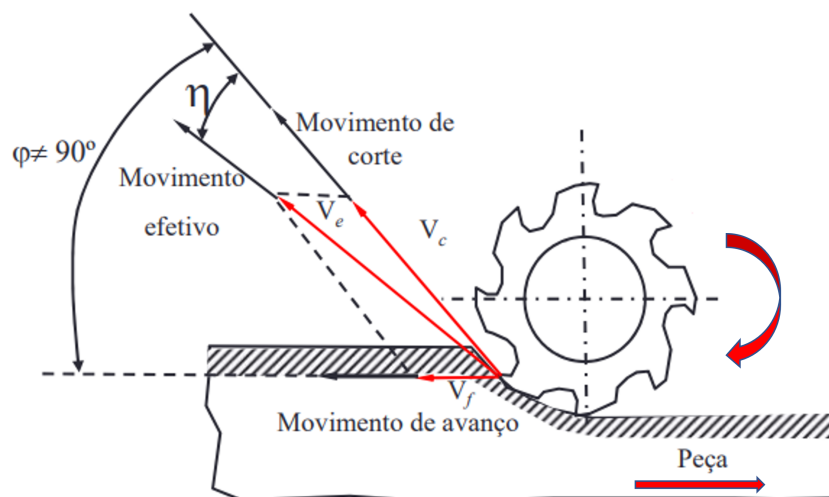
2.2.1 Fresamento

O fresamento é uma operação de usinagem destinada a obtenção de superfícies quaisquer, utilizando uma ferramenta de corte afiada multicortante, rotativa e cilíndrica,

onde o eixo de rotação da ferramenta de corte é perpendicular à direção de avanço. A ferramenta de corte no processo de usinagem de fresamento é chamada de fresa e as arestas de corte de dentes, as máquinas utilizadas pra executar esse processo são as fresadoras e os centro de usinagens (GROOVER, 2019).

Para que o processo de fresamento seja efetivo em garantir a qualidade desejada da superfície final usinada, é necessário que se entenda a condição geral de corte e ou usinagem no fresamento, essa é dada, pela interação entre os movimentos do conjunto máquina ferramenta, sendo esta interação envolvendo três tipos de movimento: direção dos movimentos de corte, avanço de corte e avanço efetivo de corte, onde o uso de parâmetros adequados é essencial para o atingimento da qualidade necessária da superfície final usinada. O movimento de corte é um movimento realizado entre a ferramenta de corte e a peça, através de uma velocidade de corte (V_c). Já o movimento de avanço potencializa este contato, através de uma interação maior entre o conjunto peça/ferramenta de corte, mediante avanços progressivos de profundidade, este movimento produz o cavaco e é associado a uma velocidade de avanço (V_f) já o movimento efetivo de corte é definido pela realização simultânea dos movimentos citados anteriormente, associado à sua respectiva velocidade efetiva de corte (V_e), (ABNT, 2013). A Figura 3 e as Equações 1 e 2 demonstram essas interações.

Figura 3 – Movimentos responsáveis pela retirada de cavaco no fresamento



Fonte: Adaptado de Diniz et al. (2014)

$$N = \frac{1000V_c}{\Pi D} \quad (1)$$

Sendo N a rotação por minuto da ferramenta de corte; 1000 é uma constante; V_c é a velocidade de corte (m/min) e D é o diâmetro da ferramenta de corte (mm).

$$V_f = NZf_z \quad (2)$$

Sendo V_f a velocidade de avanço (mm/min); N é a rotação por minuto da ferramenta de corte; Z é o número de dentes da ferramenta de corte e f_z é o avanço por dente.

Além das condições de corte adequadas para um controle efetivo que garanta a qualidade final desejada, é necessário se fazer estimativas de tempo de usinagem, pois, no processo produtivo é de extrema importância esta informação para fins de dimensionamento de carga produtiva. A equação 3 apresenta os fatores que influenciam no tempo necessário para se fresar uma peça.

$$T_c = \frac{L}{V_f} \quad (3)$$

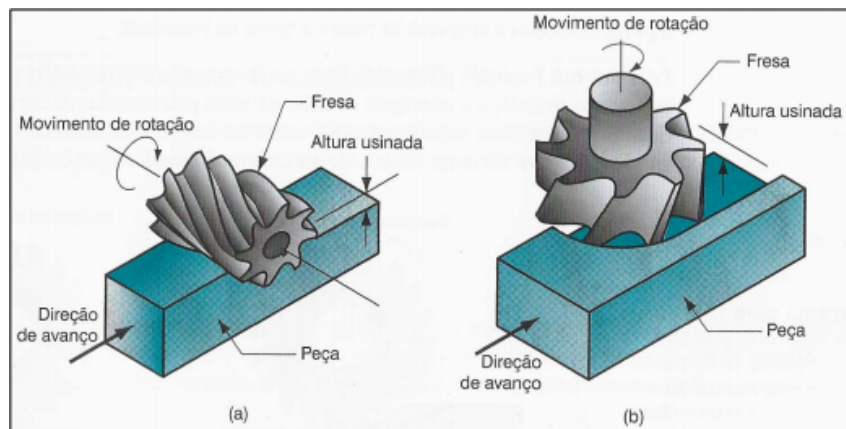
Sendo T_c o tempo de corte (min); L o comprimento da peça (mm); V_f a velocidade de avanço (mm/min), onde é possível verificar que o tempo de corte é inversamente proporcional ao comprimento da peça em relação a velocidade de avanço.

O fresamento é constituído de dois tipos fundamentais, sendo categorizados pelo posicionamento do eixo árvore da máquina-ferramenta em relação a peça que está sendo usinada (DINIZ et al., 2014; GROOVER, 2019).

- Fresamento Periférico: também conhecido como fresamento cilíndrico tangencial, é o tipo de fresamento onde o eixo da ferramenta é paralelo à superfície a ser usinada Figura 4a;
- Fresamento Frontal: é o tipo de fresamento onde o eixo da ferramenta é perpendicular à superfície a ser usinada Figura 4b.

No fresamento periférico ilustrado na Figura 4, é importante conceituar que a direção de rotação da fresa pode se dar em duas direções, concordante e discordante, sendo o fresamento discordante (Figura 5a), a direção do movimento dos dentes da fresa é na direção contrária ao avanço, já o fresamento concordante (Figura 5b), a di-

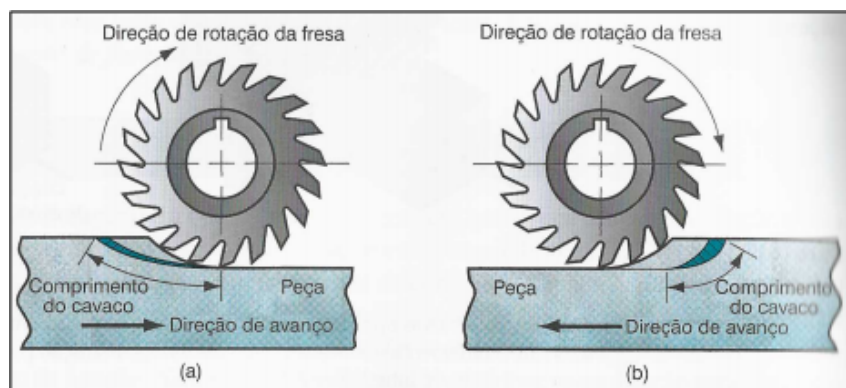
Figura 4 – Dois tipos básicos de fresamento: (a) fresamento periférico (b) fresamento frontal.



Fonte: Groover (2019).

reção do movimento dos dentes da fresa é na mesma direção do avanço (GROOVER, 2019; TRENT; WRIGHT, 2000).

Figura 5 – Duas formas de fresamento periférico com fresa de 20 dentes: (a) fresamento discordante e (b) fresamento concordante.



Fonte: Groover (2019).

O processo de usinagem de material compósito vem sendo extremamente estudado por diferentes autores com o propósito de se otimizar parâmetros e processos de usinagem para garantir qualidade e eficiência do produto acabado.

Mathivanan et al. (2016) compararam a usinagem do CFRP com o *GFRP* (*Glass Fiber Reinforced Polymer*), eles observaram em seus experimentos utilizando exatamente os mesmos parâmetros de corte que a força de corte no compósito de CFRP é maior do que a força de corte no compósito de GFRP, isso se deu devido a força imposta pelas fibras de carbono ser maior do que a força imposta pelas fibras de vidro.

Wang et al. (2016) a partir de diferentes parâmetros de usinagem utilizados em

seus testes, eles relacionaram o aumento da temperatura de corte com diferentes ângulos de orientação da fibra de carbono do CFRP, e concluíram que a intensidade da força de corte diminui com o aumento do ângulo de orientação da fibra de carbono e por consequência a temperatura de usinagem também reduz, sendo o ângulo de orientação de 45° o que gera menos calor no sistema.

Chen et al. (2017) estudaram os efeitos do desgaste da ferramenta de *PCD (Polycrystalline Diamond)* na superfície usinada de CFRP comparando os dados com dois diferentes tipos de ferramentas de corte, utilizando uma fresa escalonada e uma fresa de dentes retos. Concluíram que os defeitos na superfície usinada ocorrem primeiramente e de forma mais severa na região em que a fibra de carbono é orientada a 90° e 0° e se agravando e se expandindo para as demais orientações de fibra conforme a ferramenta vai se desgastando. Também concluíram que a fresa escalonada apresenta melhor desempenho quando comparada a fresa de dentes retos, devido a sua geometria apresentar uma inclinação no ângulo tanto a direita quanto a esquerda que faz a peça suportar forças de corte bidirecionais inibindo assim efeitos de delaminação e melhorando as condições de corte.

Liu et al. (2017) por meio dos seus estudos de desenvolvimento de uma fresa escalonada para usinagem de CFRP, identificaram por meio do modelo regressão a influência da força de corte no processo de fresamento, chegando a conclusão que a força de corte diminui com o aumento da velocidade de corte e aumenta com o incremento da taxa de avanço por dente e largura da região de fresamento.

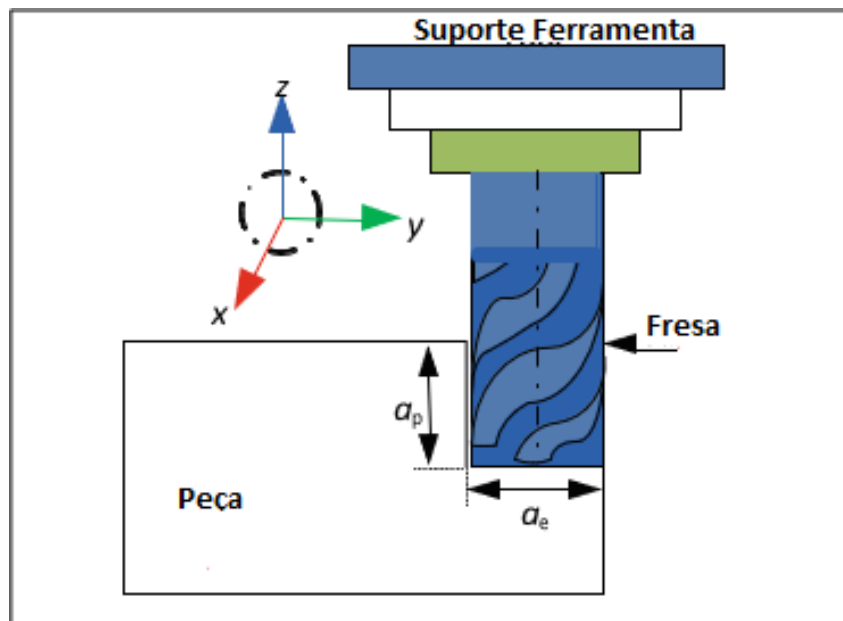
2.3 Vibração mecânica

A vibração mecânica ou de máquina é uma característica inerente ao processo de fresamento, Figura 6, sendo causada pela interação dinâmica entre ferramenta de corte e peça que está sendo usinada, podendo causar problemas de acabamento na superfície usinada. As vibrações mecânicas podem ser encontradas em todos os tipos de usinagem e classificadas em três classes, livre, forçada e auto excitada como ilustrado na Figura 7 (MUHAMMAD et al., 2017).

A vibração livre ocorre como resultado da colisão entre ferramenta e peça de modo que a intensidade da amplitude é decrescente e a frequência é igual a frequência f_{nd} natural amortecida (Figura 7a) (GRZESIK, 2008).

A vibração forçada ocorre com a atuação de forças periódicas no sistema, por

Figura 6 – Diagrama esquemático do processo de fresagem. Note que a_p é a profundidade axial de corte e a_e é a profundidade radial de corte



Fonte: Adaptado de Muhammad et al. (2017).

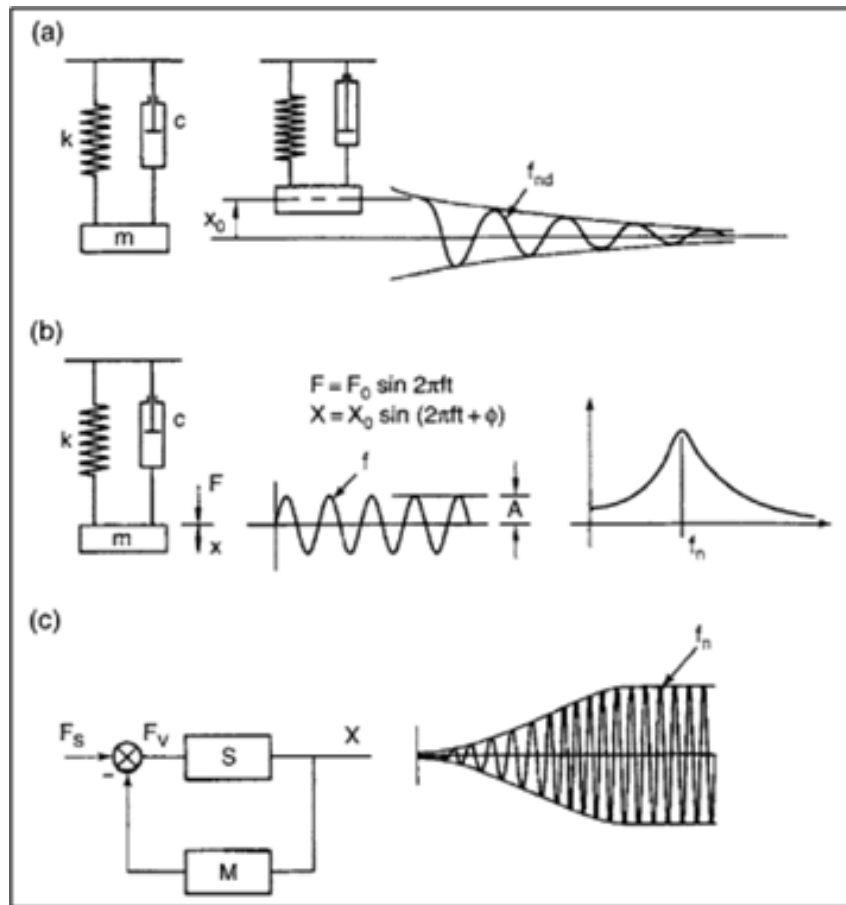
exemplo, a passada dos dentes da fresa em contato com a superfície usinada com amplitude A constante e frequência de vibração f igual a frequência de excitação da força (Figura 7b).

A vibração auto excitada é um resultado da interação peça-ferramenta de corte devido ao contato entre a ferramenta de corte com uma superfície previamente usinada (MUHAMMAD et al., 2017). Essas interações podem levar a uma dinâmica instável do processo de corte causada pela realimentação do processo de usinagem (Figura 7c).

2.4 Análise de sinais de vibração mecânica

O processo de fresamento, por ser um processo de usinagem com máquina rotativa, acaba por produzir e ou emitir sinais de vibração, que transmitem informações sobre o estado e ou comportamento do sistema físico analisado, podendo ser sintetizado para comunicação (OPPENHEIM et al., 1989). Segundo (RIAZ et al., 2017), sinais de vibração coletados em máquinas rotativas é frequentemente contaminado por ruído, o que pode tornar o processo de diagnóstico impreciso e falhas de análise. Para melhor entendimento do sinal coletado e eliminar ruídos torna-se necessário a aplicação de técnicas de modelagem de dados para uma melhor análise e acurácia. Nesta

Figura 7 – Três tipos de vibração presentes em processos de usinagem: (a) Livre, (b) Forçada e (c) Auto Excitada.



Fonte: Adaptado de Grzesik (2008).

sessão serão apresentadas as técnicas de análise utilizadas no desenvolvimento do projeto, sendo análise de vibração mecânica no domínio do tempo e no domínio da frequência.

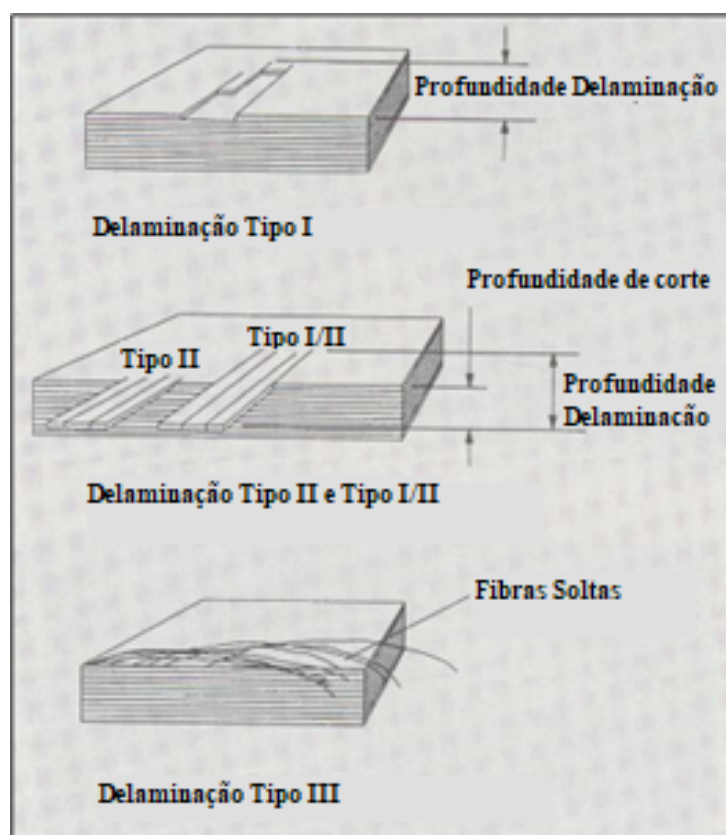
2.5 Delaminação em compósitos

A delaminação é uma característica de não conformidade apresentada durante o fresamento lateral de materiais compósitos, onde a estrutura heterogênea do material torna o processo de usinagem extremamente difícil (CHOUHAN et al., 2016), causada por um modo de falha interlaminar que consiste na separação de planos adjacentes como consequência da ação de tensões atuantes fora destes planos, por meio da propagação de uma trinca através da interface entre estes planos que é rica em resina (MICHALCOVÁ; KADLEC, 2016), sendo de grande importância na engenharia de ma-

nufatura entender como a delaminação é formada no processo de fresamento (COLLIGAN et al., 1992). Chen et al. (2019) estabeleceram em seus estudos uma relação direta entre o desgaste do revestimento da fresa rômica monitorado por microscópio e a qualidade da superfície usinada monitorada por (MEV), concluíram que existem dois estágios de desgaste do revestimento da ferramenta, sendo que o desgaste inicial do revestimento implica em uma qualidade superficial aceitável, pois a ferramenta ainda é capaz de cisalhar as fibras do material, já o desgaste por desprendimento do revestimento acaba por comprimir e extrudar as fibras durante o fresamento o que piora significativamente a qualidade da superfície usinada, gerando a delaminação. Ozkan et al. (2020) concluíram em seus estudos que o parâmetro de corte que mais influencia no surgimento e na intensidade da delaminação é a taxa de avanço.

(COLLIGAN et al., 1992) e posteriormente (ABHISHEK et al., 2015; WANG et al., 2017), classificaram a delaminação em 4 grupos de acordo com a aparência visual da superfície usinada tipo I, tipo II, tipo I/II e tipo III (Figura 8).

Figura 8 – Tipos de delaminação da camada de superfície



Fonte: Adaptado de Colligan et al. (1992).

Na delaminação do tipo I a superfície do painel usinada foi quebrada e levemente empurrada para dentro. Tipo II a superfície usinada apresentou uma característica

contrária a do tipo I, onde as fibras do material compósito se projetaram para fora da superfície usinada. Tipo I/II é a combinação do tipo I e do tipo II. Tipo III pode ser observada como fibras soltas parcialmente ligadas à borda usinada, causando uma aparência "difusa" ao longo da borda superior ou inferior da superfície usinada.

3 Materiais e métodos

Neste capítulo apresento os procedimentos e recursos adotados para efetuar o processo de usinagem, como, maquinário, ferramenta de corte e Corpo de Prova (CDP) a ser usinado, bem como os recursos de captação de dados vibratórios e captação imagem, necessário para avaliar a superfície usinada microscopicamente.

3.1 Máquina-ferramenta

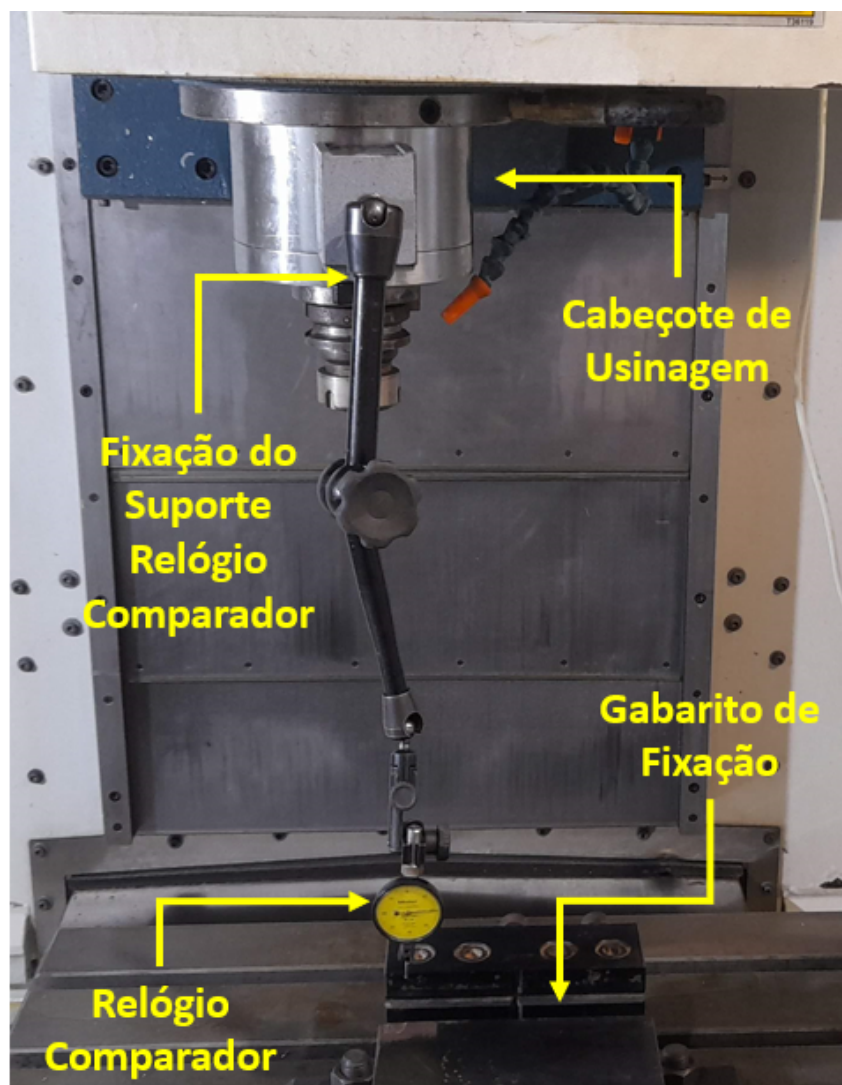
O fresamento do corpo de prova será feito em um centro de usinagem CNC Romi D800 potência máxima de 18,5 KW e rotação máxima de 10.000 RPM conforme Figura 9, o sistema de fixação do corpo de prova será feito por meio de um gabarito morsa fixado na mesa de usinagem por meio de grampos de fixação, para um correto posicionamento do gabarito morsa, o mesmo será posicionado com o auxílio de um relógio comparador para esquadrear o posicionamento do gabarito morsa de acordo com o cabeçote de usinagem (Figura 10).

Figura 9 – Centro de Usinagem ROMI D800.



Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

Figura 10 – Posicionamento gabarito morsa.

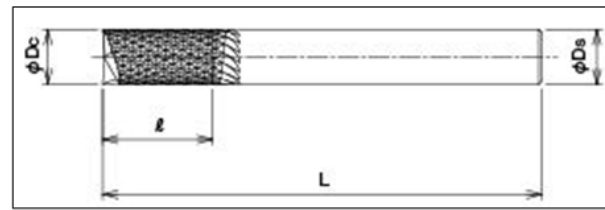


Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

3.2 Ferramenta de corte

O processo de usinagem será desenvolvido com uma fresa router tipo lima rotativa com 6,35mm de diâmetro, metal duro com revestimento de diamante, comprimento de corte de 19 mm e comprimento total da ferramenta é de 50,8mm, a empresa OSG Sulamericana é o fabricante de fresa utilizada. A Figura 11 apresenta o desenho da fresa a ser utilizada.

Figura 11 – Fresa utilizada nos ensaios de usinagem.



(a)



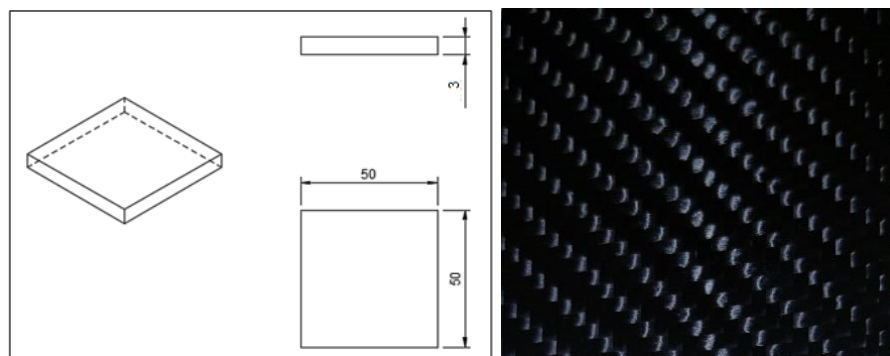
(b)

Fonte: Catálogo OSG Sulamericana 2022.

3.3 Corpo de prova

O corpo de prova (CDP) ensaiado é um laminado de CFRP com 3mm de espessura, 50mm de largura e 50mm de comprimento conforme desenho na Figura 12(a) e imagem da placa na Figura 12(b), o laminado é constituído de resina epóxi e tecido de fibra de carbono tipo Sarja 2x2 e fio 3k variando-se a orientação das camadas do tecido em 0° e 90° , considerando a nomenclatura padrão abordada anteriormente no capítulo 2.1 a configuração do laminado utilizado nos ensaios é $[0^\circ/90^\circ]_{[12]}$, de modo que o laminado é feito orientando-se as camadas do tecido em 0° e 90° composto de 12 camadas para se obter a espessura final de 3mm. A Tabela 1 apresenta as propriedades físicas e mecânicas do material utilizado no ensaio.

Figura 12 – Corpo de prova.



(a) Desenho simplificado do CDP

(b) Imagem do CDP utilizado

Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

Tabela 1 – Propriedades físicas e mecânicas do corpo de prova.

	Resistência a Tração	Módulo de Tração	Peso específico
Unidade	MPa	GPa	g/cm ³
Valor	350	40	1.50
Norma	ASTM D-638	ASTM D-638	ASTM D-792

Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

3.4 Parâmetros de usinagem

O procedimento de usinagem adotado é efetuado mantendo constantes a velocidade de corte e a rotação por minuto da ferramenta de corte, o fresamento lateral foi feito com apenas 1 passo de profundidade de corte de 3,175mm, tal profundidade de corte é equivalente a metade do diâmetro da ferramenta de corte utilizada no processo, e sentido de usinagem é concordante. O único parâmetro que foi alterado durante o fresamento das amostras foi a intensidade da velocidade de avanço. A Tabela 2 apresenta os dados detalhados dos parâmetros de corte utilizados em cada um dos CDPs, divididos em 3 amostras, a, b e c.

A amostra a foi usinada conforme parâmetros de corte sugeridos pelo fabricante da ferramenta de corte utilizada no processo. Já a velocidade de avanço utilizada nas amostras b e c, foram selecionadas considerando o tempo de aquisição máximo do sistema de aquisição de dados, sendo este de 5 segundos, para fins de cálculo do tempo de corte, foi utilizada a fórmula 3, já mencionada anteriormente.

Tabela 2 – Parâmetros de usinagem.

Amostra	Vc (m/min)	n (RPM)	Vf (mm/min)	Tc (s)
a	100	5015	600	4.98
b	100	5015	700	4.26
c	100	5015	800	3.78

Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

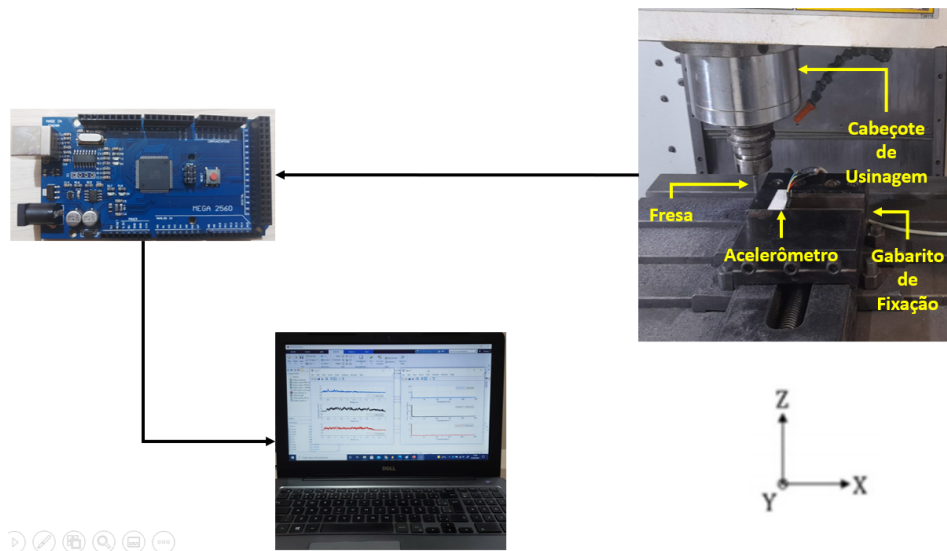
3.5 Sistema de aquisição de dados

Durante o processo de fresamento, sinais de vibrações mecânicas serão capturados com um acelerômetro triaxial MEMS ADXL335 (sensibilidade: 300 mV / g, faixa de frequência de até 1,6kHz), instalado sobre a p CDP a ser usinado. O acelerômetro é conectado a uma placa do Arduino MEGA 2560, que por meio de um código via interface IDE do Arduino gerencia a aquisição de dados por um período de 5 segundos.

Os dados coletados durante o processo de usinagem do CDP são salvos em uma planilha Excel e em seguida avaliados via software MATLAB. A Figura 13 apresenta o diagrama esquemático do processo de aquisição e análise dos dados de vibração.

Dado uma limitação de uso da versão aberta do software MATLAB, mesmo o sensor utilizado no processo de aquisição dos sinais de vibração ser triaxial, foi necessário conduzir o estudo em apenas 1 eixo de orientação da vibração, dessa forma para fins de estudo foi considerado apenas a vibração mecânica no eixo "Z" de usinagem, sendo este perpendicular a mesa de usinagem da máquina.

Figura 13 – Diagrama esquemático do processo de aquisição e análise dos dados de vibração.



Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

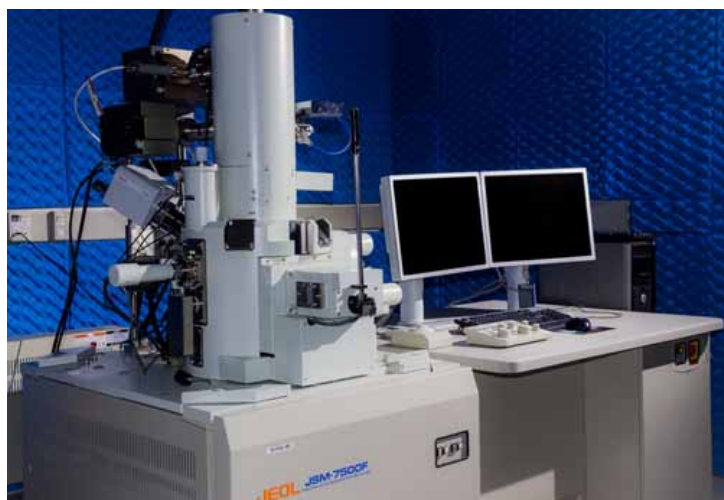
Os códigos de programação foram desenvolvidos via MATLAB pelo grupo de estudos do AMARC¹ (*Additive Manufacturing and Automation Research Center*) sobre orientação do Prof. Dr. Sidney Bruce Shiki do Departamento de Engenharia Mecânica da UFSCAR, com o objetivo de realizar a leitura, armazenamento e relatórios referentes aos sinais vibratórios coletados durante o processo de usinagem dos CDPs.

¹AMARC é um grupo de pesquisa com foco em manufatura avançada e inovações relacionadas a design, simulações e manufatura, o grupo é formado por professores e alunos da Ufscar e também por pesquisadores da comunidade científica. Segue link para acesso ao site do grupo: <https://www.amarc.ufscar.br/>.

3.6 Análise da superfície usinada

A análise da superfície usinada é feita no Centro de Caracterização e Desenvolvimento de Protocolos para Nanotecnologia (CCDPN LIEC, 2021), por meio de um microscópio eletrônico de alta resolução de emissão por campo (MEV-FEG), marca JEOL, modelo JSM-7500F, com software de operação PC-SEM v 2,1,0,3, equipado com detectores de elétrons secundário, retro espalhados e análise química (*Energy Dispersive Spectroscopy* - EDS) da marca Thermo Scientific, modelo Ultra Dry, com software de operação NSS 2.3 (Figura 14).

Figura 14 – Microscópio eletrônico de alta resolução de emissão por campo.



Fonte: CCDPN LIEC 2021.

A análise das imagens coletadas durante o ensaio MEV serão avaliadas e tratadas por meio do aplicativo de edição de imagens microscópica, *ImageJ*, é um programa de computador *open source*, feito em Java destinado a processamento de imagens desenvolvido no *National Institutes of Health*, foi desenvolvido para ser um programa de arquitetura aberta capaz de possibilitar a exibição, edição, análise, processamento de imagens (LAM et al., 2021).

4 Resultados e discussões

Neste capítulo abordo os procedimentos e metodologia utilizados para avaliar e mensurar os dados obtidos durante o ensaio de usinagem por meio da aquisição de dados referente a vibração do conjunto máquina, ferramenta e peça; também será avaliado os dados obtidos a partir da análise MEV das amostras usinadas.

4.1 Análise dos dados de vibração coletados

Os dados de vibração mecânica amostrados durante o procedimento experimental são utilizados para analisar o comportamento vibratório dinâmico ocorrido e guiar este estudo, a Figura 15 apresenta os valores das vibrações em g no eixo Z, considerando três diferentes valores para a velocidade de avanço, sendo possível identificar uma resposta do sistema quanto a alteração do parâmetro de usinagem em estudo, no caso a velocidade de avanço. Para cada uma das três diferentes velocidade de avanço ensaiada, conforme citação no capítulo anterior na Tabela 2, o sistema demonstrou uma resposta específica.

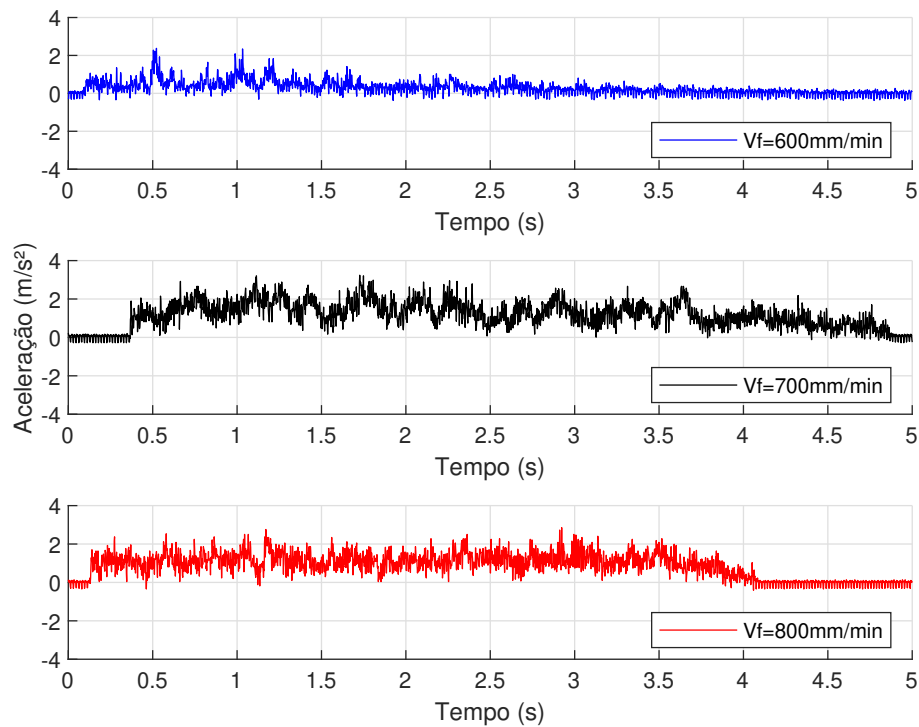
Na Figura 15 destacado em azul é possível verificar o comportamento do sinal de vibração da amostra a, cujo a velocidade de avanço utilizada no processo de fresamento foi de 600 mm/min, é possível verificar que os maiores picos de vibração ocorreram positivamente e uma tendência de menores picos a partir dos 2,5s decorridos do tempo de usinagem.

Na Figura 15 destacado em preto é possível verificar o comportamento do sinal de vibração da amostra b, cujo a velocidade de avanço utilizada no processo de fresamento foi de 700 mm/min, é possível verificar que os maiores picos de vibração ocorreram positivamente e uma tendência de menores picos a partir dos 4s decorridos do tempo de usinagem.

Na Figura 15 destacado em vermelho é possível verificar o comportamento do

signal de vibração da amostra c, cujo a velocidade de avanço utilizada no processo de fresamento foi de 800 mm/min, é possível verificar que os maiores picos de vibração ocorreram positivamente com picos menores concentrado positivamente entre 0 m/s^2 e 2 m/s^2 com uma tendência de menores picos a partir dos 4s decorridos do tempo de usinagem.

Figura 15 – Sinais de aceleração coletados durante os experimentos.



Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

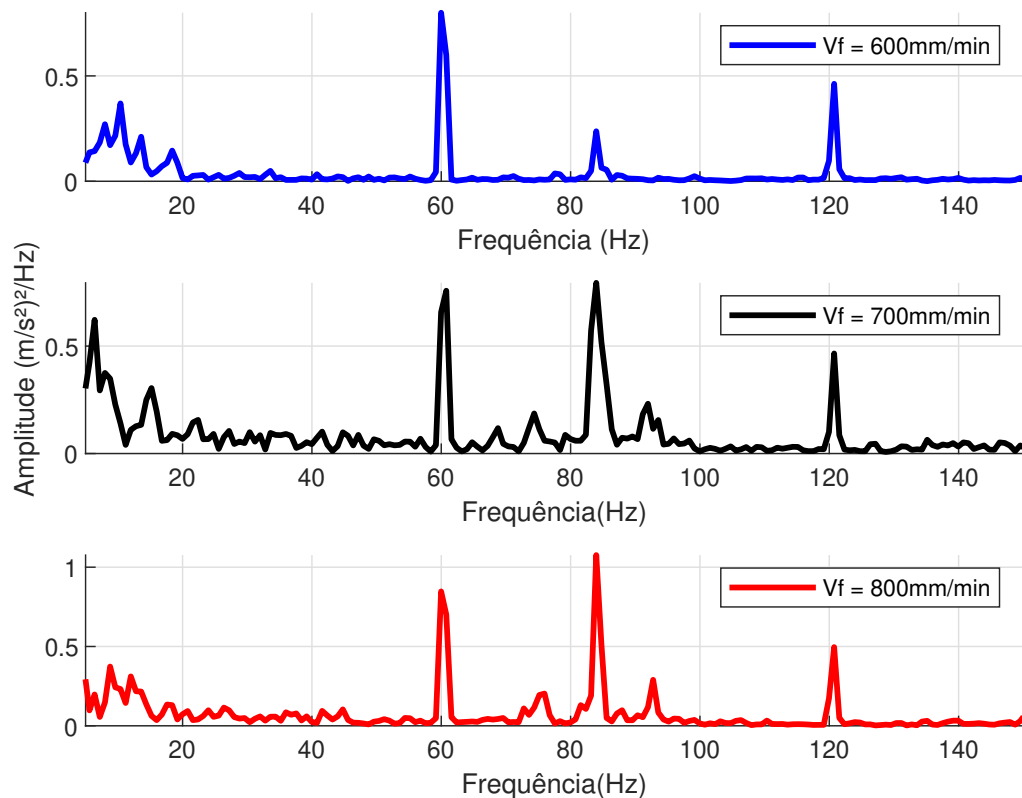
A análise no domínio da frequência a partir da densidade espectral de potência do sinal (Figura 16) mostra a variação das amplitudes em relação as frequências presentes no sistema, considerando três diferentes valores para a velocidade de avanço, sendo possível identificar uma resposta do sistema quanto a alteração do parâmetro de usinagem em estudo, no caso a velocidade de avanço. Para cada uma das três diferentes velocidade de avanço ensaiada, conforme citação no capítulo anterior na Tabela 2, o sistema demonstrou uma resposta específica.

Comumente nos 3 gráficos apresentados, é possível verificar em destaque com os valores, a presença da 3 faixas de frequência comum, sendo que a frequência de 60 Hz é provavelmente um ruído gerado pela rede elétrica, cuja a frequência é de 60 Hz, já frequência de 120 Hz é uma componente harmônica da frequência de 60 Hz;

a terceira frequência comum no sistema é da 83 Hz, sendo esta, provavelmente uma frequência natural do sistema.

Quando avaliado a terceira faixa de frequência existente no sistema, é possível verificar que a amostra c, usinada com um avanço de 800 mm/min apresentou uma certa diferença quando comparada com as frequências das amostras a e b, sendo que as mesmas foram usinadas com avanço de 600 mm/min e 700 mm/min respectivamente.

Figura 16 – Densidade espectral de potência dos sinais coletados.



Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

Para um maior entendimento com relação a análise do sinal, a Tabela 3 apresenta os valores calculados via MATLAB do RMS, Curtose e do Fator de crista para cada faixa de velocidade de avanço estudada.

4.2 Análise da superfície usinada

A análise MEV permitiu verificar a característica da superfície usinada em cada uma das diferentes condições de usinagem impostas ao sistema (Figura 17 e 18),

Tabela 3 – Parâmetros sinal.

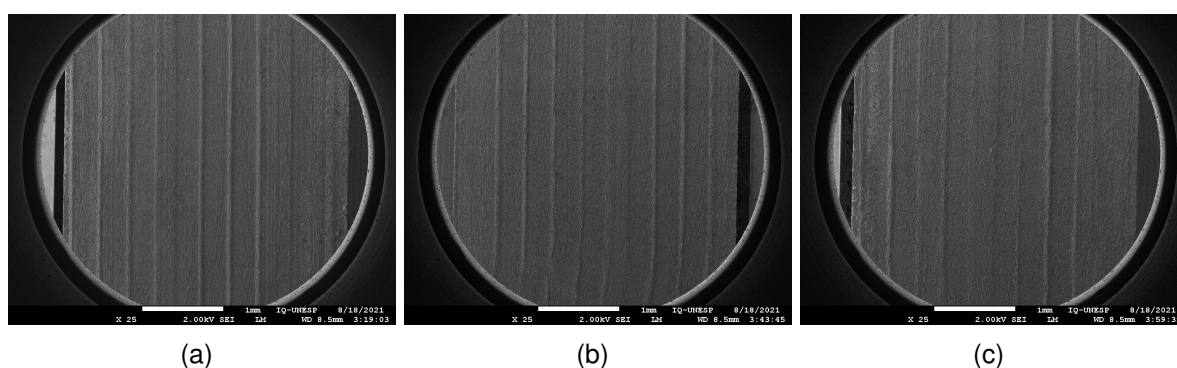
Amostra	Vf	RMS	Curtose	Fator de Crista
a	700	1,1272	3,1261	3,4962
b	800	1,3366	2,8854	3,0918
c	900	0,7248	3,2029	4,4227

Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

onde a, b e c são respectivamente as imagens das amostras referentes aos avanços de 600 mm/min, 700 mm/min e 800 mm/min ampliadas em 25 vezes. As imagens MEV ampliadas em 25x, são as únicas imagens em que é possível verificar, considerando o eixo horizontal, toda a superfície da peça usinada, com espessura das amostras sendo de 3mm. Dessa forma para uma análise mais efetiva das imagens geradas durante a análise MEV, serão verificados além das Figuras 17 e 18, o gráfico rugosidade análise de superfície das amostras a, b e c ampliadas em 25x, conforme figuras 19, 20 e 21.

De acordo com as imagens adquiridas na Figura 17, é possível correlacionar, visualmente, os diferentes parâmetros de usinagem adotados, e por consequência as diferentes tipos de vibrações de máquina imposta ao sistema com a respectiva qualidade do acabamento superficial das peças usinadas. O sistema vibratório presente durante o fresamento com os parâmetro de avanço de 700mm/min e 800 mm/min mostraram-se os mais eficientes, pois é possível verificar nas Figura 17 b e 17 c, um acabamento superficial com imperfeições de usinagem muito menores do que as observadas na Figura 17 a.

Figura 17 – Análise MEV superfície amostra a, b e c ampliada em 25x.

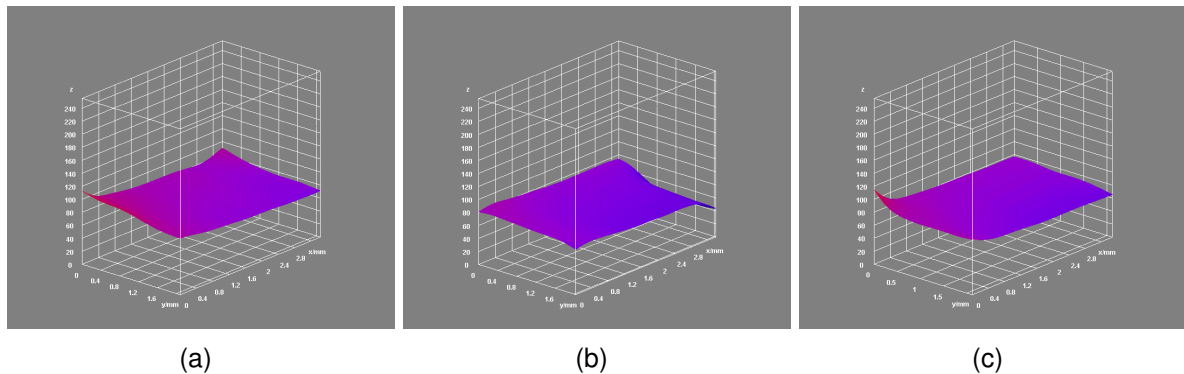


Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

Na Figura 18 é possível verificar graficamente em 3D as características das superfícies usinadas das amostras a, b e c considerando a cor avermelhada como os picos de rugosidade, é possível verificar que a Figura 18 a e c, apresentaram picos de rugosidade mais acentuados e presentes em boa parte da superfície analisada, já a

Figura 18 b, apresentou um pico de rugosidade bem menor.

Figura 18 – Análise MEV 3D superfície amostra a, b e c ampliada em 25x.



Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

A partir do recurso *Plot Profile* do *ImageJ*, é possível analisar graficamente os picos de rugosidade considerando a escala de cinza presente nas imagens obtidas durante o ensaio MEV (Figuras 19, 20 e 21), onde se apresenta respectivamente as amostras a, b e c. É possível observar que dentre as 3 amostras ensaiadas a amostra a, apresentou uma maior oscilação entre picos e vales de rugosidade ao longo da amostra, já as amostras b e c apresentou uma oscilação concentrada entre 60 e 130 na escala de cinza, o que significa uma qualidade superficial com menor rugosidade. Para um entendimento quanto a qualidade superfície usinada a Tabela 4, apresenta os dados calculados via *ImageJ* referente ao parâmetro de rugosidade identificado nas Figuras 19, 20 e 21.

Ao comparar o gráfico rugosidade análise de superfície amostra a ampliada em 25x, com o gráfico sinais de aceleração coletados durante os experimentos (Figura 15) é possível identificar que os picos mais acentuados de vibração de máquina, influenciam diretamente no aumento da rugosidade da superfície ensaiada, já picos menores e menos espaçados de vibração de máquina geram uma qualidade superficial com menor rugosidade a peça final.

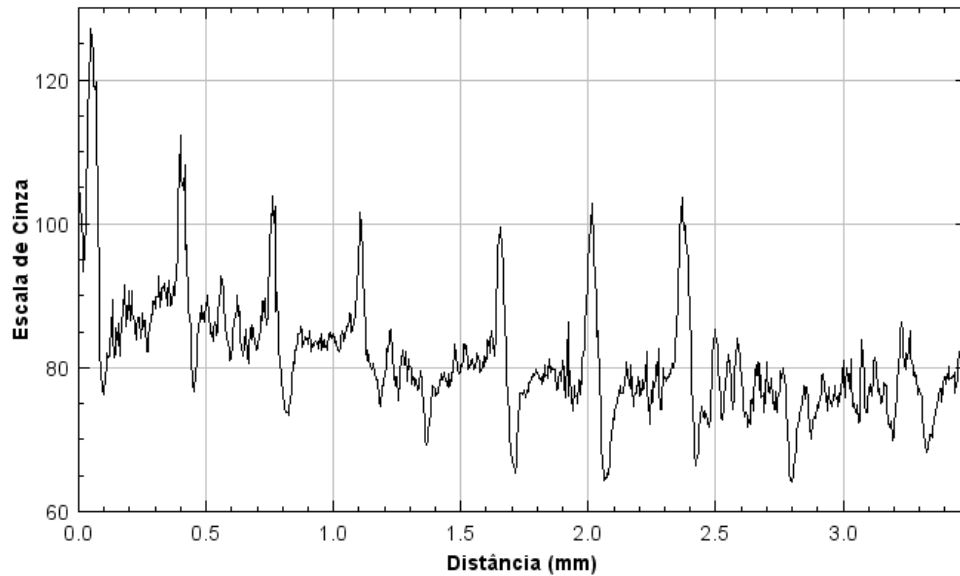
Tabela 4 – Dados calculados de rugosidade das superfícies usinadas ampliada em 25x.

Amostra	Vf	Rq	Ra	Rsk	Rku
a	700	250.236	246.048	1.012	1.031
b	800	250.941	247.439	1.009	1.025
c	900	251.081	247.716	1.009	1.024

Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

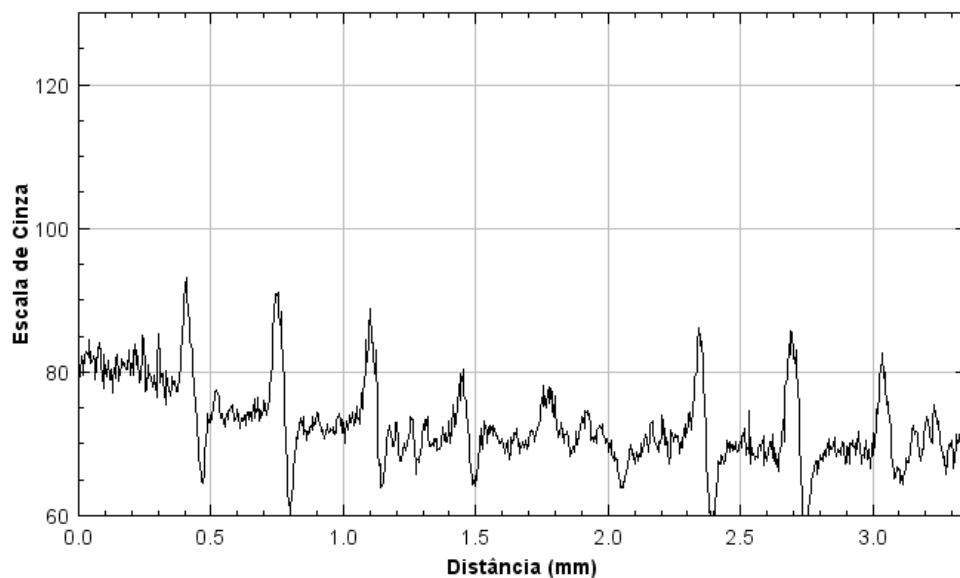
As Figuras 22 e 23 apresentam respectivamente as imagens das amostras a, b e

Figura 19 – Gráfico rugosidade análise de superfície amostra a ampliada em 25x.



Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

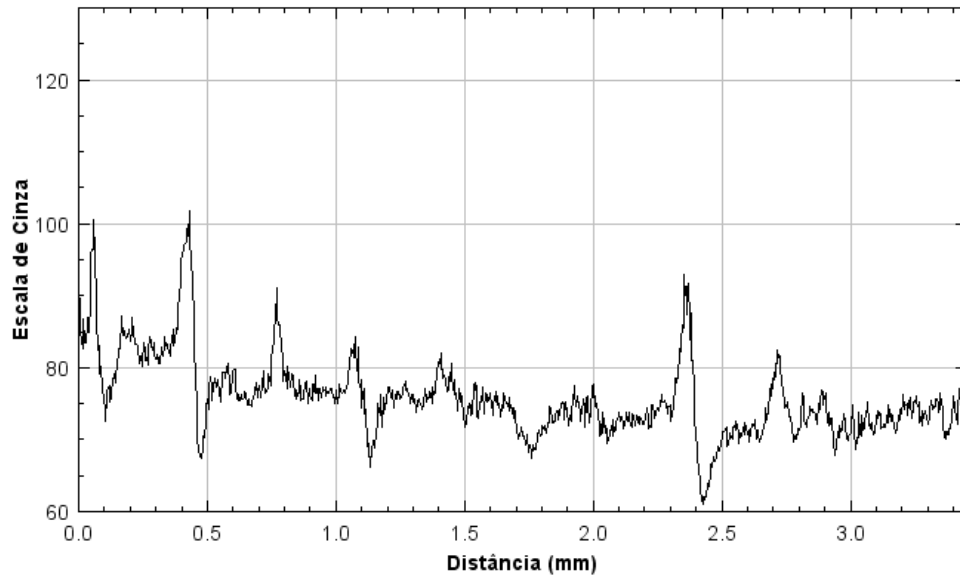
Figura 20 – Gráfico rugosidade análise de superfície amostra b ampliada em 25x.



Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

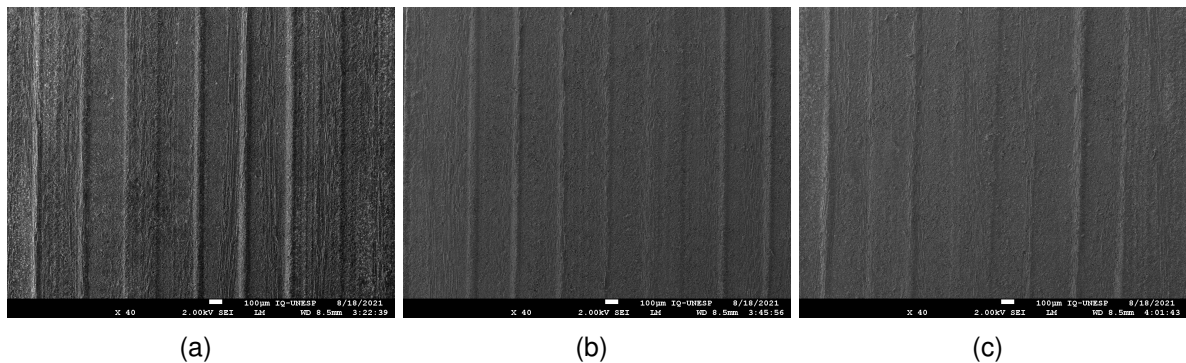
c referentes aos avanços de 600, 700 e 800 mm/min ampliadas em 40 vezes e em 80 vezes, nelas é possível verificar que a amostra a apresenta um acabamento superficial inferior, tomando-se como referência as ranhuras verticais que se apresentam extremamente acentuadas, já nas amostras b e, as ranhuras verticais estão menos acentuadas o que acaba por evidenciar uma qualidade superficial melhor com menores picos de rugosidade.

Figura 21 – Gráfico rugosidade análise de superfície amostra c ampliadas em 25x.



Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

Figura 22 – Análise MEV superfície amostra a, b e c ampliada em 40x.

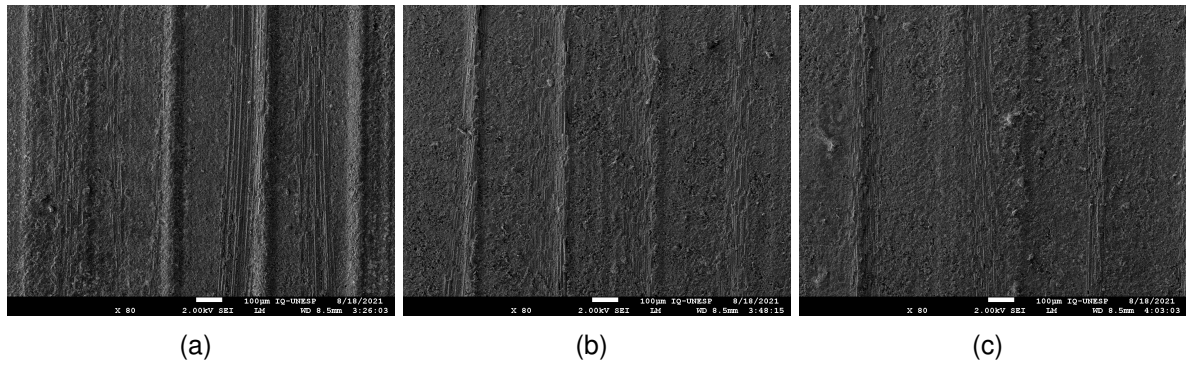


Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

A Figura 24 apresenta respectivamente as imagens das amostras a, b e c referentes aos avanços de 600, 700 e 800 mm/min ampliadas em 200 vezes, onde é possível verificar que as amostras a e b ainda apresentam apresentam ranhuras verticais, já a amostra c, as ranhuras verticais são quase que imperceptíveis, dessa forma é possível avaliar que a amostra c possui os menores picos de rugosidade superficial, o que acaba por garantir a superfície usinada uma melhor qualidade da superfície usinada.

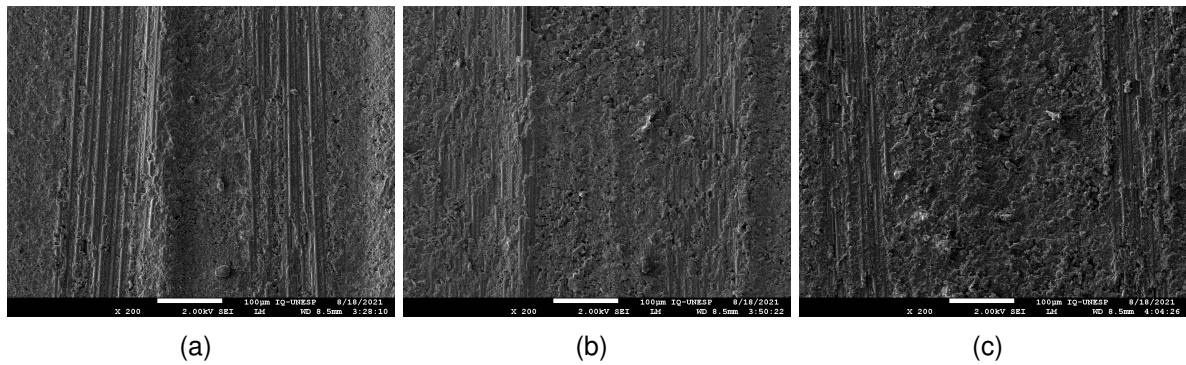
A Figura 25 apresenta respectivamente as imagens das amostras a, b e c referentes aos avanços de 600, 700 e 800 mm/min ampliadas em 1000 vezes, nesta imagem já há condições de se avaliar a estrutura da superfície usinada microscopicamente, sendo possível identificar vazios, destacados em tom de preto escuro, causados pela

Figura 23 – Análise MEV superfície amostra a, b e c ampliada em 80x.



Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

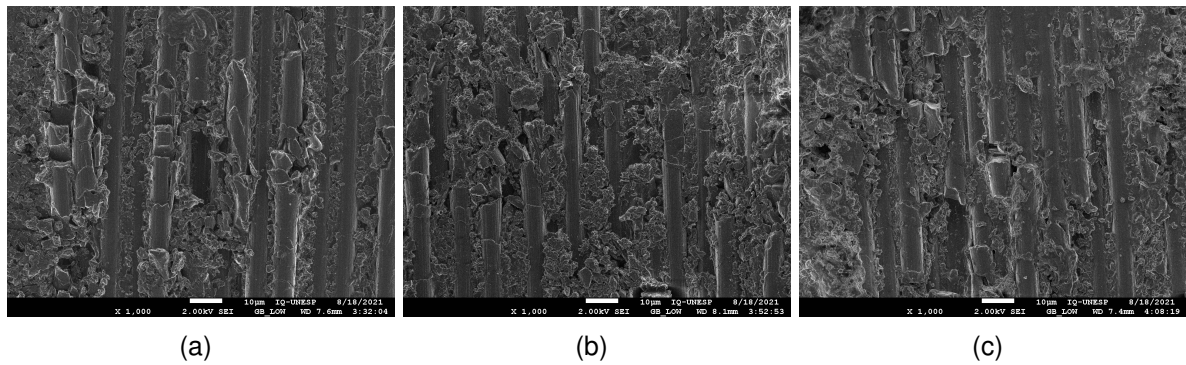
Figura 24 – Análise MEV superfície amostra a, b e c ampliada em 200x.



Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

delaminação durante o processo de usinagem. Sendo possível identificar uma área maior de vazios na amostra a, corroborando para interpretar que na amostra a, os picos de rugosidade foram maiores do que na amostra b e c, o que acabou por viabilizar o processo de delaminação da amostra usinada.

Figura 25 – Análise MEV superfície amostra a, b e c ampliada em 1000x.



Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

5 Conclusões

Por meio dos dados coletados de vibração de máquina e ensaios MEV realizados nas superfícies usinados, foi possível identificar como a vibração de máquina é capaz de influenciar de forma direta na qualidade da superfície final usinada e no surgimento da delaminação. O experimento evidenciou que diferentes parâmetros de corte utilizados no processo de fresamento, especificamente a velocidade de avanço, impõe ao sistema características diferentes de vibração de máquina para cada velocidade de avanço utilizada, tornando possível verificar uma correlação da vibração de máquina, com diferentes acabamentos na superfície final de usinagem. estabelecendo critérios e relações que podem propiciar o desenvolvimento de processo de usinagem do CFRP mais eficientes.

Os estudos apresentados evidenciaram que taxas menores de velocidade de avanço impõe ao sistema uma característica de vibração de máquina com maiores picos, a análise MEV possibilitou identificar que picos maiores de vibração de máquina resultam em uma qualidade final da superfície usinada inferior. Foi identificado uma tendência de que o aumento da velocidade de avanço influencia de forma positiva a qualidade final da superfície usinada, onde os picos de oscilação da vibração de máquina acabam se ordenando e o período de oscilação diminui gerando uma rugosidade superficial menor e menores taxas de delaminação do material composto.

O experimento possibilitou também a coleta de dados em tempo real, junto a um sistema de aquisição dos mesmos, permitindo desenvolvimentos e estudos do processo de usinagem de compósitos, o que garante para a comunidade científica, subsídios para estudos futuros e melhorias em processo de usinagem de compósitos considerando como parâmetros de entrada, a vibração de máquina e parâmetros de saída, a qualidade do acabamento superficial da peça usinada.

Oportunidades futuras:

- 1 - Desenvolver um método de monitoramento da vibração de máquina durante

o processo produtivo por IoT, isso daria subsidio para que dentro de determinadas faixas de vibração maquina, o processo produtivo poderia ser controlado acionando ou não intervenções operacionais;

2 - Desenvolver estudo para identificar qual a taxa máximo de avanço será possível para garantir integridade superficial à peça usinada e

3 - Desenvolver estudos para identificar qual ou quais ferramentas de corte com diferentes geometrias de corte poderiam ser utilizadas no processo de usinagem de CFRP para garantir integridade superficial à peça usinada.

Referências

AAMIR, M.; GIASIN, K.; TOLOUEI-RAD, M.; VAFADAR, A. A review: Drilling performance and hole quality of aluminium alloys for aerospace applications. **Journal of Materials Research and Technology**, Elsevier, v. 9, n. 6, p. 12484--12500, 2020.

ABHISHEK, K.; DATTA, S.; MAHAPATRA, S. S. Optimization of thrust, torque, entry, and exist delamination factor during drilling of cfrp composites. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, Springer, v. 76, n. 1, p. 401--416, 2015.

ABNT. **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**. [S.I.]: ABNT, 2013.

CALLISTER, W. D.; RETHWISCH, D. G. **Fundamentals of materials science and engineering: an integrated approach**. [S.I.]: John Wiley & Sons, 2020.

CAMPBELL, F. C. **Manufacturing processes for advanced composites**. [S.I.]: elsevier, 2003.

CARLSSON, L. A.; ADAMS, D. F.; PIPES, R. B. **Experimental characterization of advanced composite materials**. [S.I.]: CRC press, 2014.

CCDNPN LIEC. **Microscópio eletrônico de alta resolução de emissão por campo**. 2021. Disponível em: <<https://ccdnlma.wordpress.com/estrutura/>>. Acesso em: 26 junho 2021.

CHEN, T.; WANG, D.; GAO, F.; LIU, X. Experimental study on milling cfrp with staggered pcd cutter. **Applied Sciences**, Multidisciplinary Digital Publishing Institute, v. 7, n. 9, p. 934, 2017.

CHEN, T.; XIANG, J.; GAO, F.; LIU, X.; LIU, G. Study on cutting performance of diamond-coated rhombic milling cutter in machining carbon fiber composites. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, Springer, v. 103, n. 9, p. 4731--4737, 2019.

CHOUHAN, H.; SINGH, D.; PARMAR, V.; KALYANASUNDARAM, D.; BHATNAGAR, N. Laser machining of kevlar fiber reinforced laminates--effect of polyetherimide versus polypropylene matrix. **Composites Science and Technology**, Elsevier, v. 134, p. 267--274, 2016.

COLLIGAN, K.; RAMULU, M. et al. The effect of edge trimming on composite surface plies. **Manufacturing Review(USA)**, v. 5, n. 4, p. 274--283, 1992.

DINIZ, A.; MARCONDES, F.; COPPINI, N. **Tecnologia da Usinagem dos Materiais**. [S.l.]: São Paulo, Editora Artliber, 2014.

FERRARESI, D. **Usinagem dos metais: Fundamentos da usinagem dos metais**. [S.l.]: Editôra Edgard Blücher, 1970.

FORCELLINI, F. A.; ROZENFELD, H.; AMARAL, D.; TOLEDO, J.; SILVA, S.; ALLIPRANDINI, D.; SCALICE, R. Gestão de desenvolvimento de produtos: uma referência para a melhoria do processo. **São Paulo: Saraiva**, v. 30, 2006.

GROOVER, M. P. **Introdução aos processos de fabricação**. [S.l.]: Rio de Janeiro, Editora Grupo Gen-LTC, 2019.

GRZESIK, W. **Advanced machining processes of metallic materials: theory, modelling and applications**. [S.l.]: Elsevier, 2008.

HSISSOU, R.; SEGHIRI, R.; BENZEKRI, Z.; HILALI, M.; RAFIK, M.; ELHARFI, A. Polymer composite materials: A comprehensive review. **Composite Structures**, Elsevier, p. 113640, 2021.

LAM, J.; KATTI, P.; BIETE, M.; MUNGAI, M.; ASHSHAREEF, S.; NEIKIRK, K.; LOPEZ, E. G.; VUE, Z.; CHRISTENSEN, T. A.; BEASLEY, H. K. et al. A universal approach to analyzing transmission electron microscopy with imagej. **Cells**, Multidisciplinary Digital Publishing Institute, v. 10, n. 9, p. 2177, 2021.

LIU, G.; QIAN, X.; CHEN, H.; GAO, F.; CHEN, T. Development of a staggered pcd end mill for carbon fiber reinforced plastic. **Applied Sciences**, Multidisciplinary Digital Publishing Institute, v. 7, n. 3, p. 245, 2017.

MALLICK, P. K. **Fiber-reinforced composites: materials, manufacturing, and design**. [S.l.]: CRC press, 2007.

MARTINS, F. R. **Caracterização do fresamento de chapas de compósito polímero reforçado com fibras de carbono (PRFC)**. Thesis (Doutorado) --- Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Mecânica, Campinas, SP, Campinas, Brasil, 2014.

MATHIVANAN, N. R.; MAHESH, B.; SHETTY, H. A. An experimental investigation on the process parameters influencing machining forces during milling of carbon and glass fiber laminates. **Measurement**, Elsevier, v. 91, p. 39--45, 2016.

MICHALCOVÁ, L.; KADLEC, M. Carbon/epoxy composite delamination analysis by acoustic emission method under various environmental conditions. **Engineering Failure Analysis**, Elsevier, v. 69, p. 88--96, 2016.

MONROY, C. R.; ARTO, J. R. V. Analysis of global manufacturing virtual networks in the aeronautical industry. **International Journal of Production Economics**, Elsevier, v. 126, n. 2, p. 314--323, 2010.

MUHAMMAD, B. B.; WAN, M.; FENG, J.; ZHANG, W.-H. Dynamic damping of machining vibration: a review. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, Springer, v. 89, n. 9-12, p. 2935--2952, 2017.

- NIKBAKT, S.; KAMARIAN, S.; SHAKERI, M. A review on optimization of composite structures part i: Laminated composites. **Composite Structures**, Elsevier, v. 195, p. 158--185, 2018.
- NOVASKI, O. **Custos de usinagem**. [S.l.]: Editora da UNICAMP, 1991.
- OPPENHEIM, A.; SCHAFER, R.; BUCK, J. Discrete-time signal processing: Prectice hall. **Englewood Cliffs, New Jersey**, 1989.
- OZKAN, D.; PANJAN, P.; GOK, M. S.; KARAOGLANLI, A. C. Experimental study on tool wear and delamination in milling cfrps with tialn-and tin-coated tools. **Coatings**, Multidisciplinary Digital Publishing Institute, v. 10, n. 7, p. 623, 2020.
- RANA, S.; FANGUEIRO, R. **Advanced composite materials for aerospace engineering: Processing, properties and applications**. [S.l.]: Woodhead, 2016.
- RIAZ, S.; ELAHI, H.; JAVAID, K.; SHAHZAD, T. Vibration feature extraction and analysis for fault diagnosis of rotating machinery-a literature survey. **Asia Pacific Journal of Multidisciplinary Research**, v. 5, n. 1, p. 103--110, 2017.
- SHEIKH-AHMAD, J. Y. **Machining of polymer composites**. [S.l.]: Springer, 2009.
- SLACK, N.; CHAMBERS, S.; JOHNSTON, R. et al. **Administração da produção**. [S.l.]: Atlas São Paulo, 2009.
- TRENT, E. M.; WRIGHT, P. K. **Metal cutting**. [S.l.]: Butterworth-Heinemann, 2000.
- WANG, C.; CHENG, K.; RAKOWSKI, R.; GREENWOOD, D.; WALE, J. Comparative studies on the effect of pilot drillings with application to high-speed drilling of carbon fibre reinforced plastic (cfrp) composites. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, Springer, v. 89, n. 9, p. 3243--3255, 2017.
- WANG, H.; SUN, J.; ZHANG, D.; GUO, K.; LI, J. The effect of cutting temperature in milling of carbon fiber reinforced polymer composites. **Composites Part A: Applied Science and Manufacturing**, Elsevier, v. 91, p. 380--387, 2016.
- WANG, X. M.; ZHANG, L. An experimental investigation into the orthogonal cutting of unidirectional fibre reinforced plastics. **International journal of machine tools and manufacture**, Elsevier, v. 43, n. 10, p. 1015--1022, 2003.