

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS – UFSCAR**  
**CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E DE TECNOLOGIA – CCET**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA – PPGEMEC**

**JOSÉ OTÁVIO SAVAZZI**

**MÉTODO DE AVALIAÇÃO DA VIDA ÚTIL DE  
FERRAMENTA DE CORTE EM FRESAGEM REALIZADA  
POR ROBÔ EM MATERIAL COMPOSTO A PARTIR DA  
MEDIÇÃO DE VIBRAÇÕES MECÂNICAS**



**SÃO CARLOS**  
**2022**

JOSÉ OTÁVIO SAVAZZI

**MÉTODO DE AVALIAÇÃO DA VIDA ÚTIL DE FERRAMENTA DE CORTE EM  
FRESAGEM REALIZADA POR ROBÔ EM MATERIAL COMPOSTO A PARTIR DA  
MEDIÇÃO DE VIBRAÇÕES MECÂNICAS**

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. Sidney Bruce Shiki  
Coorientador: Prof. Dr. Gustavo Franco Barbosa

São Carlos  
2022

\*

José Otávio Savazzi

Método de avaliação da vida útil de ferramenta de corte em fresagem realizada por robô em material composto a partir da medição de vibrações mecânicas/ José Otávio Savazzi. – São Carlos, 2022-

72p. : il. (algumas color.) ; 30 cm.

Orientador: Prof. Dr. Sidney Bruce Shiki

Dissertação de mestrado – Universidade Federal de São Carlos – UFSCar

Centro de Ciências Exatas e de Tecnologia – CCET

Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica – PPGEMec, 2022.

1. Palavra-chave1. 2. Palavra-chave2. 2. Palavra-chave3. I. Orientador. II. Universidade xxx. III. Faculdade de xxx. IV. Título



# 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 Jose Otavio Savazzi, realizada em 23/02/2023.

### Comissão Julgadora:

Prof. Dr. Sidney Bruce Shiki (UFSCar)

Prof. Dr. Luis Antonio Oliveira Araujo (UFSCar)

Prof. Dr. Glauco Augusto de Paula Caurin (USP)

Dedico este trabalho a todos aqueles que lutam por um mundo melhor.

## AGRADECIMENTOS

O amor pode tudo. Não é ciumento, não se comporta indecentemente. Tudo espera. Tudo acredita. O amor vence tudo. (Apostolo Paulo).

Agradeço primeiramente a Deus que deu a mim a oportunidade de desenvolver esse trabalho, foi um tempo de amadurecimento.

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

Agradeço ao grande pilar da minha vida, a família, em especial aos queridos e amados pais, Edson e Silvia que através do amor incondicional e total doação impulsionam e alimentam a minha vida. À minha irmã Jéssica e aos meus sobrinhos, Pedro, João e Bento, a alegria de viver deles é contagiante, inspiradora e eles nos propiciam momentos inesquecíveis.

À minha querida e amada esposa Juliana, um ser humano iluminado que entrou em minha vida para mudar de vez a forma de ver o mundo, ela é a luz que ilumina os nossos caminhos. E, ao meu amado e querido filho Joaquim, este que veio ao mundo durante os estudos para esse desenvolvimento trazendo a alegria e mostrando o verdadeiro sentido da vida.

Agradeço ao professor Dr. Sidney Bruce Shiki que de forma muito sábia e serena direcionou esse trabalho. Ao coorientador professor Dr. Gustavo Franco Barbosa, obrigado. Também a todos os professores do programa de Pós-Graduação do Departamento de Engenharia Mecânica da UFSCar que em muito contribuíram para o desenvolvimento desse trabalho. Aos amigos do programa de pós graduação onde tivemos ótimos momentos e a demonstração real do espírito de equipe.

À EMBRAER que de forma excepcional apoia e incentiva o desenvolvimento e aprendizado de seus funcionários através da formação.

A todos os companheiros de trabalho que todos os dias estão envolvidos e balizaram as informações dos processos de manufatura que guiaram esse estudo.

Aos amigos que fiz ao longo da vida, em especial aos companheiros que conheci no ensino médio: Obrigado! .

*Existem muitas hipóteses em ciência que estão erradas. Isso é perfeitamente aceitável, elas são a abertura para achar as que estão certas.*

Carl Sagan

## RESUMO

O desenvolvimento de materiais e métodos utilizados na indústria de fabricação de aeronaves vem avançando a fim de fornecer uma aeronave confiável e principalmente mais leve. A utilização de materiais compósitos torna-se imprescindível, entretanto, o processamento deste tipo de material deve ser estudado para se obter a maior eficiência de fabricação e a melhor qualidade do produto. Atualmente, as ferramentas de controle e monitoramento de processos são integradas aos conceitos de Indústria 4.0 como internet das coisas, computação em nuvem, gêmeos digitais e outros. Nesse sentido, este estudo tem como objetivo avaliar a capacidade de um sistema montado com instrumentação de baixo custo em monitorar e informar sobre o estado das ferramentas utilizadas na usinagem de materiais compósitos com manipuladores robóticos. Essa tarefa é realizada a partir da análise das vibrações mecânicas do conjunto motor e ferramenta de corte, visando assim reduzir desperdícios e garantir a qualidade e integridade superficial das peças acabadas. A autoconsciência do processo é aprimorada pela combinação de algoritmos de processamento de sinais e técnicas estatísticas para auxiliar no monitoramento constante do desgaste da ferramenta. Nesse sentido, um modelo digital é constantemente atualizado visando a otimização do processo de corte.

**Palavras-chave:** Usinagem com robô, Desgaste de ferramenta, Vibrações, Material composto, Rugosidade.



## **ABSTRACT**

The development of materials and methods used in the aircraft manufacturing industry has been advancing to provide a reliable and mainly lighter aircraft. The use of composite materials becomes essential, however, the processing of this type of material must be studied to obtain the highest manufacturing efficiency and the best product quality. Presently, process control and monitoring tools are integrated into Industry 4.0 concepts such as the internet of things, cloud computing, digital twins and others. In this sense, this study aims to evaluate the capability of a system assembled with low-cost instrumentation to monitor and report on the state of the tools used in the machining of composite materials with robotic manipulators. This task is carried out based on the analysis of the mechanical vibrations of the motor and cutting tool assembly, thus aiming to reduce waste and guarantee the quality and surface integrity of the finished parts. Process self-awareness is enhanced by combining signal processing algorithms and statistical techniques to aid in constant monitoring of tool wear. In this sense, a digital model is constantly updated to optimize the cutting process.

**Keywords:** Robot machining, Tool wear, Vibrations, Composite material, Roughness.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Demanda de aeronaves para os próximos 20 anos. . . . .	15
Figura 2 – Receita com passageiros por quilômetro e valor do mercado. . . . .	16
Figura 3 – A importância relativa dos metais, polímeros, compósitos e cerâmicas em função do tempo. . . . .	17
Figura 4 – Materiais compostos típicos. . . . .	20
Figura 5 – Uso de material composto em estruturas aeronáuticas (a) Boeing 787 e (b) Airbus A380. . . . .	21
Figura 6 – Célula robótica. . . . .	28
Figura 7 – Dimensão corpo de prova e corte A-A do CDP. . . . .	29
Figura 8 – Etapas de preparo do CDP. . . . .	30
Figura 9 – Representação das ligações do sistema de aquisição de dados e posicionamento do acelerômetro no efetuador. . . . .	31
Figura 10 – Sistema de aquisição de dados montado. . . . .	31
Figura 11 – Diagrama esquemático do sensor ADXL335 com adição de capacitores. . . . .	32
Figura 12 – Visualização dos dados. . . . .	33
Figura 13 – Fluxograma da captura e processamento dos sinais de vibração. . . . .	34
Figura 14 – Desenho técnico da ferramenta de corte. . . . .	34
Figura 15 – Ferramentas para o experimento. . . . .	35
Figura 16 – Posicionamento do corpo de prova e direção do corte. . . . .	36
Figura 17 – Perfil do corpo de prova. . . . .	37
Figura 18 – Seções do corpo de prova. . . . .	38
Figura 19 – Nível de vibração das ferramentas em três corpos de prova no eixo x. . . . .	39
Figura 20 – Nível de vibração das ferramentas em três corpos de prova no eixo y. . . . .	39
Figura 21 – Nível de vibração das ferramentas em três corpos de prova no eixo z. . . . .	40
Figura 22 – Rugosímetro e CDPs. . . . .	42
Figura 23 – Rugosidade Ra dos CDPs. . . . .	43
Figura 24 – Rugosidade Rk dos CDPs. . . . .	43
Figura 25 – Arestas de corte horizontal e vertical. . . . .	44
Figura 26 – Arestas de corte das ferramentas. . . . .	44
Figura 27 – Raio das ferramentas de corte. . . . .	45
Figura 28 – Nível de vibração e raio da ferramenta. . . . .	46
Figura 29 – Nível de vibração e raio e rugosidade média. . . . .	46

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Análise bibliométrica. . . . .	27
Tabela 2 – Medição da ferramenta. . . . .	35
Tabela 3 – Parâmetros do procedimento experimental. . . . .	37
Tabela 4 – Dimensional dos corpos de prova. . . . .	41

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
CAD	Computer-aided design
CDP	Corpo de prova
CFRP	Carbon Fiber-Reinforced Plastic
CNC	Computerized Numerical Control
CPU	Central Processing Unit
DP	Diamante Policristalino
EWS	Early Warning System
FFT	Fast Fourier Transform
HHT	Hilbert–Huang Transform
ISO	International Organization for Standardization
IDE	Integrated development environment
IIoT	Industrial Internet of things
IoT	Internet of things
MAVAS	Monitoring and Analysis of the Vibration Acceleration Spectrum
MEMS	Micro-electromechanical System
OLP	Offline Programming
PIB	Produto Interno Bruto
PMU	Phasor Measurement Unit
PRFC	Polímeros Reforçados com Fibra de Carbono
PSD	Power Spectral Density
RAM	Random Access Memory
RMS	Root Mean Square
ROM	Read Only Memory

RPM	Rotações por minutor
SCADA	Supervisory Control and Data Acquisition
SHM	Structural Health Monitoring
SO	Sistema Operacional
TCM	Tool condition monitoring
WSN	Wireless Sensor Network
WPF	Wavelet Packet Transform

## LISTA DE SÍMBOLOS

$N$	Tamanho total da amostra
$Vf$	Velocidade de avanço
$x$	Valor eficaz do sinal
$X(k)$	Transformada discreta de Fourier no domínio da frequência
$x(n)$	Sinal discreto no domínio do tempo

## SUMÁRIO

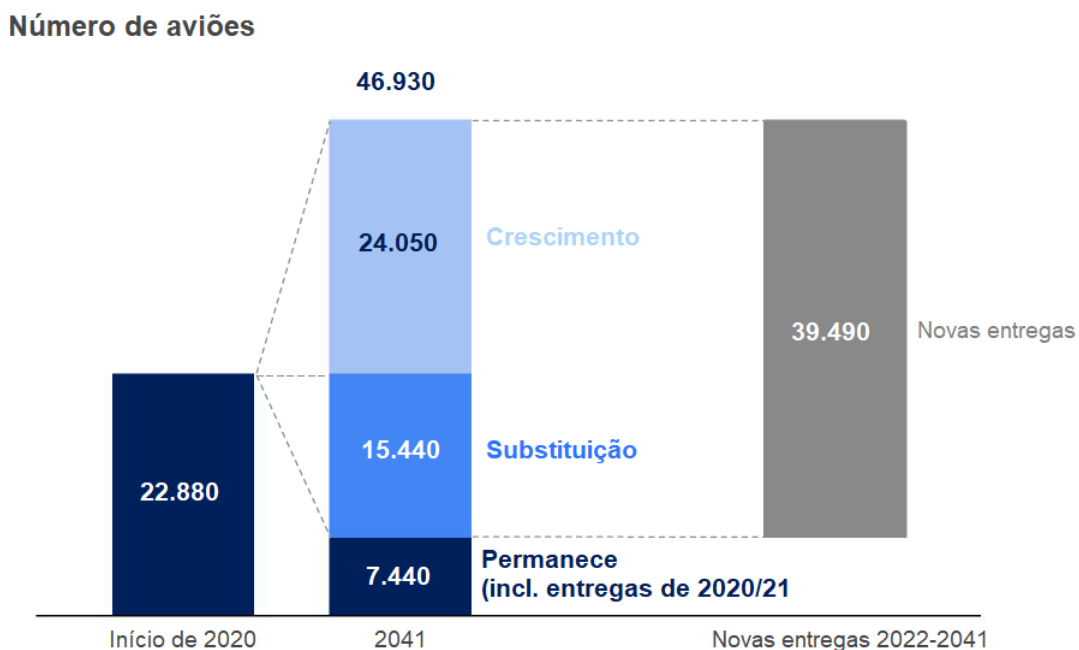
<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b> . . . . .	<b>15</b>
1.1	MOTIVAÇÃO . . . . .	17
1.2	OBJETIVOS GERAIS . . . . .	18
1.3	OBJETIVOS ESPECÍFICOS . . . . .	18
<b>2</b>	<b>REVISÃO DA LITERATURA</b> . . . . .	<b>20</b>
2.1	MATERIAL COMPOSTO . . . . .	20
2.2	USINAGEM COM ROBÔ . . . . .	22
2.3	TEMPO DE VIDA DE FERRAMENTA DE CORTE . . . . .	22
2.4	INSTRUMENTAÇÃO DE BAIXO CUSTO . . . . .	24
<b>3</b>	<b>MATERIAIS E MÉTODOS</b> . . . . .	<b>28</b>
3.1	CORPOS DE PROVA . . . . .	29
3.2	SISTEMA DE AQUISIÇÃO DE DADOS . . . . .	30
3.3	CAPTURE E PROCESSAMENTO DOS SINAIS DE VIBRAÇÃO . . . . .	32
3.4	FERRAMENTA DE CORTE . . . . .	34
3.5	PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL . . . . .	36
<b>4</b>	<b>RESULTADOS</b> . . . . .	<b>38</b>
4.1	ANÁLISE DOS DADOS DE VIBRAÇÃO . . . . .	38
4.2	DIMENSÕES FINAIS DOS CORPOS DE PROVA . . . . .	40
4.3	RUGOSIDADE SUPERFICIAL . . . . .	41
4.4	ANÁLISE DO DESGASTE DA FERRAMENTA DE CORTE . . . . .	44
<b>5</b>	<b>CONCLUSÃO</b> . . . . .	<b>47</b>
	<b>REFERÊNCIAS</b> . . . . .	<b>49</b>
	<b>APÊNDICE A – CÓDIGO UTILIZADO PARA CAPTURE E ANÁLISE DE DADOS DE VIBRAÇÕES</b> . . . . .	<b>53</b>
	<b>ANEXO A – ESPECIFICAÇÃO DO PAINEL SANDUÍCHE</b> . . . . .	<b>60</b>
	<b>ANEXO B – ESPECIFICAÇÃO DA RESINA EPÓXI DE PREENCHIMENTO DE BORDA</b> . . . . .	<b>63</b>
	<b>ANEXO C – DESENHO DA FERRAMENTA</b> . . . . .	<b>71</b>

## 1 INTRODUÇÃO

Desde os primeiros dias da aviação comercial, no início do século XX, os engenheiros tiveram que enfrentar o desafio de fornecer estruturas leves mas capazes de suportar grandes esforços. Sendo então estas utilizadas na fabricação de aeronaves, cumprindo assim com várias funções como para um transporte seguro e rápido de passageiros e cargas por longas distâncias (BREUER, 2016).

Notadamente a utilização da aviação para o transporte de pessoas e cargas é crescente. Um estudo realizado pela Airbus, maior fabricante de aeronaves da atualidade em quantidade de aeronaves entregues (OESTERGAARD, 2022), mostra que a demanda para novas aeronaves nos próximos 20 anos será por volta de 40 mil unidades como mostrado na Figura 1 (AIRBUS, 2022).

Figura 1 – Demanda de aeronaves para os próximos 20 anos.



Fonte: Adaptado de Global Market Forecast. Airbus, 2022.

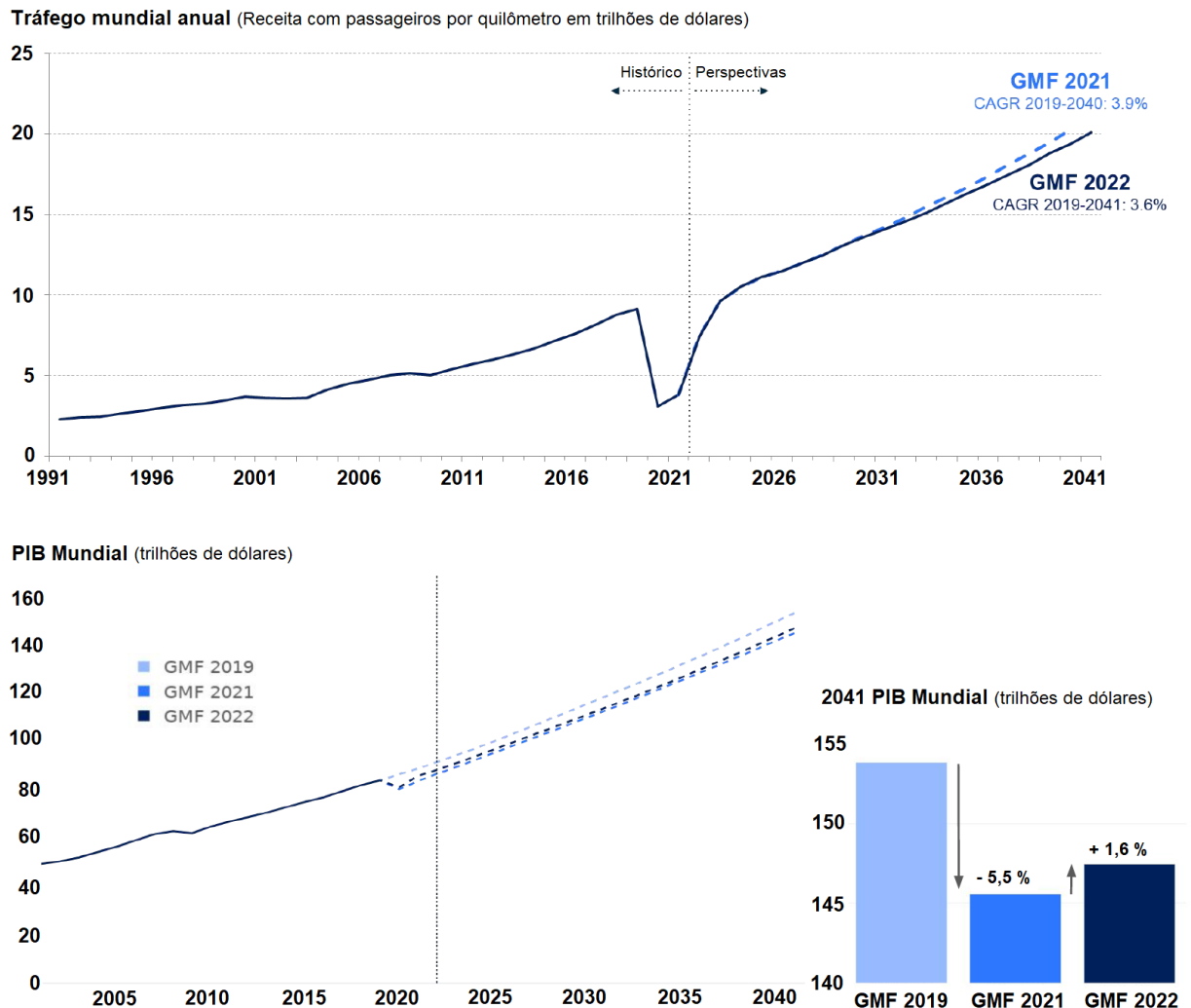
Outro fato relevante é que o mercado da aviação demonstra ser bastante resiliente às crises crescendo constantemente ao longo do tempo, como pode ser observado na Figura 2. Há uma previsão de aumento de 3,6% por ano nas receitas com passageiros por quilômetro nos próximos vinte anos.

O mercado da aviação ainda está enfrentando os efeitos da maior crise sanitária mundial da nossa época, a pandemia da doença do coronavírus (COVID-19), o que vem exigindo mudanças relevantes em bio segurança para viabilizar um caminho e retomada e crescimento



sustentável do mercado da aviação (Dube, Nhamo e Chikodzi (2021)). Observamos também o forte impacto no PIB mundial com a pandemia o que implica diretamente a aviação e todo seu mercado.

Figura 2 – Receita com passageiros por quilômetro e valor do mercado.



Fonte: Adaptado de Global Market Forecast. Airbus, 2022.

Assim é possível notar a alta relevância da indústria aeronáutica e toda sua cadeia produtiva gerando bilhões de dólares por ano na economia global. Cada vez mais as empresas estão enfrentando uma competição acirrada e um ritmo acelerado de negócios sendo necessário aumentar a produtividade, em especial, dos processos fabris. Com isso, a manufatura enfrenta a necessidade de reduzir os ciclos de produção de seus produtos. Para se obter um melhor aproveitamento desse mercado, é fundamental que os métodos e processos de manufatura das aeronaves sejam eficientes, evitando ao máximo os desperdícios e cumprindo com a excelência na fabricação desses produtos (D'ANTONIO; BEDOLLA; CHIABERT, 2017).

O presente trabalho tem fundamento nessa necessidade de processos de manufatura com maior eficiência em relação aos processos atuais, contribuindo com a segurança operacional e

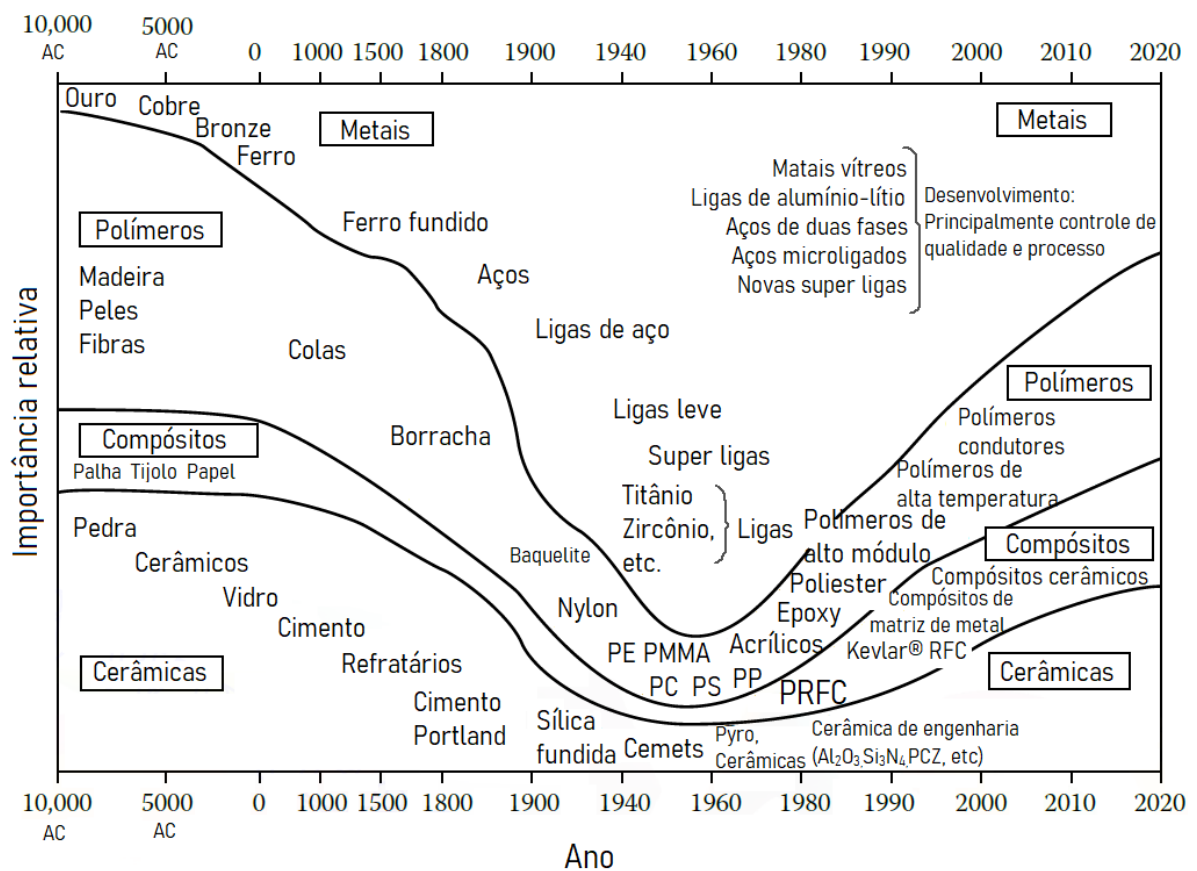
com a economia no uso dos recursos produtivos através da máxima extração das capacidades instaladas na manufatura de mobiliário aeronáutico no processamento de material compósito.

### 1.1 MOTIVAÇÃO

Os materiais estruturais podem ser divididos em basicamente quatro categorias: metais, polímeros, cerâmicas e compósitos. Os compósitos, que são constituídos de dois ou mais materiais combinados em uma unidade estrutural, são normalmente constituídos de várias combinações desses materiais dessas outras três categorias (GIBSON, 2016).

Nesse contexto histórico apresentado por Ashby et al. (1987) representado na Figura 3, é mostrado claramente a crescente importância dos materiais poliméricos e compósitos, enquanto a utilização de materiais metálicos apresenta um decaimento considerável. Isso se deve por conta das propriedades desejáveis que não podem ser obtidas por nenhum dos materiais constituintes tradicionais. No caso da utilização nas aeronaves é desejável uma alta resistência mecânica aliada à baixa massa.

Figura 3 – A importância relativa dos metais, polímeros, compósitos e cerâmicas em função do tempo.



Fonte: Adaptado de Ashby (1987).

A utilização de compósitos e polímeros para a manufatura de peças para a indústria

aeronáutica é crescente, o que faz com que seja necessário o aprimoramento dos processos de fabricação.

Em meio a esse cenário da manufatura aeronáutica, o presente trabalho propõe-se à investigar técnicas para o monitoramento do desgaste em ferramentas de corte usadas para o processamento de material composto através de manipuladores robóticos. Sinais de vibrações mecânicas são capturados a partir de sensores microeletromecânicos de baixo-custo (MEMS, do inglês *microelectromechanical systems*) durante o processo para um acompanhamento indireto da evolução do desgaste. Atributos destes sinais são então calculados para se analisar a evolução dessas oscilações mecânicas ao longo da vida útil da ferramenta. Ferramentas matemáticas são utilizadas para correlacionar o comportamento do desgaste com as vibrações mecânicas. Além disso, a integridade superficial das peças geradas é avaliada de modo à correlacionar o comportamento dinâmico do sistema com os produtos gerados pelo processo.

Com isso, espera-se desenvolver uma instrumentação de baixo custo que permita monitorar o estado de utilização em tempo real de uma ferramenta para fresamento de material composto mantendo a qualidade do produto e aumentando a produtividade.

## 1.2 OBJETIVOS GERAIS

Este trabalho de pesquisa tem por objetivo avaliar a capacidade de um sistema montado com instrumentação de baixo custo em monitorar e informar sobre o estado da ferramenta de corte utilizadas durante o processo de fresamento robótico de material composto, aplicado na fabricação de mobiliário aeronáutico.

O estudo se dará através do monitoramento e análise das vibrações mecânicas do conjunto motor e ferramenta de corte, potencializando o uso dessas ferramentas, reduzindo assim o consumo da matéria prima e garantindo a qualidade e a integridade superficial das peças acabadas.

## 1.3 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Motivado pela necessidade de se aumentar a produtividade e diminuir desperdícios nos processos de usinagem em materiais compósitos feitos na indústria aeronáutica, pode se listar os seguintes objetivos específicos desta pesquisa:

- Elaborar uma revisão da literatura a respeito de técnicas para o monitoramento de desgaste de ferramentas de corte para o fresamento de material composto;
- Implementar um protótipo de um sistema de medição baseado em *hardware* de baixo-custo e sensores MEMS a fim de verificar a viabilidade da proposta de monitoramento;
- Efetuar o acompanhamento do desgaste e da vida útil da ferramenta de corte de forma indireta a partir de medições de vibrações mecânicas;

- Compreender os efeitos nocivos dessas oscilações mecânicas na qualidade superficial das peças geradas.

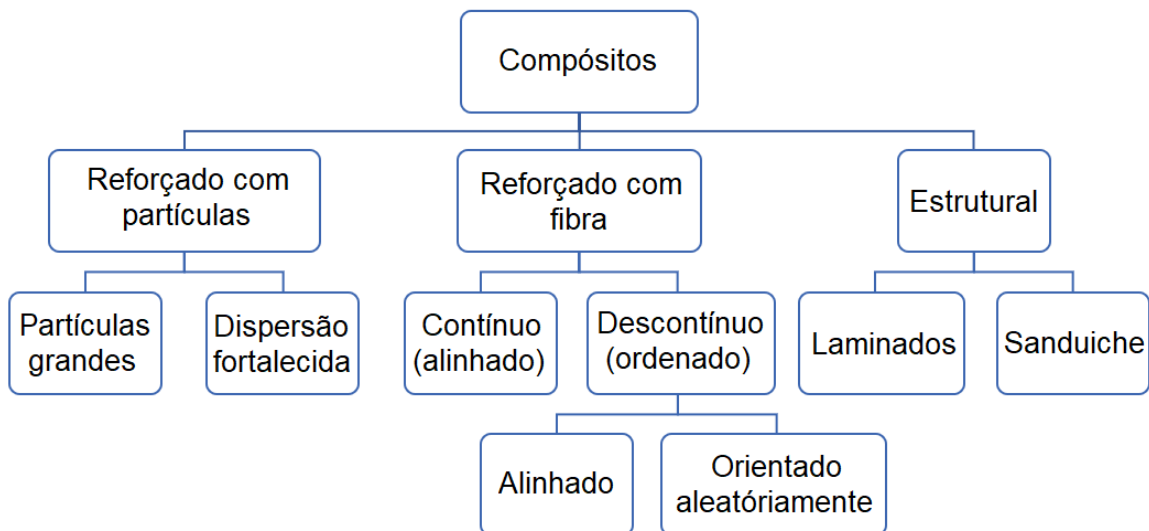
## 2 REVISÃO DA LITERATURA

Para que se possa avaliar a capacidade de um sistema com instrumentação de baixo custo em monitorar e informar sobre o estado da ferramenta de corte durante o uso, é necessário conhecer a natureza do material a ser usinado, suas técnicas para seu processamento, também é necessário conhecer o funcionamento e caracterizar os equipamentos envolvidos no processo. Nesse capítulo é apresentado os principais estudos que permeiam os objetivos desse trabalho.

### 2.1 MATERIAL COMPOSTO

O material composto, em uma das suas definições, é constituído por dois elementos: um é a fibra, que é responsável por inferir resistência mecânica e o outro é o aglutinante para a união dos constituintes (ABRAMOVICH, 2017). A combinação dos dois materiais frequentemente resulta em propriedades melhores do que apresentada individualmente por cada material. As maiores vantagens de um material composto comparado aos materiais comuns, como metal ou plástico, são sua grande resistência mecânica e sua rigidez aliado à sua baixa massa específica. Os vários tipos de compósitos são geralmente referenciados na literatura, em um diagrama de bloco como mostrado na Figura 4.

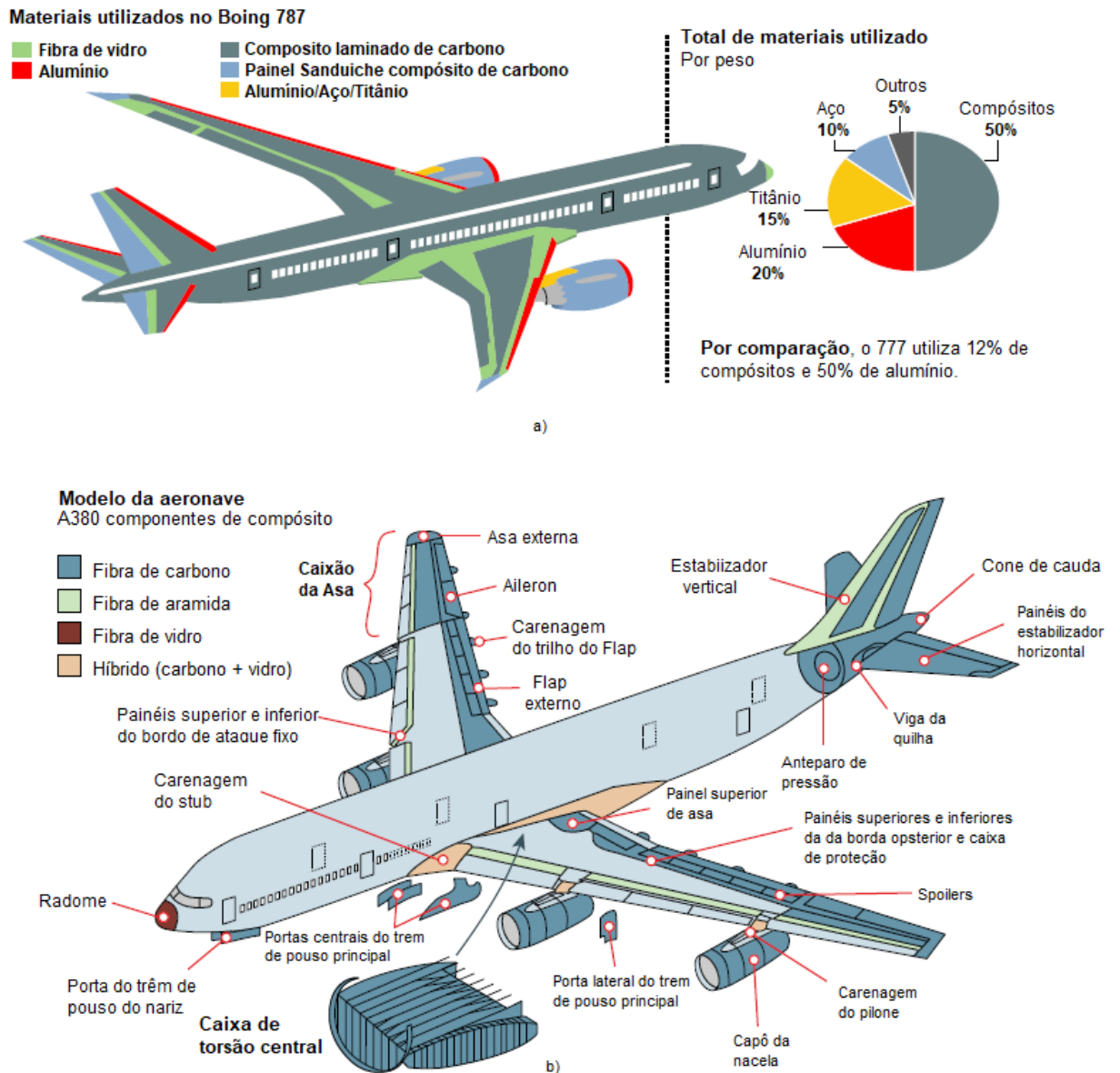
Figura 4 – Materiais compostos típicos.



Fonte: Adaptado de Abramovich (2017).

A utilização dos materiais compostos é impulsionada principalmente pelo setor aeroespacial, em grande parte pela sua presença nas estruturas de aviões modernos. Um exemplo clássico disso reside no avião Boeing 787 ou o Airbus A380 como ilustrado na Figura 5. Nessa estrutura, diversos componentes são fabricados a partir de fibra de carbono, vidro e aramida (ABRAMOVICH, 2017).

Figura 5 – Uso de material composto em estruturas aeronáuticas (a) Boeing 787 e (b) Airbus A380.



Fonte: Adaptado de Abramovich (2017).

Na revisão abrangente sobre materiais compósitos avançados apresentada por Hsissou et al. (2021), são investigados os polímeros termoplásticos, elastoméricos e termo-endurecíveis. Os autores concluem que os materiais compósitos termo-endurecíveis apresentam excelente resistência mecânica e térmica em altas temperaturas, já os compósitos tecnológicos reforçado por fibra de vidro e carbono apresentam excelente resistência à tração e compressão. As mais diversas industria tem investigado e empregado o uso desses materiais.

## 2.2 USINAGEM COM ROBÔ

A utilização de robôs para o processo de usinagem vem crescendo ao longo do tempo por conta do custo inferior desses sistemas quando comparado com de máquinas CNC, além da característica que os mesmos tem de poderem atender à um grande envelope de trabalho (XIONG; DING; ZHU, 2019).

Apesar disso, existem limitações na performance desse tipo de equipamento por conta da sua forma construtiva, como consequência é comum o aparecimento vibrações auto-excitadas, conhecidas como *chatter*, durante a usinagem robótica (HUYNH et al., 2020). Esse problema é particularmente grave em comparação aos casos onde se utilizam máquinas CNC convencionais, por conta da baixa rigidez das juntas dos robôs, podendo as forças do processo que estimulam a estrutura levarem a instabilidades (BARBOSA; SHIKI; SAVAZZI, 2019). Como consequência verifica-se um tempo de vida mais curto da ferramenta.

Huynh et al. (2020) realizaram uma análise dinâmica de um robô industrial instalando acelerômetros no flange, e excitando 23 diferentes pontos da estrutura do robô através de testes de impacto, com os dados e análises observou que o modelo criado pode mostrar antecipadamente qual a melhor postura para a execução do processo de fresagem.

Zhang et al. (2021) apresentaram um estudo sobre o uso de robôs híbridos para operações de corte em materiais plásticos reforçados com fibra de carbono unidirecional (UD-CFRP). O UD-CFRP é um tipo de material composto amplamente utilizado nas indústrias aeroespacial, automotiva e outras devido à sua alta resistência e baixo peso. Os autores analisaram a resposta à vibração e a qualidade de usinagem de um robô híbrido realizando operações de corte em materiais UD-CFRP. Os resultados do estudo mostraram que o robô híbrido foi capaz de obter boa qualidade de usinagem com baixo nível de vibração. Os autores também realizaram uma análise da temperatura e rugosidade da superfície durante o processo de corte e descobriram que o robô híbrido foi capaz de manter uma temperatura estável e produzir um acabamento superficial suave demonstrando o potencial para melhorar a eficiência e a precisão do processo.

## 2.3 TEMPO DE VIDA DE FERRAMENTA DE CORTE

Com o advento da manufatura avançada e a melhoria contínua dos processos de fabricação, o monitoramento online do desgaste da ferramenta e a previsão do seu tempo de vida desempenham um papel fundamental na automação desses processos. Para o setor industrial os prognósticos são mais significativos do que os diagnósticos. Este tipo de técnica de monitoramento pode ser utilizada para evitar o desperdício resultante do uso parcial da ferramenta também como evitar o acabamento superficial inadequado ou a imprecisão dimensional.

Iliescu et al. (2010) fizeram um comparativo de desgaste de ferramenta na furação de material composto com ferramentas de metal duro revestidas e não revestidas. Os resultados experimentais confirmaram que a força de furação é influenciada pela velocidade de avanço,

velocidade de corte e o desgaste da ferramenta. Um modelo baseado nos fenômenos de carga axial foi levado em consideração para a análise do desgaste da ferramenta. O estudo também apontou o benefício de um revestimento de diamante na broca de metal duro elevando a uma vida útil de 10 para 12 vezes maior em relação à vida da ferramenta da broca de metal duro não revestida para velocidades de corte 3 vezes maiores.

Brinksmeier, Fangmann e Rentsch (2011) sugeriram a comparação da furação orbital e convencional em fibra de carbono, e compostos de alumínio/PRFC e titânio relacionando a temperatura e avarias na furação. Foi feita a micrografia da superfície do furo realizado. Temperaturas altas e forças de corte mostraram ser parâmetros que afetam negativamente a estrutura do PRFC e a forma das superfícies de corte. A furação orbital leva a temperaturas de processo mais baixas e forças de avanço mais baixas em todos os três materiais. Para a integridade da superfície dos furos realizados no composto observou-se uma grande melhora em comparação à furação convencional. A furação convencional do PRFC, garantiu baixas temperaturas de corte, com isso levou à melhores qualidade da superfície do furo.

A ferramenta de corte é uma parte muito importante das máquinas-ferramenta e sua confiabilidade influencia a eficácia total da manufatura e estabilidade do processo. Chen et al. (2011) propuseram uma nova abordagem de estimativa de confiabilidade para as ferramentas de corte com base em modelo de regressão logística usando sinais de vibração. Um acelerômetro, câmera e um sistema de aquisição de dados foram utilizados para o acompanhamento da performance de um torno CNC. Como efeitos resultantes do desgaste da ferramenta manifestam-se em bandas de frequência específicas dos sinais de vibração, usou-se a técnica *Wavelet Packet* para decompor sinais de vibração em diferentes faixas de frequência. Uma análise de correlação é usada para selecionar características salientes indicativas de desgaste da ferramenta. A energia de banda, entropia de energia e domínio do tempo mostraram um alto grau de correlação com o desgaste das ferramentas.

Visando determinar o tempo de vida da ferramenta, Wang e Wang (2012) utilizaram o método CHMM (*Continuous Hidden Markov Model*), monitorando as forças envolvidas no processo de fresagem do material ASSAB718HH através da coleta dos sinais de um dinamômetro Kistler 5019A, a análise superficial da peça usinada foi feita através de exame de microscopia. Os resultados mostram que o CHMM é sensível ao monitoramento das condições da ferramenta e o processo gaussiano para determinar o tempo de vida de ferramenta tem potencial significativo para uso em produção.

Sheikh-Ahmad, Dhuttargaon e Cheraghi (2017) abordou um método alternativo para determinar o tempo de vida de ferramenta de corte com geometria complexa no processo de fresagem em fibra de carbono. Foi considerada considerada a frequência e tamanho da delaminação para determinar o desgaste da ferramenta. Uma equação empírica foi determinada para a análise. O teste foi realizado através da fresagem de uma placa de fibra de carbono em uma fresa CNC, medindo a temperatura durante a fresagem, tamanho e frequência da delaminação e



a rugosidade superficial. Foi criado um critério mínimo de delaminação junto aos utilizadores e com os dados foi elaborada a equação que descreve o desgaste. Observou-se que a natureza da delaminação tinha comportamento estatístico bem definido podendo ser facilmente modelado.

Através do monitoramento da condição da ferramenta TCM (do inglês *tool condition monitoring*) Serin et al. (2020) realizaram uma revisão pontuando a alta relevância desse monitoramento durante os processos de usinagem. Com isso, problemas como desgaste, quebra e trepidação da ferramenta podem ser eliminados, assim como seus efeitos adversos, por exemplo reproduzir defeitos às peças ou danos à máquina-ferramenta. Sensores avançados são usados para essa técnica tais como de emissão acústica, vibração, potência e temperatura os quais coletam grande quantidade de dados a fim de detectar o desgaste, quebra ou trepidação da ferramenta. A tecnologia de detecção no TCM é baseada em duas abordagens: medição direta que se baseia em desgaste visível e mensurável e medições indiretas, que se baseia em artefatos do processo, como vibração, emissão acústica e corrente. Os métodos diretos têm a vantagem de serem mais precisos; no entanto, as forças de corte causam efeitos colaterais mais fortes, criando mais oportunidades de pesquisa e implementação para métodos indiretos. Outras razões pelas quais as técnicas de medição indireta têm recebido maior atenção ultimamente são devido ao fato de que a tecnologia sensorial indireta está avançando rapidamente, não é invasiva para o processo tanto quanto a medição direta e seu custo está diminuindo continuamente

## 2.4 INSTRUMENTAÇÃO DE BAIXO CUSTO

Ando, Baglio e Pistorio (2014) propuseram um nó multi sensor customizado baixo custo baseado em WSN (do inglês *Wireless Sensor Network* para um sistema de alerta precoce EWS (do inglês *Early Warning System*) com o objetivo de monitorar em tempo real a estrutura de edifícios visando a segurança. Utiliza nesse sistema dois inclinômetros e um acelerômetro triaxial, uma plataforma microcontroladora e uma ferramenta de comunicação ZigBee para comunicação de dados. Para permitir uma arquitetura adaptável ao contexto do sistema desenvolvido, três modos de operação foram definidos: autônomo, transferência contínua de dados e modo misto. A capacidade de armazenamento dos dados adquiridos também foi avaliada. Os resultados encorajam a utilização da metodologia para o sistema de alerta precoce de baixo custo.

Para fins didáticos Varanis et al. (2016) montaram um sistema de aquisição de sinais de fácil manuseio, baixo custo e boa precisão contendo acelerômetro, giroscópio e ultra-som em uma plataforma Arduino a fim de medir o estado de uma viga medindo sua posição, velocidade e aceleração. Para o processamento dos sinais bibliotecas em Python foram utilizadas. Os resultados foram comparados com a literatura e estão de acordo mostrando a capacidade do dispositivo, sendo o acelerômetro o que trouxe os melhores resultados entre os sensores utilizados. É ressaltado também que deve-se usar sistemas específicos a depender da aplicação.

Goyal e Pabla (2016) fizeram uma ampla revisão sobre os recentes métodos de captura de sinal de vibração e técnicas de tratamento dos sinais. Afirmam que máquinas sem vibrações

mecânicas em ambiente de trabalho são algo inexistente. Pois durante as operações de usinagem as vibrações estão diretamente ligadas a características das partes rotativas como rolamento, caixa e engrenagem e motores. A análise de vibração provou ser uma medida para qualquer causa de imprecisão nos processos de fabricação ou importante decisões de manutenção relacionadas às máquinas. Os autores concluem que as técnicas de processamento de sinal mais usadas em SHM (do inglês *Structural Health Monitoring*) são modelos de séries temporais, transformada WPT (*wavelet packet transform*) e HHT (*Hilbert–Huang Transform*) ou, às vezes, uma combinação de quaisquer dois deles. Ruído é um fator preponderante na qualidade do resultado da análise, como também que os instrumentos do tipo contato são mais usados para medições de vibração em SHM. Por fim, conclui-se que existe um enorme potencial para o uso de instrumentos sem contato para medição de vibração na previsão dos aspectos de manutenção e falha de máquinas dinâmicas.

Holovatyy et al. (2017) desenvolveram e estudaram um sistema denominado MAVAS (do inglês *monitoring and analysis of the vibration acceleration spectrum*) caracterizado pelo seu baixo custo e capacidade de modificação rápida do dispositivo de acordo com o condições tecnológicas do ambiente de medição. Os autores desenvolveram a estrutura e algoritmo de operação do sistema MAVAS com base em um princípio modular criando também um modelo físico com componentes de uso geral de baixo custo e um software especializado para o sistema permitindo múltiplas funcionalidades. O sistema projetado é de baixo custo e permite analisar parâmetros de vibração para prever e prevenir possíveis acidentes permitindo ao usuário utilizar as funcionalidades gratuitamente.

Carducci et al. (2019) apresentaram o projeto e a implementação de uma unidade de medição fasorial (PMU) de baixo custo baseada em um sistema operacional (SO), o que a torna mais versátil e flexível em comparação com as PMUs tradicionais baseadas em hardware e software proprietários. A PMU também é de baixo custo, o que a torna acessível a uma ampla gama de usuários. Os autores testaram a PMU e descobriram que ela era capaz de fornecer medições precisas e confiáveis das grandezas elétricas em um sistema de energia. Eles também demonstraram a versatilidade da PMU mostrando que ela pode ser usada em uma variedade de aplicações, incluindo proteção do sistema de energia, monitoramento da qualidade da energia e integração de energia renovável. No geral, o artigo apresenta uma contribuição valiosa para o campo de sistemas de energia, apresentando uma PMU versátil e de baixo custo que pode ser usada para uma ampla gama de aplicações.

Aghenta e Iqbal (2019) mostraram o projeto e a implementação de um sistema de controle de supervisão e aquisição de dados (SCADA) de baixo custo usando Internet das Coisas de código aberto (IoT). Os sistemas SCADA são usados para monitorar e controlar processos industriais, como usinas de energia, instalações de tratamento de água e fábricas. Os autores do artigo usaram o Thinger.IO, uma plataforma IoT de código aberto, e o ESP32 Thing, um microcontrolador de baixo custo, para projetar e implementar um sistema SCADA que pode ser

usado para monitorar e controlar processos industriais. O sistema foi capaz de se comunicar com sensores e atuadores usando vários protocolos de comunicação, incluindo WiFi e Bluetooth. Os autores testaram o sistema SCADA e descobriram que ele era capaz de fornecer dados precisos e confiáveis dos sensores e controlar os atuadores em tempo real. Eles também demonstraram a flexibilidade do sistema, mostrando que ele pode ser usado em uma variedade de aplicações, incluindo monitoramento ambiental, gerenciamento de energia e automação industrial. No geral, o artigo apresenta uma contribuição valiosa para o campo da automação industrial ao introduzir um sistema SCADA flexível e de baixo custo que pode ser usado para uma ampla gama de aplicações usando tecnologias IoT de código aberto.

Ampliando a discussão sobre o potencial e benefícios de ter o IoT como parte de instrumentos de medição e também as ressalvas de incorporar em sistemas de medição, Ooi e Shirmohammadi (2020) aborda os principais aspectos e importância da necessidade do advento do IoT como a grande redução de coleta de dados manuais e inclusive ampliando a amostragem através de sensoriamento sem fio e de baixa potência. Também como o aumento na integridade das medições com o bloqueio dos dados evitando edições. Discute sobre as incertezas que um sistema IoT pode também imprimir nas medições através por exemplo de problemas com latência da rede, casualidade com a ordem incorreta das informações, envelhecimento do sistema, falhas e por fim outra preocupação fundamental é a privacidade uma vez que as informações estão em rede. Os autores concluem que o IoT realmente promete muitas vantagens atraentes para instrumentação de medição, além de automatizar o processo de medição. No entanto, é importante a cautela com os problemas herdados da IoT no processo de medição e sua privacidade.

Campobello, Segreto e Donato (2020) propuseram um novo método de estimativa de frequência rápida e de baixo complexidade para sinais senoidais de tom único capaz de atingir o limite inferior de Cramer-Rao. Em comparação com outros métodos de estimativa de frequência, o proposto tem um melhor custo benefício entre complexidade e faixa de estimativa e sua implementação é viável mesmo em microcontroladores com recursos limitados, como os comumente usados em aplicações de Internet das Coisas Industrial (IIoT) e de baixo custo.

De um modo geral, ao realizar a revisão bibliográfica e a análise bibliométrica dos artigos apresentado na Tabela 1, fica evidente a existência de poucos estudos focados em estimar o tempo de vida útil de ferramenta de corte na usinagem de material composto, e tão pouco essa usinagem sendo realizada por robôs. Nesse sentido, fica evidente a contribuição do presente projeto de pesquisa, e utilizando como meio uma instrumentação de baixo custo na amostragem das vibrações mecânicas do conjunto motor-ferramenta. Além disso o estudo é aliado à crescente utilização desse tipo de material na indústria, contribuindo para o desenvolvimento e implantação de melhorias nos processos de manufatura.

Tabela 1 – Análise bibliométrica.

<b>Autores</b>	<b>Compósito</b>	<b>Honeycomb</b>	<b>Metálico</b>	<b>Robô</b>	<b>Fresagem</b>	<b>Força de corte</b>	<b>Vibração</b>	<b>Tempo de vida de ferramenta</b>	<b>Integridade superficial</b>	<b>Instrumentação de baixo custo</b>
Abele, Weigold e Rothenbücher (2007)			X	X	X	X				
Abramovich (2017)	X									
Aghenta e Iqbal (2019)										X
Alonso e Salgado (2008)			X				X	X		
Ambhore, Kamble e Chinchankar (2018)			X				X			
Ando, Baglio e Pistorio (2014)										X
Aramesh et al. (2016)								X		
Barbosa, Cordeiro e Costa (2015)	X	X		X						
Barbosa, Shiki e Savazzi (2019)	X	X		X			X			X
Brinksmeier, Fangmann e Rentsch (2011)	X		X			X			X	
Caggiano et al. (2017)	X					X				
Campobello, Segreto e Donato (2020)										X
Carducci et al. (2019)										X
Cen e Melkote (2017)			X	X	X	X				
Chen et al. (2011)			X			X	X		X	
Chen et al. (2019)			X	X	X					
Fazzolari (2017)	X									
Goyal e Pabla (2016)							X			X
Holovatyy et al. (2017)							X			X
Hsissou et al. (2021)	X									
Zhang et al. (2005)			X	X	X	X				
Huynh et al. (2020)				X						
Iliescu et al. (2010)	X					X				
Jaafar et al. (2017)	X	X			X	X			X	
Klimchik et al. (2016)			X		X					
Nikbakt, Kamarian e Shakeri (2018)	X									
Ooi e Shirmohammadi (2020)										X
Ramirez et al. (2014)	X				X			X	X	
Rawat e Attia (2009)	X									
Serin et al. (2020)						X	X	X		
Sheikh-Ahmad, Dhuttargaon e Cheraghi (2017)	X				X	X		X		
Varanis et al. (2016)							X			X
Wang e Li (2019)			X		X	X	X			
Zhang et al. (2021)	X			X	X		X		X	
Xiong, Ding e Zhu (2019)				X	X					
Presente dissertação	X	X		X	X		X	X	X	X

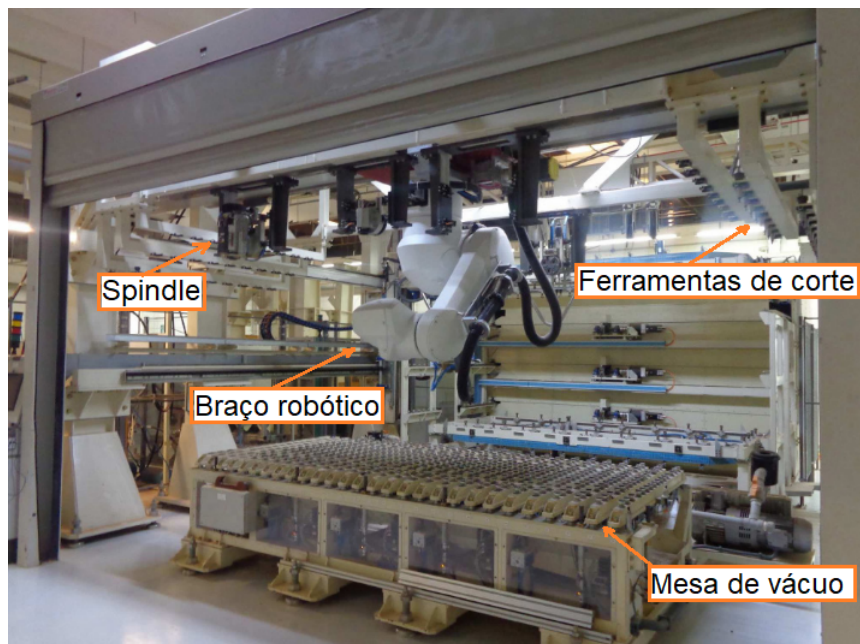
Fonte: Elaborada pelo próprio autor.

### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

Uma célula robótica integrada e automatizada para usinagem de material composto na indústria aeronáutica foi utilizada no experimento, considerando desde o preparo dos corpos de prova até a avaliação da vibração do conjunto cabeçote e ferramenta de corte durante o processo de fresagem.

O processo foi efetuado por um robô Stäubli® TX200 de seis eixos com alcance total de 2 metros, capacidade de carregamento de até 100 kg e repetibilidade de mais ou menos 0,060 mm que está instalado de modo suspenso em eixo linear que acrescenta um grau de liberdade adicional, permitindo ao robô operar na montagem *ceiling* sendo a instalação do robô com sua base invertida, de cima para baixo. A célula robótica é ilustrada na Figura 6.

Figura 6 – Célula robótica.



Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

Acoplado à flange do robô está um motor *spindle* de 15 kW (fabricante: HSD, modelo: ESD 915, rotação máxima: 24.000 rpm), onde foram acopladas as ferramentas de corte. Sua velocidade máxima de rotação é de 24.000 RPM. Esse conjunto que está sendo carregado pelo robô é chamado de efetuador (*end-effector*).

Uma chapa de material composto estrutural, que será caracterizada adiante, foi posicionada logo abaixo do robô sobre uma mesa com fixação a vácuo responsável por fixar a matéria-prima a ser usinada. O motor *spindle* foi acoplado ao robô por meio de um suporte aparafusado à flange denominado *toolchanger* e este permite a troca entre os efetuadores. O

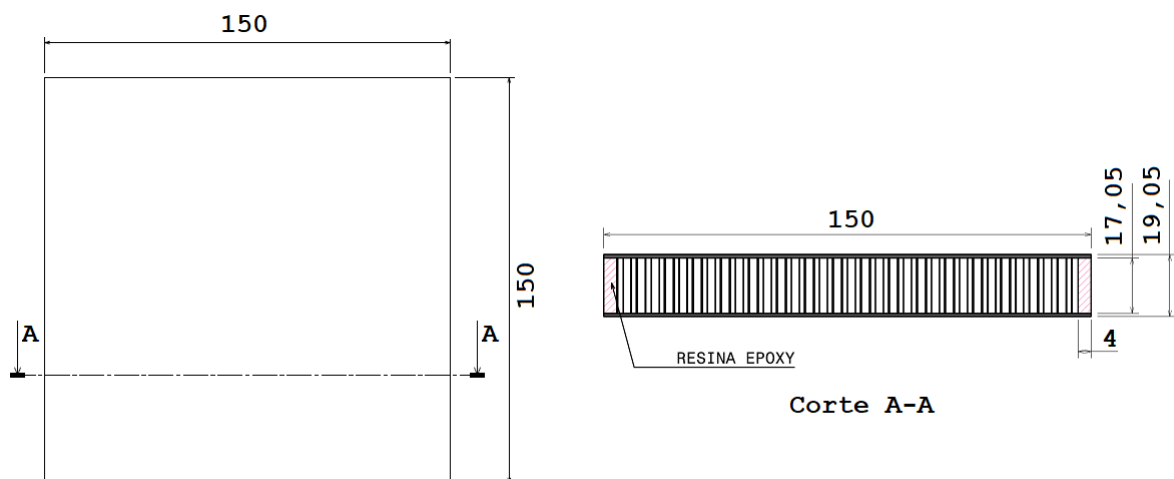
*spindle* possui um sistema para acoplamento de um porta ferramenta do tipo ISO 30 onde está instalada a ferramenta de corte, sendo o sistema de travamento acionado por ar comprimido.

A trajetória para a fresagem foi criada no *software* Mastercam® dedicado à programação *offline* (OLP), o qual definirá a geometria da peça. Uma vez a trajetória para o robô definida, é então salvo um conjunto de arquivos com as instruções para o manipulador robótico. Em seguida, foi realizado o *upload* desses arquivos no controlador do robô que executa os movimentos programados utilizando os parâmetros de corte previamente programados.

### 3.1 CORPOS DE PROVA

Para representar o processo de produção foi escolhida uma amostra quadrada ( $150 \times 150 \text{ mm} \times 19,05$ ), conforme mostrado na Figura 7 como também um corte A-A que exhibe a composição da amostra.

Figura 7 – Dimensão corpo de prova e corte A-A do CDP.



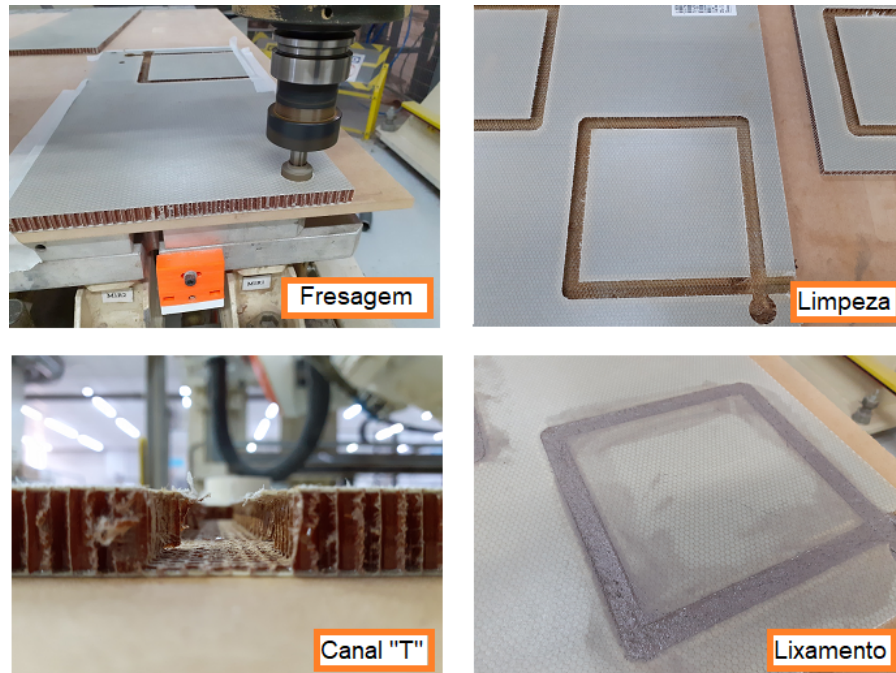
Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

A matéria-prima é um painel sanduíche composto por laminado em epóxi reforçado com tecido de fibra de vidro e o seu núcleo em colmeia de meta-aramida Gillcore® HD, com 0,5 polegadas de espessura. Informações adicionais podem ser encontradas no Anexo A.

Foi necessária uma preparação prévia dos corpos de prova (CDP), onde uma chapa de material composto estrutural é fresada formando um canal do tipo "T". Após esse processo é executado o preenchimento desse vazio formado com a resina epóxi 3M® EC-3550 que é um composto epóxi estrutural utilizado em painéis sanduíche encontrado na indústria aeronáutica, suas características são a baixa densidade e fornece resistência a impacto ao painel, é usinável e possui em sua constituição microesferas ocas de vidro. Informações adicionais podem ser encontradas no Anexo B.

Aguardou-se o tempo de duas horas sob uma temperatura de 43 °C para que ocorra o processo de endurecimento e total cura da resina. Em seguida, o excedente de resina é removido por meio de lixamento manual com o auxílio de ferramenta elétrica roto-orbital com lixa grão 80. As etapas do processo de preparação dos corpos de prova são ilustradas na Figura 8.

Figura 8 – Etapas de preparo do CDP.



Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

### 3.2 SISTEMA DE AQUISIÇÃO DE DADOS

Uma instrumentação de baixo custo foi utilizada para o procedimento experimental da presente pesquisa. Um acelerômetro ADXL335 (sensibilidade: 300 mV/g, faixa de frequência de até 1,6kHz) é acoplado ao suporte que liga o robô e o *spindle* por meio de dois parafusos M3.

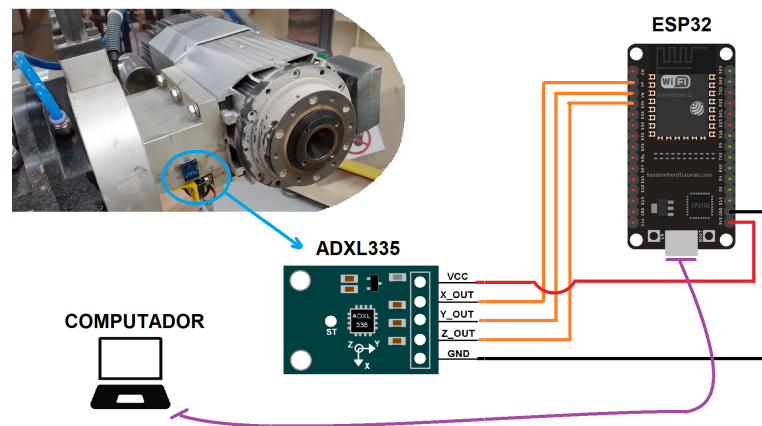
O espaço entre o sensor e o *spindle* é preenchido com um espaçador customizado e fabricado em plástico utilizando manufatura aditiva. Sua função é de evitar curto-circuito e garantir que não haja frestas entre o sensor e o *spindle*.

Auxiliado pelas tendências da Indústria 4.0 de IoT e digitalização, uma placa microcontroladora de prototipagem Espressif® ESP32 (modelo: ESP32 ESP-WROOM-32 DEVKit V1, CPU: Xtensa® Dual-Core 32-bit LX6, ROM: 448 KBytes, RAM: 520 Kbytes, 16 entradas/saídas de uso geral, conversor analógico-digital de 12-bits) é usada para amostrar os sinais de vibração mecânica e fornecer uma assinatura da dinâmica do processo.

A resolução do conversor analógico-digital do microcontrolador de 12-bits e para a faixa de tensão de 0 a 3 volts é de 0,73 mV por divisão sendo essa resolução suficiente para o acelerômetro utilizado.

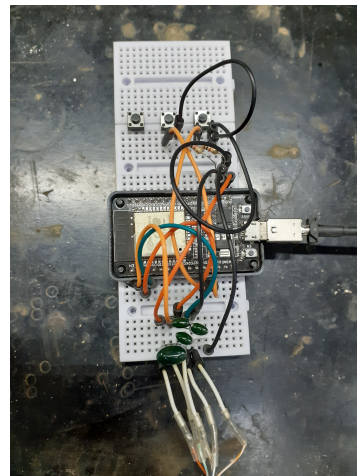
Na Figura 9 é ilustrada a representação das ligações do sistema de aquisição e o posicionamento do acelerômetro no robô. O código para coleta e processamento de dados é desenvolvido em linguagem C e compilado pela IDE Arduino®. Na Figura 10 é ilustrado o protótipo do sistema implementado acoplado à uma *proto-board*.

Figura 9 – Representação das ligações do sistema de aquisição de dados e posicionamento do acelerômetro no efetuador.



Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

Figura 10 – Sistema de aquisição de dados montado.

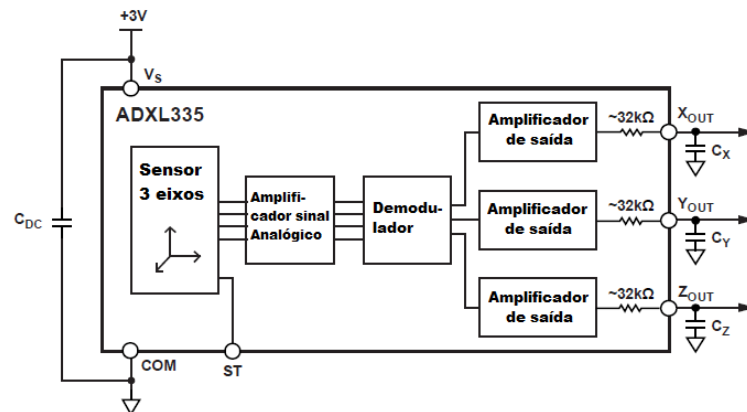


Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

Para redução de ruído durante a aquisição dos sinais foi acrescentado ao circuito um capacitor em paralelo à alimentação elétrica de 3V do acelerômetro ADXL335 ( $C_d = 0,1 \mu\text{F}$ ), como também foi inserido um capacitor para cada canal de entrada do sinal analógico dos eixos x, y e z ( $C_x, C_y, C_z = 0,003 \mu\text{F}$ ), o esquema a de ligação está representado na Figura 11. A adição do capacitor ao sensor serve para estabilizar a alimentação do mesmo evitando assim ruídos elétricos, e os capacitores adicionados aos canais de cada um dos eixos do sensor adicionam filtros analógicos do tipo passa-baixa minimizando assim componentes de alta frequência que não seriam adequadamente capturados pelo conversor analógico-digital da ESP32.



Figura 11 – Diagrama esquemático do sensor ADXL335 com adição de capacitores.



Fonte: Adaptado do datasheet do acelerômetro ADXL335.

### 3.3 CAPTURA E PROCESSAMENTO DOS SINAIS DE VIBRAÇÃO

Para a captura das medições dos 3 eixos do acelerômetro, uma frequência de amostragem é configurada para 1000 Hz, sendo que a mesma foi escolhida com base nas limitações do hardware de baixo-custo proposto na presente pesquisa. Para cada trajetória do robô, o sistema é configurado para capturar 20 segundos dos sinais de vibração durante o processo de corte. Logo após a captura dos dados, os mesmos já são tratados e como resultado de saída tem-se os valores RMS (do inglês, *root mean square*) para cada eixo e as frequências dominantes do sinal obtidas a partir do seu espectro em frequência.

Para a aquisição de dados a estratégia de criação de um buffer de dados foi utilizada, onde o sistema armazena 1024 pontos de aceleração para cada eixo do acelerômetro. Para garantir a frequência correta de amostragem, no caso 1000 Hz, uma sentença que testa tal condição é inserida ao código. Uma vez a condição sendo verdadeira é realizado a captura de cinco valores para cada eixo, e é então calculada a média entre os cinco valores e o resultado é armazenado em *buffer*. Uma vez o *buffer* preenchido é calculado o valor RMS do sinal ( $x_{RMS}$ ) utilizando a eq. 1:

$$x_{RMS} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} x^2} \quad (1)$$

sendo  $x$  o sinal cujo valor eficaz está sendo calculado, e  $N$  o tamanho total da amostra analisada

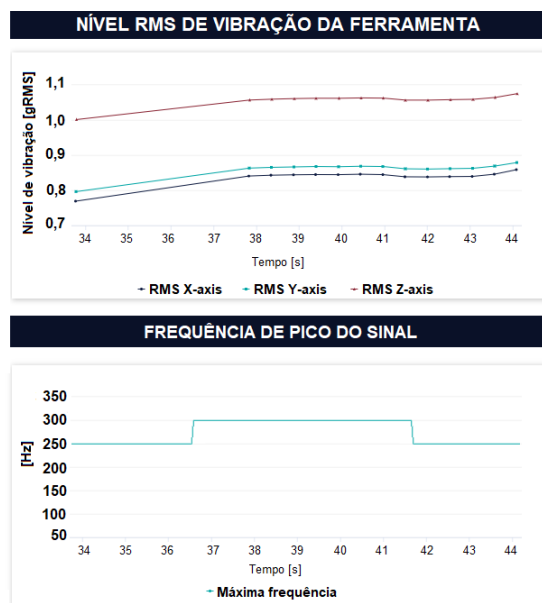
Para o cálculo do espectro em frequência de cada sinal  $x$ , foi empregado o algoritmo FFT (do inglês *Fast Fourier Transform*) implementado a partir da biblioteca do Arduino <fft.h>. A mesma traz efetua o cálculo da transformada discreta de Fourier de um sinal, a qual é usada no presente estudo para a análise dos dados de vibração do *spindle*. As funções presentes na mesma são responsáveis por calcular o espectro em frequência do sinal  $X(k)$  a partir da eq. 2:

$$X(k) = \sum_{n=0}^{N-1} x(n)e^{-i(\frac{2\pi}{N})nk} \quad (2)$$

sendo  $x(n)$  o sinal discreto no domínio do tempo, e  $X(k)$  a transformada discreta de Fourier do sinal representada no domínio da frequência. A partir do espectro  $X(k)$  é possível obter a frequência dominante do sinal durante o processo de fresagem identificando os picos de maior amplitude.

Para a visualização em tempo real dos dados é utilizada a biblioteca <ESPAsyncWeb-Server.h> na qual os resultados calculados de RMS e frequência de pico são enviados para publicação em um *web server* acessado através de um navegador em um computador que esteja na mesma rede local de comunicação do ESP32. A interface criada para apresentar os resultados graficamente é ilustrada na Figura 12 sendo que a primeira imagem ilustra o monitoramento do nível RMS dos sinais de vibração e a segunda mostra a frequência dominante dos mesmos. O acompanhamento desses índices pode permitir o acompanhamento da condição da ferramenta de corte, bem como a possibilidade de identificar a origem dessas vibrações a partir da frequência dominante.

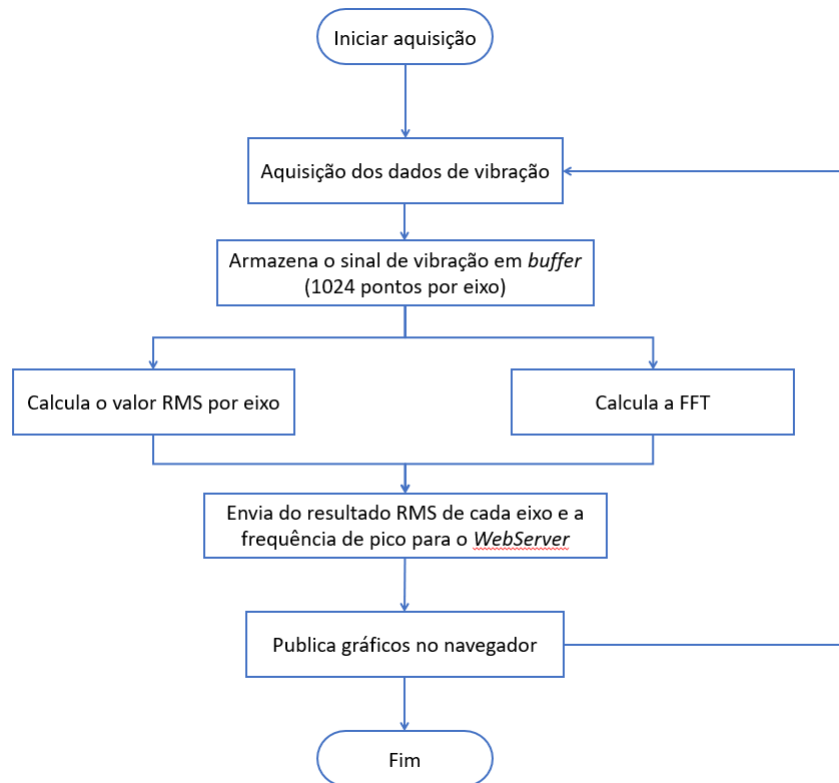
Figura 12 – Visualização dos dados.



Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

Para ilustrar todo o processo desde a captura de dados até seu processamento e exibição gráfica, um fluxograma para o processo de aquisição e tratamento dos dados é apresentado na Figura 13. Esse procedimento foi repetido diversas vezes ao longo do experimento podendo ser utilizado para armazenamento de dados do processo e acompanhamento remoto do mesmo.

Figura 13 – Fluxograma da captura e processamento dos sinais de vibração.

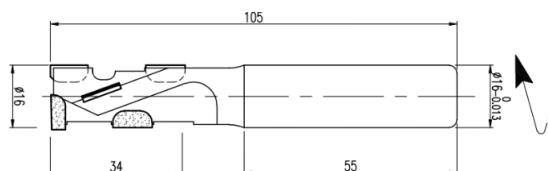


Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

### 3.4 FERRAMENTA DE CORTE

As ferramentas de corte utilizadas no experimento são confeccionadas com corpo em aço e os cortantes em diamante policristalino (DP) soldados. Com ângulo axial e corte fracionado de forma a promover excelente acabamento em ambas as faces da peça a ser usinada e com o cortante central para furação em metal duro (HW) soldado Frezite®. Trata-se da principal ferramenta para realizar o corte final das peças em material composto. As principais dimensões da ferramenta de corte estudada são mostradas na Figura 14.

Figura 14 – Desenho técnico da ferramenta de corte.

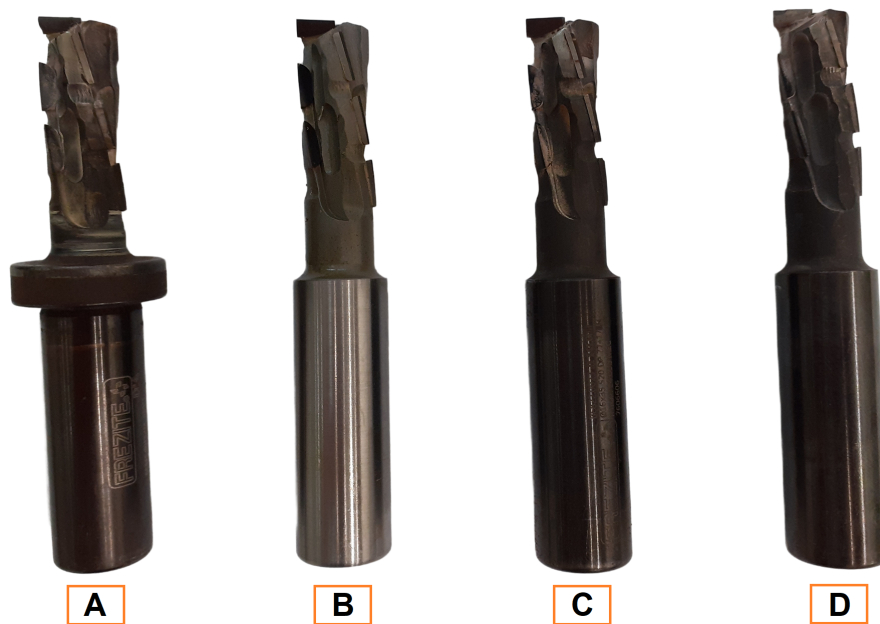


Fonte: Desenho Frezite BDC.5201.1.

Um total de 4 ferramentas de corte foram utilizadas para comparar os sinais de vibração mecânica gerados durante o processamento do material composto. Na Figura 15 a fresa denominada **A** está gasta, e sua eficácia no processo é desconhecida podendo interferir na qualidade da

peça. Já a ferramenta de corte, denominada **B**, nunca foi utilizada no processo e representa a ferramenta na condição de referência e sem desgaste. A ferramenta **C** é dita com um tempo de vida conhecido pois o fator tempo em uso foi medido, para esse caso foram doze horas. E, por fim a ferramenta **D**, corresponde a uma ferramenta já utilizada no processo com baixo tempo de vida mas não medido.

Figura 15 – Ferramentas para o experimento.



Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

A montagem das ferramentas de corte nos suportes são realizados através de um procedimento padrão e em seguida é efetuada a medição de parâmetros de diâmetro, batimento e altura em uma máquina de montagem e medição de ferramenta (marca: Zoller, modelo: Smile 400, faixa de medição: X: 398,78 mm e Z: 210,82, diâmetro: 419,1 mm). Os valores obtidos para as ferramentas utilizadas no experimento são mostrados na Tabela 2. Todos os parâmetros estão dentro dos limites estabelecidos no processo.

Tabela 2 – Medição da ferramenta.

<b>Ferramenta</b>	<b>Diâmetro</b>	<b>Batimento</b>	<b>Altura</b>
A	15,972	0,023	140,179
B	15,978	0,001	141,003
C	15,975	0,020	141,179
D	15,964	0,022	140,876

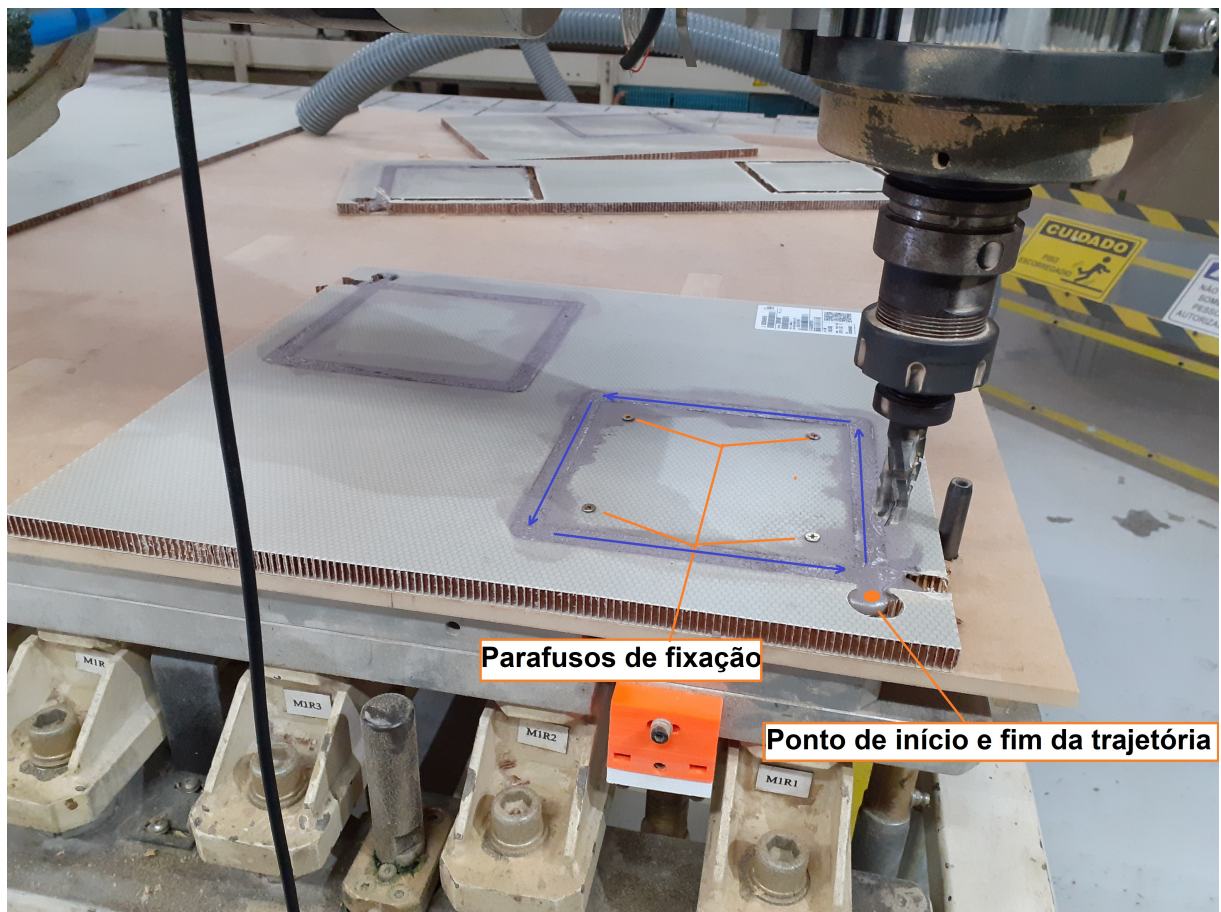
Fonte: Elaborada pelo próprio autor.

### 3.5 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

O experimento consistiu na execução da usinagem dos corpos de prova anteriormente mencionados utilizando cada uma das ferramentas de corte descritas (A, B, C e D). Simultaneamente à fresagem foi realizada a aquisição dos dados de vibrações mecânicas, logo de imediato no hardware IoT uma avaliação do nível RMS de vibração é calculada e o resultado é publicado de maneira gráfica para acompanhamento.

A peça já preparada foi então posicionada na mesa de vácuo, e parafusos de fixação foram utilizados de modo a aumentar a estabilidade para eliminar o risco de movimentação da peça durante o processo de usinagem, evitando danos e a obtenção de dados de vibração mecânica incorretos. A fixação da chapa bem como a trajetória da ferramenta durante o processo de corte são ilustrados na Figura 16.

Figura 16 – Posicionamento do corpo de prova e direção do corte.



Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

A usinagem de uma peça quadrada com dimensões finais de de 150 x 150 mm foi executada. O fresamento foi configurado como discordante sendo a direção do avanço anti-horário com o ponto inicial e final na borda superior direita do CDP. Os parâmetros de corte usados nesse processo foram: velocidade de rotação do *spindle* de 15.000 RPM e velocidade de

avanço de 1800 mm/min. Durante todo o processo de fresagem, o sistema de aquisição de dados coleta os valores de aceleração nos três eixos (x, y e z) a uma taxa de amostragem de 1000 Hz. Após capturados esses dados, o sistema de aquisição de dados calcula o RMS e o espectro em frequência do sinal. O procedimento experimental é apresentado de forma resumida na Tabela 3.

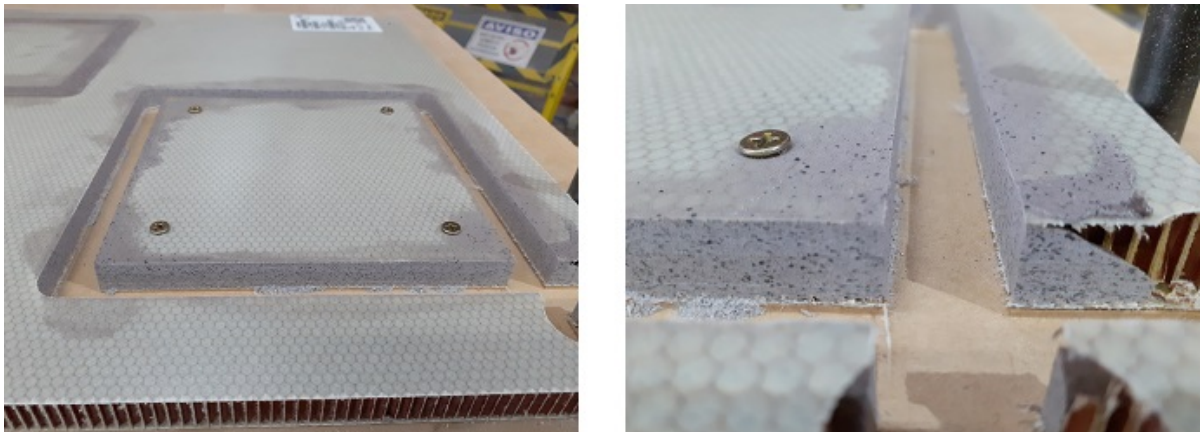
Tabela 3 – Parâmetros do procedimento experimental.

CDP	Ferramenta	$n$ [RPM]	$v_f$ [mm/min]
1			
2	A	15000	1800
3			
4			
5	B	15000	1800
6			
7			
8	C	15000	1800
9			
10			
11	D	15000	1800
12			

Fonte: Elaborada pelo próprio autor.

Ao todo, para cada ferramenta de corte foram fresados 3 corpos de prova, totalizando 12 amostras para avaliação. O resultado final de um dos corpos de prova é apresentado na Figura 17, o qual corresponde ao perfil final da peça após o processo de fresagem. Logo em seguida ao corte é realizada uma inspeção visual das superfícies com o intuito de encontrar possíveis inconsistências no material composto ou então defeitos que possam comprometer o experimento. Para o experimento todos os corpos de prova passaram pela inspeção visual e nenhum foi descartado ou refeito.

Figura 17 – Perfil do corpo de prova.

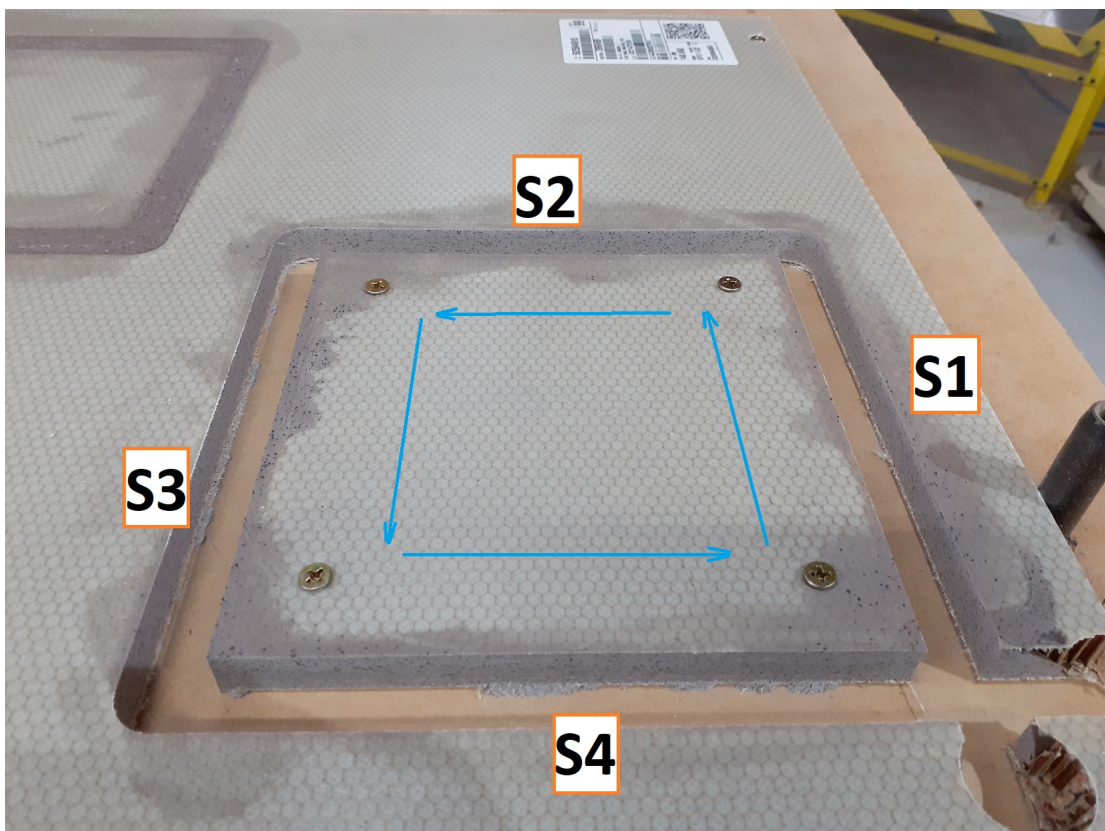


Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

## 4 RESULTADOS

Cada lado da peça é discriminado em 4 seções denominadas: S1, S2, S3 e S4 para auxiliar a análise, conforme mostrado na Figura 18. A qualidade das peças foi verificada por inspeção visual após o processo experimental com todas as ferramentas de corte, **A**, **B**, **C** e **D** é considerada satisfatória não possuindo descontinuidade ou falhas de preenchimento da resina, o que indica um bom preparo e execução dos ensaios.

Figura 18 – Seções do corpo de prova.

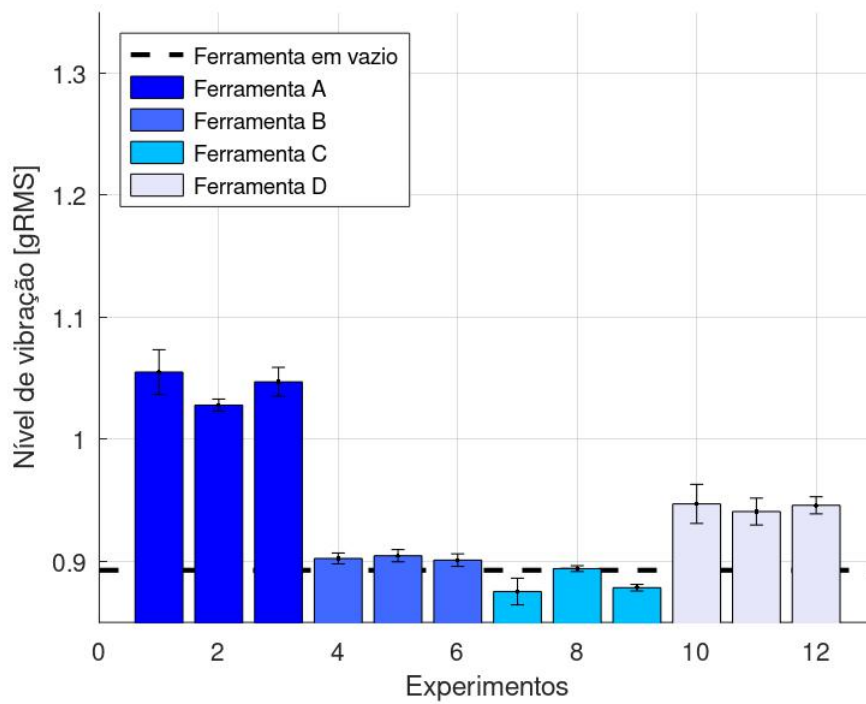


Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

### 4.1 ANÁLISE DOS DADOS DE VIBRAÇÃO

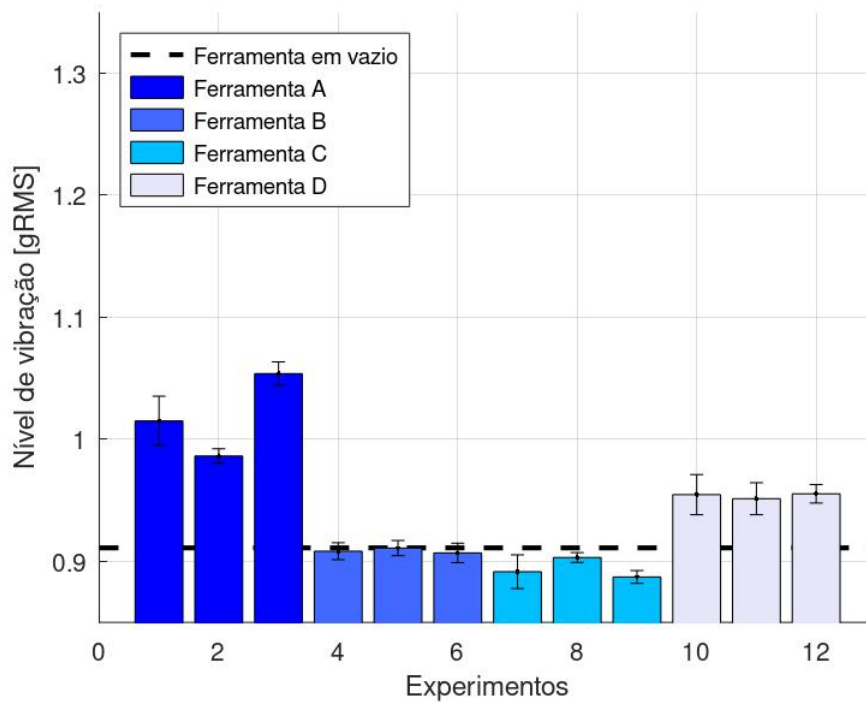
Os dados de vibração mecânica adquiridos durante o procedimento experimental são usados para analisar o comportamento dinâmico do processo observado durante o estudo. As Figuras 19, 20 e 21 mostram os valores das vibrações a partir do seu nível RMS nos eixos x, y e z respectivamente para as ferramentas de corte ensaiadas (**A**, **B**, **C** e **D**). Para cada ferramenta são mostrados os níveis RMS médios de vibração para cada um dos 3 corpos de prova usinados, bem como o desvio padrão dos valores obtidos para quantificar a dispersão dos dados em cada condição.

Figura 19 – Nível de vibração das ferramentas em três corpos de prova no eixo x.



Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

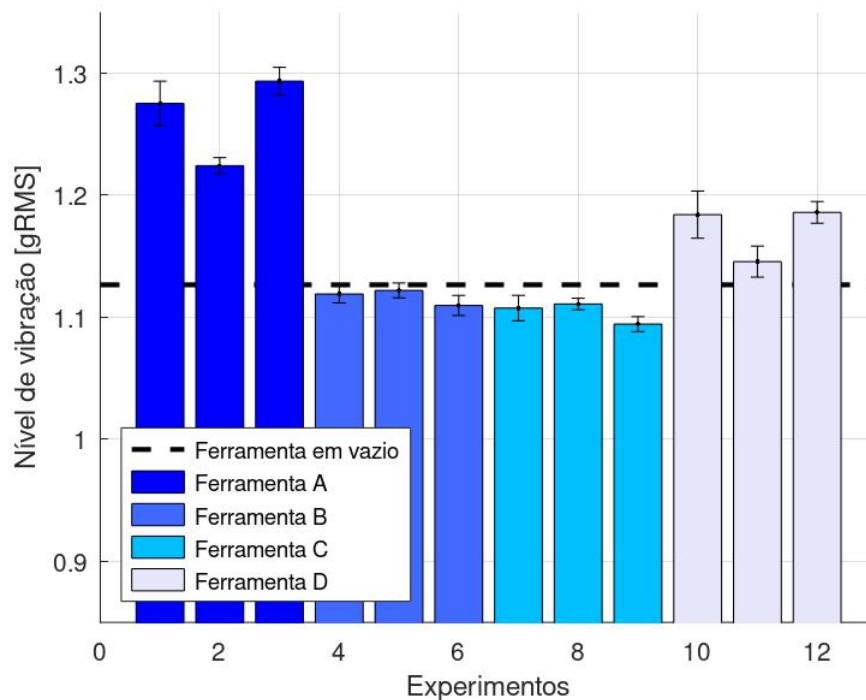
Figura 20 – Nível de vibração das ferramentas em três corpos de prova no eixo y.



Fonte: Elaborado pelo próprio autor.



Figura 21 – Nível de vibração das ferramentas em três corpos de prova no eixo z.



Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

As figuras mostram os níveis de vibração comparados ao da "Ferramenta em vazio" usado para fins de referência, caso este onde o robô está em repouso com a ferramenta rotacionando a 15.000 RPM. Para todos os três eixos do acelerômetro pode-se notar que a ferramenta **A**, situação onde a mesma está com o maior nível de desgaste ensaiado, é a que demonstra o nível médio de vibração mais elevado em relação às demais e também ao nível de referência.

A ferramenta **B** por sua vez, nova, possui níveis de vibração ligeiramente superiores à ferramenta **C**, sugerindo que a mesma passa por um período de estabilização quando esta é sem uso.

A ferramenta **D**, por sua vez indica ter um tempo de uso maior quando comparada à **B** e **C**, e de fato é o esperado pois é de conhecimento prévio da utilização dessa ferramenta de corte em outro processo de fresagem mas não havendo o controle do tempo de uso.

## 4.2 DIMENSÕES FINAIS DOS CORPOS DE PROVA

Após o ensaio foi realizado a medição das arestas de cada CDP com o uso de um paquímetro Mahr® modelo MarCal 18 EWR e o resultado é mostrado na Tabela 4.

A tolerância dimensional para esse processo de manufatura e para esse tipo de material é de mais ou menos 0,20 mm. Com essa referência pode-se notar que os corpos de prova estão dentro da tolerância para as ferramentas **B**, **C** e **D** ditas como adequadas para o processo. Já a

ferramenta **A** apresenta valores fora dos limites para a aresta S2 que são ressaltados em negrito na tabela.

Embora esses desvios tenham acontecido em uma única aresta dos três CDPs processados, é notável que o não cumprimento das tolerâncias necessárias ocorreu unicamente durante o corte feito a partir da ferramenta desgastada. Além disso, é evidente que os desvios dimensionais se intensificaram também ao utilizar a ferramenta que provocou maior nível de vibração no processo.

Tabela 4 – Dimensional dos corpos de prova.

CDP	Ferramenta	S1	S2	S3	S4
1		149,950	<b>149,710</b>	149,940	149,960
2	A	149,970	<b>149,730</b>	149,960	149,980
3		149,920	<b>149,690</b>	149,910	149,930
4		150,050	149,850	150,010	150,020
5	B	150,060	149,900	149,980	150,070
6		150,100	149,830	149,880	150,030
7		149,940	150,030	149,900	150,070
8	C	150,070	149,960	150,050	150,050
9		150,080	149,950	150,000	150,080
10		150,000	149,830	149,920	150,040
11	D	150,030	149,830	149,950	150,030
12		150,030	149,810	150,010	150,060

Fonte: Elaborada pelo próprio autor.

### 4.3 RUGOSIDADE SUPERFICIAL

A rugosidade da superfície acabada foi medida a fim de identificar a qualidade do acabamento dos CDPs. O instrumento de medição utilizado é um rugosímetro Mahr® modelo Marsurf PS 10 e os parâmetros coletados foram o desvio da média aritmética [Ra] e a rugosidade do núcleo [Rk] em  $\mu\text{m}$ . O instrumento e os corpos de prova são apresentados na Figura 22.

O parâmetro Ra é definido como a altura média da rugosidade, medida a partir da linha média da superfície. O parâmetro Ra leva em conta apenas a altura máxima da onda da rugosidade e não a forma da onda. Por essa razão, ele é considerado menos preciso que outras medidas da rugosidade, como o parâmetro Rk. No entanto, o parâmetro Ra é amplamente utilizado na indústria devido à sua simplicidade e facilidade de medição. (KALPAKJIAN; SCHMID; MUSA, 2010) e (ISO, 2002).

O parâmetro Rk leva em conta a forma da onda da rugosidade, e não apenas a altura máxima da onda como outras medidas da rugosidade. O parâmetro Rk é um dos parâmetros de rugosidade mais comumente usados na indústria, pois fornece uma medida precisa da rugosidade de uma superfície usinada e é facilmente medido com instrumentos de medição da rugosidade.

Ele é amplamente utilizado em aplicações onde a rugosidade superficial é um fator importante, como em peças mecânicas.

Figura 22 – Rugosímetro e CDPs.



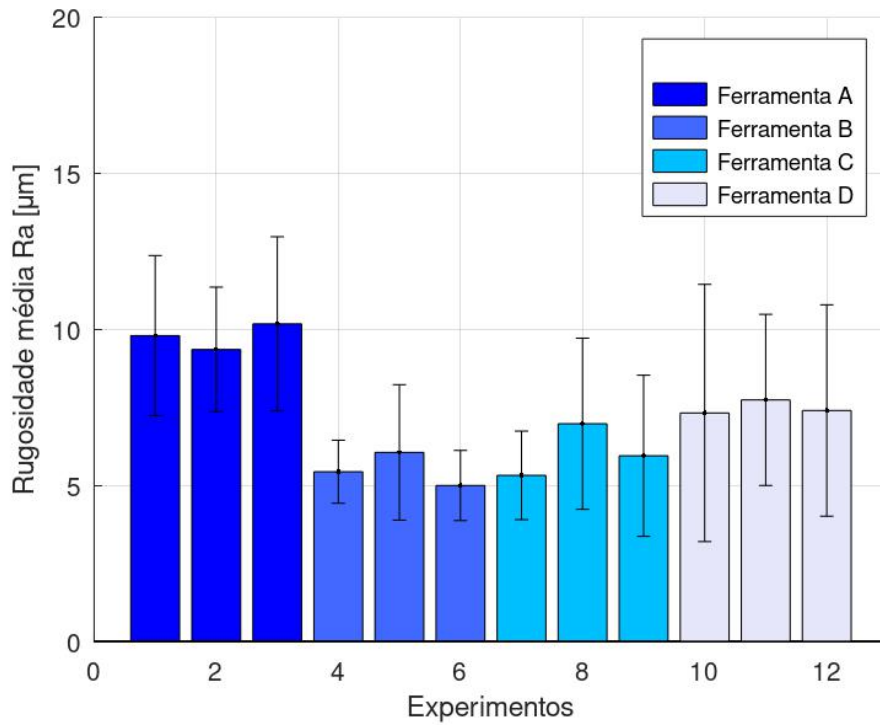
Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

Para cada aresta do CDP foi realizada a leitura da rugosidade superficial em três locais distintos: um em cada extremidade e um ao centro. Com os valores obtidos foi calculado a média aritmética dos doze valores e o desvio padrão. Os dados analisados são apresentados na Figura 23.

É possível notar que a rugosidade média ( $R_a$ ) para os corpos de prova fresados com a ferramenta **A** apresentam os maiores valores sugerindo relação do desgaste da ferramenta com a qualidade do acabamento superficial, apesar de haver uma grande dispersão dos dados. A ferramenta **B** apresenta os melhores valores médios de acabamento. A resina epóxi possui em sua constituição micro esferas ocas de vidro com a função de reduzir a densidade da resina curada, esse constituinte favorece o resultado elevado do calculo de desvios das medições havendo intersecções entre as amostras fresadas com ferramentas diferentes.

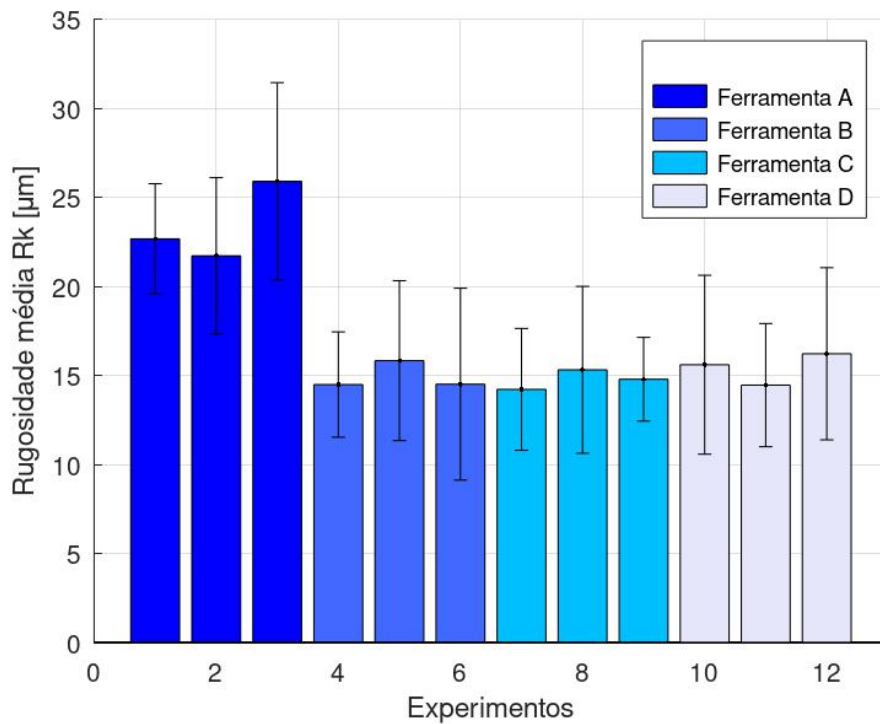
Pelo fato de o parâmetro de rugosidade ( $R_k$ ) ser mais preciso que o parâmetro ( $R_a$ ) na Figura 24 notamos que os valores de rugosidade para os CDPs de um modo geral, para parâmetro  $R_k$ , são maiores em relação a  $R_a$ , mas ainda assim o CDP usinado com a ferramenta **A** apresenta os maiores valores sugerindo novamente a relação do desgaste da ferramenta e acabamento da superfície usinada.

Figura 23 – Rugosidade Ra dos CDPs.



Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

Figura 24 – Rugosidade Rk dos CDPs.

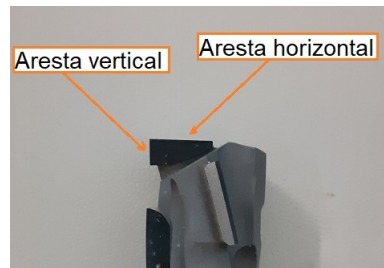


Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

#### 4.4 ANÁLISE DO DESGASTE DA FERRAMENTA DE CORTE

A aresta de corte principal das ferramentas de corte (A, B, C e D) foi analisada em um microscópio *Alicona InfiniteFocus SL*. Neste momento, presume-se ser suficiente correlacionar as vibrações e o desgaste da ferramenta de corte utilizando apenas esta região, pois a todo momento esta região está em contato com a superfície fresada. A Figura 25 mostra as arestas nomeadas como horizontal e vertical que são usadas para referir-se à região da ferramenta.

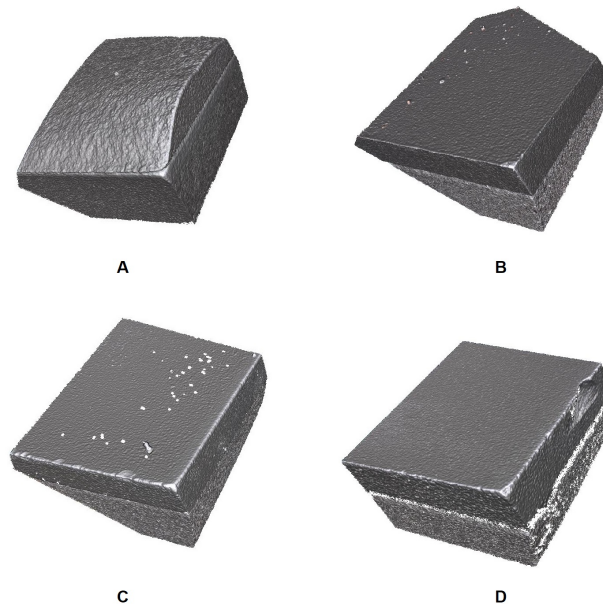
Figura 25 – Arestas de corte horizontal e vertical.



Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

As arestas verticais da ponta das ferramentas **A**, **B**, **C** e **D** são mostradas na Figura 26. É possível observar a aresta de corte arredondada em **A**, **C** e **D**, enquanto o raio da aresta na ferramenta **B** é menor sugerindo um desgaste mais proeminente na ferramenta **A**.

Figura 26 – Arestas de corte das ferramentas.

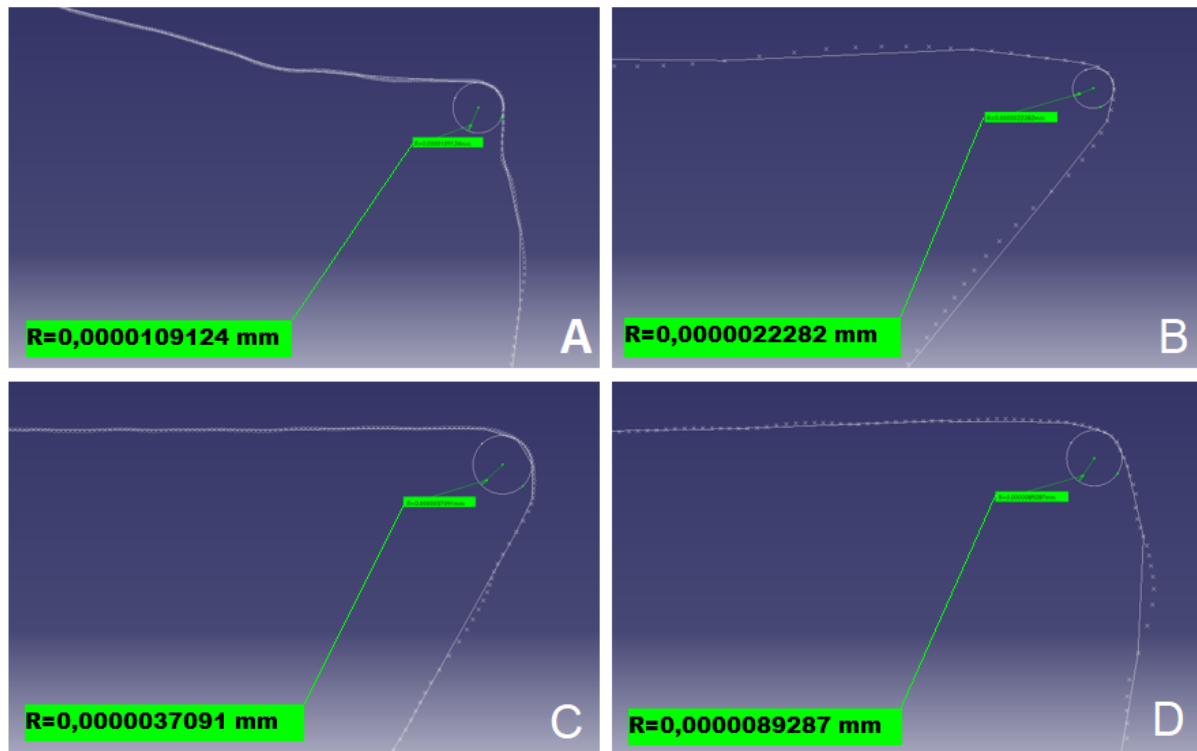


Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

Os valores dos raios das ferramentas de corte foram medidos com o auxílio do *software* do microscópio, onde a ferramenta de extração do perfil foi utilizado e os resultados, em seguida,

foram tabelados e importados no *software* CAD Catia™Dassault Systèmes® para realizar o desenho em 2D do perfil da ferramenta e por fim a medição do raio da aresta de corte. Os resultados são apresentados na Figura 27.

Figura 27 – Raio das ferramentas de corte.

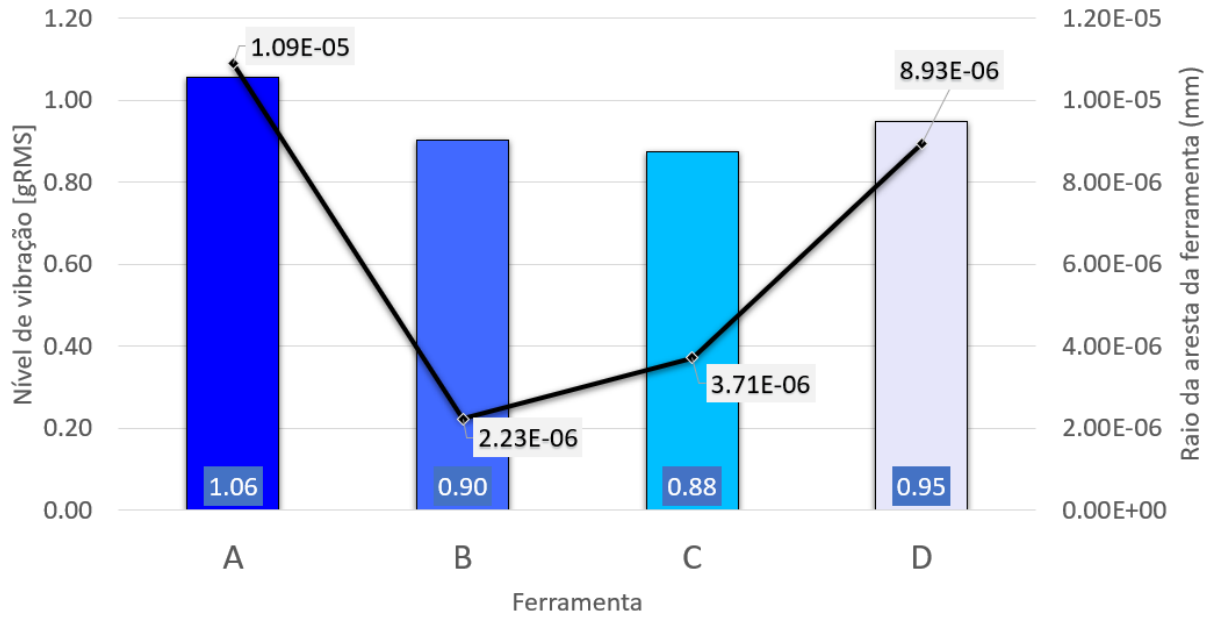


Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

É possível notar uma relação direta entre nível de vibração e dimensão do raio da aresta de corte das ferramentas conforme apresentado na Figura 28. No gráfico as barras representam o nível de vibração RMS e no componente linha estão os valores dimensional do raio da aresta da ferramenta de corte. O raio da ferramenta A é o maior em comparação com os demais assim como visto anteriormente os níveis de vibração.

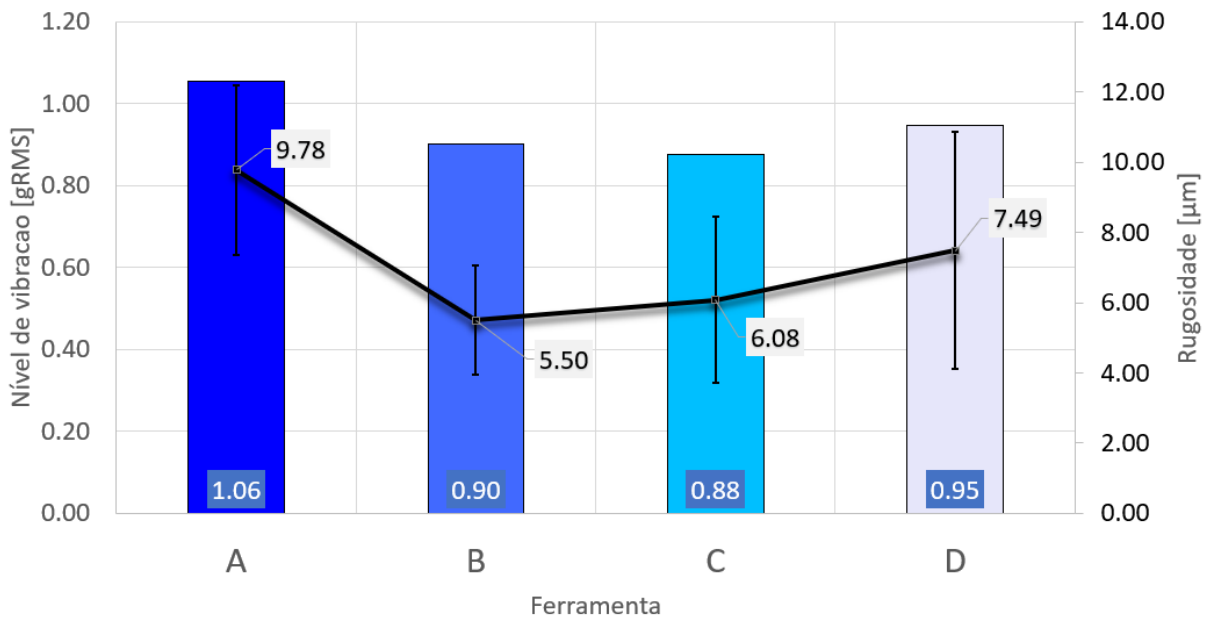
Já para a rugosidade superficial na Figura 29, no gráfico as barras representam o nível de vibração RMS e no componente linha estão os valores de rugosidade com o desvio padrão, é possível observar também uma correlação com os níveis de vibração, é necessário aprofundar os estudo nesse parâmetro pois o desvio padrão das medições de rugosidade foram altos havendo um numero considerável de intersecções de dados entre os grupos, isso se dá também pela caracterização do próprio material da amostra que por natureza possui constituintes que implicam em uma rugosidade aleatória.

Figura 28 – Nível de vibração e raio da ferramenta.



Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

Figura 29 – Nível de vibração e raio e rugosidade media.



Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

## 5 CONCLUSÃO

O presente trabalho se propôs utilizar uma placa microcontroladora de prototipagem de baixo custo para monitorar o desgaste da ferramenta durante a usinagem robótica de materiais compósitos.

Um corpo de prova quadrado simples é fabricado fresando um painel sanduíche preenchido com resina epóxi comumente usado na indústria aeronáutica. A vibração do processo é adquirida por um acelerômetro colocado no *spindle* instalado em um robô.

O nível de vibração RMS e a frequência de pico do sinal são calculados diretamente na placa microcontroladora de baixo custo usando o conjunto de dados amostrados e os resultados são exibidos em um navegador em rede com a placa.

A magnitude da vibração mecânica medida durante os testes experimentais mostra-se sensível ao desgaste da ferramenta. Esta sensibilidade da dinâmica dos processos de usinagem robótica à orientação do sistema é relatada por Chen e Dong (2013) e Barbosa, Shiki e Savazzi (2019), e pode ser problemática ao monitorar o desgaste da ferramenta de forma indireta por meio de medições de vibração.

Os principais resultados desse trabalho de pesquisa são:

- Existe uma relação direta entre o nível do sinal de vibração RMS e a dimensão do raio da aresta da ferramenta de corte;
- A rugosidade da superfície usinada é um parâmetro pouco confiável por conta da composição da resina epóxi que contém micro esferas ocas de vidro que imprimem um certo grau de irregularidade à superfície, sendo caracterizados pelos dados de desvio padrão dessa medição que está elevado;
- A instrumentação de baixo custo se torna viável para coleta de dados durante processos de usinagem de material composto como também a predição do estado da ferramenta de corte através das grandezas físicas como a vibração mecânica;

Algumas oportunidades para estudos futuros:

- Utilizar do método para avaliar os parâmetros ótimos de usinagem (rotação da ferramenta, velocidade de corte e velocidade de avanço) para material composto com robôs e relacionando estes à vibração do conjunto;
- Acrescentar ao método técnicas de inteligência artificial (IA) como o aprendizado de máquina (do inglês *Machine Learning*) para que o sistema identifique padrões para outras ferramentas de corte e materiais usinados;



- 
- Realizar o experimento desse trabalho de pesquisa mas utilizando uma máquina-ferramenta CNC específica para a usinagem de compósitos;
  - Encontrar as frequências naturais estruturais do sistema de modo a separar informações do processo de corte e do manipulador robótico;
  - Avaliar toda a vida útil de uma ferramenta em relação ao seu desgaste;
  - Criar um modelo para descrever a vida útil da ferramenta para este tipo de processamento de material.

## REFERÊNCIAS

ABELE, E.; WEIGOLD, M.; ROTHENBÜCHER, S. Modeling and identification of an industrial robot for machining applications. **CIRP Annals**, v. 56, p. 387–390, 2007. ISSN 00078506. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0007850607000947>>. Citado na página 27.

ABRAMOVICH, H. **Introduction to composite materials**. Elsevier, 2017. 1-47 p. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/B9780081004104000016>>. Citado 2 vezes nas páginas 20 e 27.

AGHENTA, L. O.; IQBAL, M. T. Low-cost, open source iot-based scada system design using thinger.io and esp32 thing. **Electronics**, v. 8, 7 2019. ISSN 2079-9292. Citado 2 vezes nas páginas 25 e 27.

AIRBUS. **Global market forecast**. 2022. Acessado em 03 Janeiro de 2023. Disponível em: <<https://www.airbus.com/en/products-services/commercial-aircraft/market/global-market-forecast>>. Citado na página 15.

ALONSO, F. J.; SALGADO, D. R. Analysis of the structure of vibration signals for tool wear detection. **Mechanical Systems and Signal Processing**, 2008. ISSN 08883270. Citado na página 27.

AMBHORE, N.; KAMBLE, D.; CHINCHANIKAR, S. Behaviour of cutting tool vibrations with the progress of tool wear in turning hardened aisi 52100 steel: An approach to tool condition monitoring system. In: . [S.l.: s.n.], 2018. v. 455. ISSN 1757899X. Citado na página 27.

ANDO, B.; BAGLIO, S.; PISTORIO, A. A low cost multi-sensor approach for early warning in structural monitoring of buildings and structures. In: . [S.l.]: IEEE, 2014. ISBN 978-1-4673-6386-0. Citado 2 vezes nas páginas 24 e 27.

ARAMESH, M. et al. Estimating the remaining useful tool life of worn tools under different cutting parameters: A survival life analysis during turning of titanium metal matrix composites (ti-mmc). **CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology**, v. 12, p. 35–43, 2016. ISSN 17555817. Citado na página 27.

ASHBY, M. F. et al. Technology of the 1990s: advanced materials and predictive design. **Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series A, Mathematical and Physical Sciences**, v. 322, p. 393–407, 7 1987. ISSN 0080-4614. Disponível em: <<https://royalsocietypublishing.org/doi/10.1098/rsta.1987.0059>>. Citado na página 17.

BARBOSA, G. F.; CORDEIRO, E. C.; COSTA, F. R. Systems and methods for manufacturing aircraft furniture parts using an integrated automated cell. In: . [s.n.], 2015. ISSN 01487191. Disponível em: <<https://www.sae.org/content/2015-01-2600/>>. Citado na página 27.

BARBOSA, G. F.; SHIKI, S. B.; SAVAZZI, J. O. Digitalization of a standard robot arm toward 4th industrial revolution. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 105, p. 2707–2720, 12 2019. ISSN 0268-3768. Disponível em: <<http://link.springer.com/10.1007/s00170-019-04523-2>>. Citado 3 vezes nas páginas 22, 27 e 47.

BREUER, U. P. **Commercial Aircraft Composite Technology**. Springer International Publishing, 2016. Acessado em 14 Julho de 2022. ISBN 978-3-319-31917-9. Disponível em: <<http://link.springer.com/10.1007/978-3-319-31918-6>>. Citado na página 15.

BRINKSMEIER, E.; FANGMANN, S.; RENTSCH, R. Drilling of composites and resulting surface integrity. **CIRP Annals - Manufacturing Technology**, v. 60, p. 57–60, 2011. ISSN 00078506. Citado 2 vezes nas páginas 23 e 27.

CAGGIANO, A. et al. Multiple sensor monitoring in drilling of cfrp/cfrp stacks for cognitive tool wear prediction and product quality assessment. In: . [S.l.]: Elsevier B.V., 2017. v. 62, p. 3–8. ISSN 22128271. Citado na página 27.

CAMPOBELLO, G.; SEGRETO, A.; DONATO, N. A new frequency estimation algorithm for iiot applications and low-cost instrumentation. In: . [S.l.]: IEEE, 2020. ISBN 978-1-7281-4460-3. Citado 2 vezes nas páginas 26 e 27.

CARDUCCI, C. G. C. et al. A versatile low-cost os-based phasor measurement unit. In: . [S.l.]: IEEE, 2019. ISBN 978-1-5386-3460-8. Citado 2 vezes nas páginas 25 e 27.

CEN, L.; MELKOTE, S. N. Effect of robot dynamics on the machining forces in robotic milling. **Procedia Manufacturing**, Elsevier, v. 10, p. 486–496, 2017. Citado na página 27.

CHEN, B. et al. Reliability estimation for cutting tools based on logistic regression model using vibration signals. **Mechanical Systems and Signal Processing**, v. 25, p. 2526–2537, 2011. ISSN 08883270. Citado 2 vezes nas páginas 23 e 27.

CHEN, C. et al. Stiffness performance index based posture and feed orientation optimization in robotic milling process. **Robotics and Computer-Integrated Manufacturing**, v. 55, p. 29–40, 2 2019. ISSN 07365845. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0736584518300024>>. Citado na página 27.

CHEN, Y.; DONG, F. Robot machining: Recent development and future research issues. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 66, 2013. ISSN 02683768. Citado na página 47.

DUBE, K.; NHAMO, G.; CHIKODZI, D. Covid-19 pandemic and prospects for recovery of the global aviation industry. **Journal of Air Transport Management**, Elsevier, v. 92, p. 102022, 2021. Citado na página 16.

D'ANTONIO, G.; BEDOLLA, J. S.; CHIABERT, P. A novel methodology to integrate manufacturing execution systems with the lean manufacturing approach. **Procedia Manufacturing**, v. 11, 2017. ISSN 23519789. Citado na página 16.

FAZZOLARI, F. A. **Sandwich Structures**. Elsevier, 2017. 49-90 p. ISBN 9780081004296. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/B9780081004104000028>>. Citado na página 27.

GIBSON, R. F. **Principles of Composite Material Mechanics**. [S.l.: s.n.], 2016. Citado na página 17.

GOYAL, D.; PABLA, B. S. The vibration monitoring methods and signal processing techniques for structural health monitoring: A review. **Archives of Computational Methods in Engineering**, v. 23, 12 2016. ISSN 1134-3060. Citado 2 vezes nas páginas 24 e 27.

HOLOVATYY, A. et al. Development of a system for monitoring vibration accelerations based on the raspberry pi microcomputer and the adxl345 accelerometer. **Eastern-European Journal of Enterprise Technologies**, v. 6, 11 2017. ISSN 1729-4061. Citado 2 vezes nas páginas 25 e 27.

HSISSOU, R. et al. Polymer composite materials: A comprehensive review. **Composite structures**, Elsevier, v. 262, p. 113640, 2021. Citado 2 vezes nas páginas 21 e 27.

HUYNH, H. N. et al. Modelling the dynamics of industrial robots for milling operations. **Robotics and Computer-Integrated Manufacturing**, v. 61, p. 101852, 2 2020. ISSN 07365845. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0736584519301784>>. Citado 2 vezes nas páginas 22 e 27.

ILIESCU, D. et al. Modeling and tool wear in drilling of cfrp. **International Journal of Machine Tools and Manufacture**, v. 50, p. 204–213, 2010. ISSN 08906955. Citado 2 vezes nas páginas 22 e 27.

ISO, N. 4287: 2002. **ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR ISO**, v. 4287, 2002. Citado na página 41.

JAAFAR, M. et al. A 3d fe modeling of machining process of nomex® honeycomb core: Influence of the cell structure behaviour and specific tool geometry. **Procedia CIRP**, v. 58, p. 505–510, 2017. ISSN 22128271. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S2212827117304389>>. Citado na página 27.

KALPAKJIAN, S.; SCHMID, S. R.; MUSA, H. **Manufacturing Engineering and Technology**. [S.l.]: Prentice Hall, 2010. Citado na página 41.

KLIMCHIK, A. et al. Experimental study of robotic-based machining. **IFAC-PapersOnLine**, v. 49, p. 174–179, 2016. ISSN 24058963. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S2405896316308515>>. Citado na página 27.

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. Citado na página 27.

OESTERGAARD, J. K. **Airbus and Boeing Report November 2022 commercial aircraft orders and deliveries**. Forecast International, 2022. Disponível em: <<https://dsm.forecastinternational.com/wordpress/2022/12/16/airbus-and-boeing-report-november-2022-commercial-aircraft-orders-and-deliveries/>>. Citado na página 15.

OOI, B.-Y.; SHIRMOHAMMADI, S. The potential of iot for instrumentation and measurement. **IEEE Instrumentation and Measurement Magazine**, v. 23, 5 2020. ISSN 1094-6969. Citado 2 vezes nas páginas 26 e 27.

RAMIREZ, C. et al. Tool wear monitoring and hole surface quality during cfrp drilling. In: . [S.l.: s.n.], 2014. v. 13, p. 163–168. ISSN 22128271. Citado na página 27.

RAWAT, S.; ATTIA, H. Wear mechanisms and tool life management of wc-co drills during dry high speed drilling of woven carbon fibre composites. **Wear**, Elsevier, v. 267, n. 5-8, p. 1022–1030, 2009. Citado na página 27.

SERIN, G. et al. Review of tool condition monitoring in machining and opportunities for deep learning. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, Springer, v. 109, n. 3, p. 953–974, 2020. Citado 2 vezes nas páginas 24 e 27.

SHEIKH-AHMAD, J.; DHUTTARGAON, M.; CHERAGHI, H. New tool life criterion for delamination free milling of cfrp. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 92, p. 2131–2143, 9 2017. ISSN 0268-3768. Disponível em: <<http://link.springer.com/10.1007/s00170-017-0240-2>>. Citado 2 vezes nas páginas 23 e 27.

VARANIS, M. et al. Instrumentation for mechanical vibrations analysis in the time domain and frequency domain using the arduino platform. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 38, 3 2016. ISSN 1806-1117. Citado 2 vezes nas páginas 24 e 27.

WANG, G.; LI, W. Manufacturing of lens arrays using fast tool servo system based on error correcting algorithm. **Optik**, v. 178, p. 698–703, 2 2019. ISSN 00304026. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0030402618315535>>. Citado na página 27.

WANG, M.; WANG, J. Chmm for tool condition monitoring and remaining useful life prediction. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 59, p. 463–471, 2012. ISSN 02683768. Citado na página 23.

XIONG, G.; DING, Y.; ZHU, L. M. Stiffness-based pose optimization of an industrial robot for five-axis milling. **Robotics and Computer-Integrated Manufacturing**, v. 55, 2019. ISSN 07365845. Citado 2 vezes nas páginas 22 e 27.

ZHANG, H. et al. Machining with flexible manipulator: toward improving robotic machining performance. In: . IEEE, 2005. p. 1127–1132. ISBN 0-7803-9047-4. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/document/1511161/>>. Citado na página 27.

ZHANG, Y. et al. Analysis of vibration response and machining quality of hybrid robot based ud-cfrp trimming. **Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture**, SAGE Publications Ltd, v. 235, p. 974–986, 5 2021. ISSN 20412975. Citado 2 vezes nas páginas 22 e 27.

## APÊNDICE A – CÓDIGO UTILIZADO PARA CAPTURA E ANÁLISE DE DADOS DE VIBRAÇÕES

```

1 #include <Arduino.h> // Biblioteca principal para
    arduino
2 #include "WiFi.h" // Biblioteca para comunicacao
    wifi
3 #include "ESPAsyncWebServer.h" // Biblioteca para comunicacao com
    web server
4 #include "Arduino_JSON.h" // Biblioteca para o JSON
5 #include <CircularBuffer.h> // Biblioteca para criacao de um
    buffer dos dados
6 #include "SPIFFS.h" // Biblioteca para manipulacao de
    arquivos
7 #include <fft.h> // Biblioteca para o calculo da
    FFT
8
9 #define Led 2 // Define o LED no pino 2
10 #define bStart 14 // Define o pino 14 como botao
    inicio
11 #define bPubli 12 // Define o pino 12 como botao
    publicacao
12
13 #define INTERVAL 1000 // 1 mili-segundos
14
15 #define Fs 1000.0 // Frequencia de amostragem [Hz]
16 #define NFFT 1024 // Tamanho do sinal a ser
    aquisitado (em quantidade de pontos)
17 float fft_input[NFFT]; // FFT vetor de entrada
18 float fft_output[NFFT]; // FFT vetor de saida
19 float fftmag[NFFT]; // FFT vetor de magnitude
20 int peak_pos; // Variavel com posicao do pico
21 int cicle = 0; // Variavel para contagem de ciclo
22 float peak_freq1; // Variavel com valor de
    frequencia de pico 1
23 float peak_freq2; // Variavel com valor de
    frequencia de pico 2
24
25 // Declaracao das variaveis de tempo
26 unsigned long lastTime = 0;
27 unsigned long timerDelay = 1000; //milisec
28 unsigned long lastMicros = 0;
29
30 // Declaracao dos pinos de entrada (nalogico)
31 const int Xpin = A0; // eixo x do acelerometro

```

```
32 const int Ypin = A3; // eixo x do acelerometro
33 const int Zpin = A6; // eixo x do acelerometro
34
35 // Declaracao das variaveis numericas
36 float rmsx;
37 float rmsy;
38 float rmsz;
39
40 float Xacc_value[NFFT];
41 float Yacc_value[NFFT];
42 float Zacc_value[NFFT];
43
44 int xaccarray[5];
45 int yaccarray[5];
46 int zaccarray[5];
47
48 int nStart_sts = 0;
49 int nPubli_sts = 0;
50
51 // Declaracao das variaveis de armazenamento de dados
52 CircularBuffer<int,NFFT> X_acc;
53 CircularBuffer<int,NFFT> Y_acc;
54 CircularBuffer<int,NFFT> Z_acc;
55
56 CircularBuffer<float,NFFT> Xrms_buff;
57 CircularBuffer<float,NFFT> Yrms_buff;
58 CircularBuffer<float,NFFT> Zrms_buff;
59
60 // Dados de autenticacao da rede wifi
61 const char* ssid = "JoZe";
62 const char* password = "01020304";
63
64 // cria o web service assincrono na porta 80
65 AsyncWebServer server(80);
66
67 // Cria a fonte de eventos em /events
68 AsyncEventSource events("/events");
69
70 // Variavel Json para gravar a leitura dos sensores
71 JSONVar readings;
72
73 // Inicializacao do algoritmo de FFT
74 fft_config_t *real_fft_plan = fft_init(NFFT, FFT_REAL, FFT_FORWARD,
    fft_input, fft_output);
75
76 // Cria arquivo file
77 File file;
```

```
78
79 // Inicializa a conexao WiFi
80 void initWiFi() {
81     WiFi.mode(WIFI_STA);
82     WiFi.begin(ssid, password);
83     Serial.print("Connecting to WiFi ..");
84     while (WiFi.status() != WL_CONNECTED) {
85         Serial.print('.');
86         delay(1000);
87     }
88     Serial.println(WiFi.localIP());
89 }
90
91 // a funcao setup roda uma vez ao energizar a placa ou pressionar reset
92 void setup() {
93
94     pinMode(bStart, INPUT);
95     pinMode(Led, OUTPUT);
96
97     Serial.begin(115200);
98     initWiFi();
99
100     // Web Server URL raiz
101     server.on("/", HTTP_GET, [](AsyncWebServerRequest *request){
102         request->send(SPIFFS, "/index.html", "text/html");
103     });
104
105     server.serveStatic("/", SPIFFS, "/");
106
107     // Requisita a ultima leitura do sensor
108     server.on("/readings", HTTP_GET, [](AsyncWebServerRequest *request){
109         String json = getSensorReadings();
110         request->send(200, "application/json", json);
111         json = String();
112     });
113
114     events.onConnect([](AsyncEventSourceClient *client){
115         if(client->lastId()){
116             Serial.printf("Client reconnected! Last message ID that it got is:
117             %u\n", client->lastId());
118         }
119         client->send("hello!", NULL, millis(), 1000);
120     });
121     server.addHandler(&events);
122
123     // Inicia o servidor
124     server.begin();
```



```
124
125 // Inicia o spiiffs
126 if(!SPIFFS.begin(true)){
127     Serial.println("Error: mounting SPIFFS");
128     return;
129 }
130 }
131
132 // loop de controle
133 void loop() {
134
135     nStart_sts = digitalRead(bStart);
136     nPubli_sts = digitalRead(bPubli);
137
138 // Botao pressionado 1 vez publica os valores de RMS
139 if (nPubli_sts == HIGH){
140
141     for (int zzzz =0; zzzz < NFFT ; zzzz++){
142         digitalWrite(Led, HIGH);
143         Serial.println(String(zzzz) + " " + String(Xrms_buff[zzzz],5) +
144             " " + String(Yrms_buff[zzzz],5) + " " + String(Zrms_buff[zzzz],5));
144         digitalWrite(Led, LOW);
145         delay(10);
146     }
147
148 }
149
150 // Botao pressionado realiza coleta
151 if (nStart_sts == HIGH){
152 // loop para coleta dos valores do sensor de vibracao
153 // respeitando o tempo de cilo estabelecido em INTERVAL
154 do {
155     if (micros() - lastMicros > INTERVAL) {
156         lastMicros = micros();
157         //media movel medicao em X
158         for (int wz=0; wz < 4; wz++){
159             xaccarrey[wz] = analogRead(Xpin);
160             yaccarrey[wz] = analogRead(Ypin);
161             zaccarrey[wz] = analogRead(Zpin);
162         }
163
164         X_acc.push(averagev(xaccarrey,5));
165         Y_acc.push(averagev(yaccarrey,5));
166         Z_acc.push(averagev(zaccarrey,5));
167
168         cicle = cicle + 1;
169
```

```
170     }
171     }while (cicle < NFFT);
172
173     // Converte o sinal analogico de tensao em aceleracao "g"
174     for (int ii=0; ii <NFFT; ii++)
175     {
176         Xacc_value[ii] = map(X_acc[ii], 1400.0, 2200.0, -1000.0, 1000.0)
177         /1000.0;
178         Yacc_value[ii] = map(Y_acc[ii], 1400.0, 2200.0, -1000.0, 1000.0)
179         /1000.0;
180         Zacc_value[ii] = (map(Z_acc[ii], 1440.0, 2220.0, -1000.0, 1000.0)
181         /1000.0) -1.0;
182     }
183
184     // calcula do valor RMS para cada eixo
185     rmsx = rms_calc(Xacc_value,NFFT);
186     Xrms_buff.push(rmsx);
187     rmsy = rms_calc(Yacc_value,NFFT);
188     Yrms_buff.push(rmsy);
189     rmsz = rms_calc(Zacc_value,NFFT);
190     Zrms_buff.push(rmsz);
191
192     // Laco para preencher sinal para calculo da FFT
193     for (int k = 0 ; k < NFFT ; k++)
194     {
195         // real_fft_plan->input[k] = (float) Xacc_value[k];
196         real_fft_plan->input[k] = Yacc_value[k];
197     }
198
199     // Executa FFT
200     fft_execute(real_fft_plan);
201
202     // Calcula vetor com magnitude da FFT e exhibe na tela
203     for (int k = 0 ; k < real_fft_plan->size / 2 ; k++)
204     {
205         fftmag[k] = sqrt(pow(real_fft_plan->output[2*k],2) + pow(
206         real_fft_plan->output[2*k+1],2))/(NFFT/2.0);
207     }
208
209     // Posicao do pico da magnitude - faixa 1
210     peak_pos = findmax_bound(fftmag,1,512); // Maxima freq. entre 2
211     (2*(Fs)/NFFT=0.48 Hz) e 100 (100*(Fs)/NFFT=24.41 Hz)
212     peak_freq1 = peak_pos*(Fs)/(NFFT); // Frequencia do pico
213
214     events.send(getSensorReadings().c_str(),"new_readings" ,millis());
215 }
```

```
212     else{
213         digitalWrite(Led, LOW);
214         delay(1500);
215         digitalWrite(Led, HIGH);
216         delay(3000);
217     }
218 }
219 // Secao das funcoes
220 // Funcao para encontrar posicao do maximo em array "arr" com tamanho "
    arrsize"
221 int findmax(float arr[],int arrsize){
222     int maxIndex = 0;
223     float maxValue = arr[maxIndex];
224     for (int k = 0;k<arrsize;k++){
225         if(arr[k]>maxValue){
226             maxValue = arr[k];
227             maxIndex = k;
228         }
229     }
230     return maxIndex;
231 }
232
233 // Funcao para encontrar posicao do maximo em "arr" entre os indices "
    arr_ini" e "arr_end"
234 int findmax_bound(float arr[],int arr_ini,int arr_end){
235     int maxIndex = arr_ini;
236     float maxValue = arr[maxIndex];
237     for (int k = arr_ini+1;k<arr_end;k++){
238         if(arr[k]>maxValue){
239             maxValue = arr[k];
240             maxIndex = k;
241         }
242     }
243     return maxIndex;
244 }
245
246 // Funcao para encontrar RMS de um array
247 float rms_calc(float arr[],int arrsize){
248     float rmsvalue = 0.0;
249     // Calcula o somatorio dos pontos ao quadrado
250     for (int k = 0;k<arrsize;k++){
251         rmsvalue = rmsvalue + pow(arr[k],2);
252     }
253     // Calcula RMS
254     rmsvalue = sqrt(rmsvalue/arrsize);
255     return rmsvalue;
256 }
```

```
257
258 // Funcao para coletar a leitura dos sensores e retorna o objeto JSON
259 String getSensorReadings(){
260     //sensors.requestTemperatures();
261     readings["sensor1"] = String(Xrms_buff[1024],5);
262     readings["sensor2"] = String(Yrms_buff[1024],5);
263     readings["sensor3"] = String(Zrms_buff[1024],5);
264     readings["sensor4"] = String(peak_freq1);
265
266     String jsonString = JSON.stringify(readings);
267     return jsonString;
268 }
269
270 // Funcao para calculo de media movel
271 float averagev (int * array, int len) // assuming array is int.
272 {
273     long sum = 0L ; // sum will be larger than an item, long for safety.
274     for (int i = 0 ; i < len ; i++)
275         sum += array [i] ;
276     return ((float) sum) / len ; // average will be fractional, so float
        may be appropriate.
277 }
```

## **ANEXO A – ESPECIFICAÇÃO DO PAINEL SANDUÍCHE**



**PRODUCT DATA SHEET**

# Gillfab® 4117

## DESCRIPTION

Gillfab® 4117 is a sandwich panel made with facings of fiberglass cloth reinforced epoxy laminate and Gillcore® HD meta-aramid honeycomb core.

## APPLICATIONS

The panel is designed for use in commercial aircraft nonstructural interiors and galley areas.

## FEATURES

- Lightweight, high strength construction
- Good self-extinguishing characteristics
- Good corrosion resistance
- Service temperature range: -60°F to 180°F (-51°C to 80°C)



## AVAILABILITY

Thickness, inch (mm)	0.125 (3.18)	0.500 (12.70)
	0.250 (6.35)	0.625 (15.88)
	0.344 (8.74)	0.720 (18.29)
	0.375 (9.53)	0.750 (19.05)
	0.400 (10.16)	1.00 (25.40)
Facing, face/back, inch (mm)	0.010/0.010 (0.254/0.254)	
	0.020/0.020 (0.508/0.508)	
	0.030/0.030 (0.762/0.762)	
Length, inch (mm)	Typical 96 (2,438), Maximum 144 (3,658)	
Width, inch (mm)	Typical 48 (1,219), Maximum 68 (1,727)	
Honeycomb	Gillcore® HD meta-aramid light-density honeycomb	



## CONSTRUCTION

- Adhesive:** Epoxy film  
**Core:** Gillcore® HD honeycomb  
**Facings Reinforcement:** Fiberglass cloth  
**Facings Resin System:** Epoxy

## ALTERNATIVE GILL PRODUCTS

TGC Product No.	Difference
Gillfab® 5071	Panel made from Gillcore® HD core and fiberglass cloth reinforced with phenolic resin with low smoke generation. The panel has superior strength to weight ratio for aircraft interior applications.
Gillfab® 4122A	Panel made from Gillcore® HD core and fiberglass cloth reinforced with phenolic resin with low smoke generation. Good strength to weight ratio for aircraft interior application.

## SPECIFICATIONS

- Embraer MEP - 15-017 Type I, III, IV, V, VI, VII, VIII
- FAR 25.853, 60 second vertical flammability test



**HEALTH PRECAUTIONS**

This product is safe to use and apply when recommended precautions are followed. Before using this product, read and understand the Safety Data Sheet (SDS), which provides information on health, physical and environmental hazards, handling precautions and first aid recommendations. A SDS is available at <https://www.thegillcorp.com/msds.php>.

For industrial use only. Keep away from children. Additional information can be found at: [www.thegillcorp.com](http://www.thegillcorp.com). For sales and ordering information call 1-626-443-6094.

**PERFORMANCE PROPERTIES, TYPICAL**

The following tests are run in accordance with MEP15-017 specification requirements.

TGC Part Number		4117 IX	4117 XI	4117 XII	4117 XIII	4117 XIV
Panel Weight, psf (kg/m <sup>2</sup> )		0.537 (2.62)	0.454 (2.22)	0.819 (4.00)	0.649 (3.17)	0.718 (3.51)
Panel Thickness, inch (mm)		0.242 (6.15)	0.745 (18.92)	0.995 (25.27)	0.741 (18.82)	0.746 (18.95)
Skin Thickness, face/back, inch (mm)		0.020/0.020 (0.508/0.508)	0.010/0.010 (0.254/0.254)	0.010/0.010 (0.254/0.254)	0.020/0.020 (0.508/0.508)	0.020/0.020 (0.508/0.508)
Flatwise compression, psi (Mpa)		491 (3.39)	302 (2.08)	286 (1.97)	298 (2.05)	622 (4.29)
Plate Shear Strength, lbs (N)	Ribbon	278 (1,236)	164 (730)	144 (641)	161 (716)	229 (1,019)
	Transverse	135 (601)	78 (347)	71 (316)	79 (351)	133 (592)
Long Beam Bending, lbs (N)	Ribbon	339 (1,508)	253 (1,125)	341 (1,516)	556 (2,473)	574 (2,553)
	Transverse	186 (827)	281 (1,250)	349 (1,552)	348 (1,548)	586 (2,607)
Short Beam Flexure, lbs (N)	Ribbon	360 (1,601)	253 (1,125)	790 (3,514)	708 (3,149)	105 (467)
	Transverse	197 (876)	351 (1,561)	435 (1,935)	350 (1,557)	588 (2,616)
Drum Peel, in-lbs/3" width (N-m/76mm width)		76 (8.59)	76 (8.59)	56 (6.33)	54 (6.10)	49 (5.54)
Flammability		Meet FAR 25.853 App F Part I (a)(1)(i)				

TGC Part Number		4117 XV	4117 XVI	4117 XVII	4117 XVIII	4117 XIX
Panel Weight, psf (kg/m <sup>2</sup> )		0.582 (2.84)	0.341 (1.66)	0.574 (2.80)	0.599 (2.92)	0.419 (2.05)
Panel Thickness, inch (mm)		0.488 (12.40)	0.374 (9.50)	0.494 (12.55)	0.619 (15.72)	0.622 (15.80)
Skin Thickness, face/back, inch (mm)		0.020/0.020 (0.508/0.508)	0.010/0.010 (0.254/0.254)	0.020/0.020 (0.508/0.508)	0.020/0.020 (0.508/0.508)	0.010/0.010 (0.254/0.254)
Flatwise compression, psi (Mpa)		604 (4.18)	352 (2.43)	307 (2.12)	290 (2.00)	283 (1.95)
Plate Shear Strength, lbs (N)	Ribbon	235 (1,045)	227 (1,010)	175 (778)	170 (756)	177 (787)
	Transverse	124 (552)	104 (463)	82 (365)	81 (360)	81 (360)
Long Beam Bending, lbs (N)	Ribbon	316 (1,406)	115 (512)	355 (1,579)	466 (2,073)	251 (1,116)
	Transverse	353 (1,570)	114 (507)	249 (1,108)	288 (1,281)	233 (1,036)
Short Beam Flexure, lbs (N)	Ribbon	659 (2,931)	391 (1,739)	515 (2,291)	666 (2,962)	573 (2,549)
	Transverse	365 (1,624)	218 (970)	267 (1,188)	293 (1,303)	293 (1,303)
Drum Peel, in-lbs/3" width (N-m/76mm width)		54 (6.10)	54 (6.10)	42 (4.75)	54 (6.10)	53 (5.99)
Flammability		Meet FAR 25.853 App F Part I (a)(1)(i)				

Figures shown reflect typical values and should not be used as design specifications.

All recommendations, statements, values and technical data herein are based on tests The Gill Corporation believes to be reliable and correct, but accuracy and completeness of said tests are not guaranteed and are not to be construed as a warranty, either expressed or implied. Users shall rely on their own information and tests to determine suitability of the product for the intended use and assume all risks and liability resulting from their use of the product. The Gill Corporation's sole responsibility shall be to replace that portion of the product that proves to be defective. The Gill Corporation will not be liable to the buyer or any third person for any injury, loss or damage directly or indirectly resulting from use of, or inability to use, the product. Recommendations or statements not contained in a written agreement signed by an officer of The Gill Corporation shall not be binding upon The Gill Corporation. Gillfab® and Gillcore® are registered trademarks of The Gill Corporation.

**ANEXO B – ESPECIFICAÇÃO DA RESINA EPÓXI DE PREENCHIMENTO DE  
BORDA**



# 3M™ Scotch-Weld™ Structural Void Filling Compound EC-3550 B/A FST • EC-3555 B/A FST

## Product Description

3M™ Scotch-Weld™ Structural Void Filling Compounds EC-3550 B/A FST and EC-3555 B/A FST (Fire Smoke Toxicity) are two-part, low-density, flame-retardant epoxy compounds that can be stored, applied and cured at room temperature.

Scotch-Weld EC-3550 B/A FST and EC-3555 B/A FST are non-sag, non-brittle compounds designed for void-filling, edge-sealing/close-out, corner reinforcement, local reinforcement for mechanical fixation and complex gap-filling in honeycomb sandwich structures. The cured materials meet 14 CFR 25.853 (a) and Airbus Directive (ABD) 0031.

Scotch-Weld 3550 B/A FST and EC-3555 B/A FST Compounds are available in dual-chamber cartridges and bulk kits for use with pneumatic dispensers and bulk pumping equipment.

## Features

- 100% solids.
- Base is brown with black spots; accelerator is off-white.
- Meets the flammability requirements of J.A.R./F.A.R. 25.853 (a).
- Meets Airbus stand-alone FST requirement.
- Available in duo-pack cartridges with static mixing nozzle or in bulk pumpable kits.
- Thixotropic properties for ease of application.
- Excellent sag resistance.
- Scotch-Weld EC-3550 B/A FST: Sandable & machinable within twelve hours at 75°F (23°C) of mixing or 1/2 hour at 175°F (80°C).
- Scotch-Weld EC-3555 B/A FST: Sandable & machinable within 6 hours at 75°F (23°C) of mixing or 1/2 hour at 175°F (80°C).
- Cures to a strong, low-density material within 48 hours at 75°F (24°C) or one hour at 175°F (80°C).
- Service temperature of -65°F to 212°F (-55°C to 100°C).
- Seals honeycomb panel edges and provides impact resistance to panel.
- Paintable.



# 3M™ Scotch-Weld™ Structural Void Filling Compound

## EC-3550 B/A FST • EC-3555 B/A FST

### Features

3M™ Scotch-Weld™ Structural Void Filling Compounds EC-3550 B/A FST and EC-3555 B/A FST are designed for honeycomb sandwich constructions typically found in aircraft interiors such as galley structures, luggage bins, partition walls, lavatory structures, crew rest compartments, seating structures, ceiling panels, closets, stowage compartments, sidewall panels, cargo bay panels, bar units, coatrooms and passenger doors.

### Typical Physical Properties

**Note:** The following technical information and data should be considered representative or typical only and should not be used for specification purposes.

	Scotch-Weld EC-3550 B/A FST		Scotch-Weld EC-3555 B/A FST	
	Part B	Part A	Part B	Part A
<b>Chemistry</b>	epoxy	modified amine	epoxy	modified amine
<b>Color</b>	brown with black spots	off-white	brown with black spots	off-white
<b>Typical Uncured Density</b>	0.58 g/cm <sup>3</sup>	0.61 g/cm <sup>3</sup>	0.58 g/cm <sup>3</sup>	0.62 g/cm <sup>3</sup>
<b>Typical Mixed Pot Life</b>	120 min @ 73°F (23°C)		60 min @ 73°F (23°C)	
<b>Typical Cured Density</b>	0.58 g/cm <sup>3</sup>			
<b>Form Stability (10g mixture) – Handleability</b>	9 h @ 73°F (23°C) or 4 h @ 110°F (43°C)		4.5 h @ 73°F (23°C) or 2 h @ 110°F (43°C)	
<b>Full Cure (10g mixture - Optimum mechanical properties)</b>	48 h @ 73°F (23°C) or 6 h @ 110°F (43°C)			
<b>Curing Process</b>	Room Temperature 73°F (23°C); max 110°F (43°C)			
<b>Consistency</b>	thixotropic paste			
<b>Slump/Sag (AITM 2-0033)</b>	less than 0.02 inch (0.5 mm)			
<b>Mix Ratio</b>	100:50 cc by volume; 100:52 g by weight			
<b>Solid Content</b>	100%			
<b>Application Method</b>	pumpable / cartridge dispensable / manual mix			
<b>Volatile Loss on Cure</b>	Less than 0.25%			
<b>Service Temperature Range</b>	-67°F to 212°F (-55°C to 100°C)			

# 3M™ Scotch-Weld™ Structural Void Filling Compound

## EC-3550 B/A FST • EC-3555 B/A FST

### Typical Product Performance

**Note:** The following technical information and data should be considered representative or typical only and should not be used for specification purposes.

#### Compressive Strength

A block was prepared from approximately 3.5 oz (100 grams) of manually mixed low density void-filler, which was carefully introduced into a mold with inner dimensions of approximately 2" x 2" x 8" (50 x 50 x 200 mm).

Individual specimens of the dimensions of 0.5" x 0.5" x 1.0" (12.5 x 12.5 x 25.0 mm) were cut from a cured block of void-filler with an accuracy of + 0.008" (+ 0.2 mm) on each dimension.

Compression strength tests were performed using a crosshead displacement rate of 0.02 inch/min (0.5 mm/min). All specimens were loaded with force applied to the 0.5" (12.5 mm) square surface.

Cure (air circulating oven): 48 hours at 72 ± 8°F (22 ± 5°C) followed by 60 ± 10 minutes at 150 ± 5°F (66 ± 3°C) with no additional pressure.

Properties	Test Method	Test Temperature	EC-3550 B/A FST		EC-3555 B/A FST	
			MPa	PSI	MPa	PSI
Typical Compressive Strength	ASTM D-695	73 ± 4°F (23 ± 2°C)	24	3500	24	3500

### Typical Product Application

#### Surface Preparation:

A cleaned, dry, contamination free surface is essential for maximum performance. For repeatable results the void-filler and the surfaces should have a temperature between 68-77°F (20-25°C).

#### Mixing:

3M™ Scotch-Weld™ Structural Void Filling Compounds EC-3550 B/A FST and EC-3555 B/A FST compounds can be mixed manually or automatically (using static mixer, minimum 18 elements, 13mm id). For repeatable performance keep mixing ratio in a range of ± 5% (100:50cc/100:52g).

Dual Cartridge application provides maximum accuracy and ease of handling. Scrap the first 2 cc and until you have a uniform color when using a new static mixer. From the start of mixing the work life refer to “Handability” on **Typical Physical Properties** table above. For ease of extrudability the product should be at the temperature of 75°F (25°C) but not greater than 110°F (43°C). Bulk pumping & mixing equipment recommendations are available upon request.

#### Curing Conditions:

A minimum cure time of 48 hours at room temperature or 48 hours at room temperature followed with a 1 hour at 150°F (66°C) post cure cycle to obtain the optimum mechanical properties of the product. Heat application accelerates the curing cycle.

#### Clean up of Void-Filler:

Uncured void-filler can be wiped with solvent e.g. Methyl-ethyl-ketone (M.E.K). Cured material can be cleanly removed mechanically.

### Storage Stability

Store 3M™ Scotch-Weld™ Structural Void Filling Compound EC-3550 B/A FST and 3M™ Scotch-Weld™ Structural Void Filling Compound EC-3555 B/A FST at 44°F and 77°F (7°C and 25°C). Rotate stock on “first in - first out” basis.”

### Shelf Life

Standard shelf life for 3M™ Scotch-Weld™ Structural Void Filling Compound EC-3550 B/A FST and 3M™ Scotch-Weld™ Structural Void Filling Compound EC-3555 B/A FST is 12 months from date of shipment when stored between 44°F and 77°F (7°C and 25°C).

# 3M™ Scotch-Weld™ Structural Void Filling Compound

## EC-3550 B/A FST • EC-3555 B/A FST

### Precautionary Information

Refer to Product Label and Material Safety Data Sheet for health and safety information before using this product. For additional health and safety information, please visit [www.3M.com/msds](http://www.3M.com/msds) or call 1-800-364-3577 or (651) 737-6501.

### For Additional Information

In the U.S., call toll free 1-800-235-2376, or fax 1-800-435-3082 or 651-737-2171. For U.S. Military, call 1-866-556-5714. If you are outside of the U.S., please contact your nearest 3M office or one of the following branches:

<b>Australia</b> 61-2-498-9711 tel 61-2-498-9710 fax	<b>Austria</b> 01-86686-298 tel 01-86686-229 fax	<b>Brazil</b> 55 19 3838-7876 tel 55 19 3838-6892 fax	<b>Canada</b> 800-410-6880 ext. 6018 tel 800-263-3489 fax
<b>China</b> 86-21-62753535 tel 86-21-62190698 fax	<b>Denmark</b> 45-43-480100 tel 45-43-968596 fax	<b>France</b> 0810-331-300 tel 30-31-6195 fax	<b>Germany</b> 02131-14-2344 tel 02131-14-3647 fax
<b>Italy</b> 02-7035-2177 tel 02-7035-2125 fax	<b>Japan</b> 03-3709-8245 tel 03-3709-8743 fax	<b>Korea</b> 02-3771-4114 tel 02-786-7429 fax	<b>Netherlands</b> 31-71-5-450-272 tel 31-71-5-450-280 fax
<b>South Africa</b> 11-922-9111 tel 11-922-2116 fax	<b>Spain</b> 34-91-321-6000 tel 34-91-321-6002 fax	<b>Switzerland</b> 01-724-9114 tel 01-724-9068 fax	<b>United Kingdom</b> (0) 161-237-6174 tel (0) 161-237-3371 fax

### Technical Information

The technical information, recommendations and other statements contained in this document are based upon tests or experience that 3M believes are reliable, but the accuracy or completeness of such information is not guaranteed.

### Product Use

Many factors beyond 3M's control and uniquely within user's knowledge and control can affect the use and performance of a 3M product in a particular application. Given the variety of factors that can affect the use and performance of a 3M product, user is solely responsible for evaluating the 3M product and determining whether it is fit for a particular purpose and suitable for user's method of application.

### Warranty, Limited Remedy, and Disclaimer

Unless an additional warranty is specifically stated on the applicable 3M product packaging or product literature, 3M warrants that each 3M product meets the applicable 3M product specification at the time 3M ships the product. 3M MAKES NO OTHER WARRANTIES OR CONDITIONS, EXPRESS OR IMPLIED, INCLUDING, BUT NOT LIMITED TO, ANY IMPLIED WARRANTY OR CONDITION OF MERCHANTABILITY OR FITNESS FOR A PARTICULAR PURPOSE OR ANY IMPLIED WARRANTY OR CONDITION ARISING OUT OF A COURSE OF DEALING, CUSTOM OR USAGE OF TRADE. If the 3M product does not conform to this warranty, then the sole and exclusive remedy is, at 3M's option, replacement of the 3M product or refund of the purchase price.

### Limitation of Liability

Except where prohibited by law, 3M will not be liable for any loss or damage arising from the 3M product, whether direct, indirect, special, incidental or consequential, regardless of the legal theory asserted, including warranty, contract, negligence or strict liability.

---

These products were manufactured under a 3M Quality Management System registered to the AS9100 standard.



#### Aerospace and Aircraft Maintenance Division

3M Center, Building 223-1N-14  
St. Paul, MN 55144-1000  
1-800-235-2376  
[www.3M.com/aerospace](http://www.3M.com/aerospace)

3M and Scotch-Weld are trademarks of the 3M Company.  
Please recycle. Printed in U.S.A.  
© 3M 2012 (4/12) All rights reserved.  
60-9700-0249-3





## Safety Data Sheet

Copyright, 2022, 3M Company.

All rights reserved. Copying and/or downloading of this information for the purpose of properly utilizing 3M products is allowed provided that: (1) the information is copied in full with no changes unless prior written agreement is obtained from 3M, and (2) neither the copy nor the original is resold or otherwise distributed with the intention of earning a profit thereon.

<b>Document Group:</b>	29-2129-4	<b>Version Number:</b>	5.05
<b>Issue Date:</b>	06/22/22	<b>Supersedes Date:</b>	06/04/21

### SECTION 1: Identification

#### 1.1. Product identifier

3M™ Scotch-Weld™ Structural Void Filling Compound EC-3550 B/A FST, Part A

#### 1.2. Recommended use and restrictions on use

##### Recommended use

Accelerator for two component void filling compound

#### 1.3. Supplier's details

<b>MANUFACTURER:</b>	3M
<b>DIVISION:</b>	Automotive and Aerospace Solutions Division
<b>ADDRESS:</b>	3M Center, St. Paul, MN 55144-1000, USA
<b>Telephone:</b>	1-888-3M HELPS (1-888-364-3577)

#### 1.4. Emergency telephone number

1-800-364-3577 or (651) 737-6501 (24 hours)

### SECTION 2: Hazard identification

#### 2.1. Hazard classification

Corrosive to metal: Category 1.  
Serious Eye Damage/Irritation: Category 1.  
Skin Corrosion/Irritation: Category 1C.  
Skin Sensitizer: Category 1A.  
Reproductive Toxicity: Category 1B.  
Specific Target Organ Toxicity (single exposure): Category 1.

#### 2.2. Label elements

##### Signal word

Danger

##### Symbols

Corrosion | Exclamation mark | Health Hazard |

##### Pictograms

**Hazard Statements**

May be corrosive to metals.

Causes severe skin burns and eye damage.

May cause an allergic skin reaction.

May damage fertility or the unborn child.

Causes damage to organs:

blood or blood-forming organs |

**Precautionary Statements****Prevention:**

Obtain special instructions before use.

Do not handle until all safety precautions have been read and understood.

Keep only in original container.

Do not breathe dust/fume/gas/mist/vapors/spray.

Wear protective gloves, protective clothing, and eye/face protection.

Do not eat, drink or smoke when using this product.

Wash thoroughly after handling.

Contaminated work clothing must not be allowed out of the workplace.

**Response:**

IF INHALED: Remove person to fresh air and keep comfortable for breathing.

IF ON SKIN (or hair): Take off immediately all contaminated clothing. Rinse skin with water/shower.

IF IN EYES: Rinse cautiously with water for several minutes. Remove contact lenses, if present and easy to do.

Continue rinsing.

Immediately call a POISON CENTER or doctor/physician.

If skin irritation or rash occurs: Get medical advice/attention.

Wash contaminated clothing before reuse.

IF SWALLOWED: Rinse mouth. Do NOT induce vomiting.

IF exposed or concerned: Get medical advice/attention.

Specific treatment (see Notes to Physician on this label).

Absorb spillage to prevent material damage.

**Storage:**

Store in a corrosive resistant container with a resistant inner liner.

Store locked up.

**Disposal:**

Dispose of contents/container in accordance with applicable local/regional/national/international regulations.

**Notes to Physician:**

Overexposure to this product may result in methemoglobinemia. Methemoglobinemia may be clinically suspected by the presence of clinical "cyanosis" in the presence of a normal PaO<sub>2</sub> (as obtained by arterial blood gases). Routine pulse oximetry may be inaccurate for monitoring oxygen saturation in the presence of methemoglobinemia, and should not be used to make the diagnosis of this disorder. If the patient is symptomatic or if the methemoglobin level is >20%, specific therapy with methylene blue should be considered as part of the medical management.

**2.3. Hazards not otherwise classified**

May cause chemical gastrointestinal burns.

1% of the mixture consists of ingredients of unknown acute dermal toxicity.

**SECTION 3: Composition/information on ingredients**

Ingredient	C.A.S. No.	% by Wt
POLY(OXYPROPYLENE)DIAMINE	9046-10-0	25 - 40 Trade Secret *
ALUMINA TRIHYDRATE	21645-51-2	15 - 30
GLASS BUBBLES	65997-17-3	5 - 25
EPOXY RESIN A	9003-36-5	< 10 Trade Secret *
TRIS(2,4,6-DIMETHYLAMINOMONOMETHYL)PHENOL	90-72-2	1 - 10 Trade Secret *
EPOXY RESIN B	25068-38-6	1 - 5 Trade Secret *
LIMESTONE	1317-65-3	1 - 5
ZINC BORATE	1332-07-6	1 - 5 Trade Secret *
CALCIUM SALT	13477-34-4	< 3 Trade Secret *
TREATED AMORPHOUS SILICA	67762-90-7	0.5 - 3
BIS[(DIMETHYLAMINO)METHYL]PHENOL	71074-89-0	0.1 - 2 Trade Secret *
BORIC ACID	10043-35-3	< 0.3 Trade Secret *

\*The specific chemical identity and/or exact percentage (concentration) of this composition has been withheld as a trade secret.

**SECTION 4: First aid measures****4.1. Description of first aid measures****Inhalation:**

Remove person to fresh air. If you feel unwell, get medical attention.

**Skin Contact:**

Immediately flush with large amounts of water for at least 15 minutes. Remove contaminated clothing. Get immediate medical attention. Wash clothing before reuse.

**Eye Contact:**

Immediately flush with large amounts of water for at least 15 minutes. Remove contact lenses if easy to do. Continue rinsing. Immediately get medical attention.

**If Swallowed:**

Rinse mouth. Do not induce vomiting. Get immediate medical attention.

**4.2. Most important symptoms and effects, both acute and delayed**

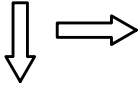
Skin burns (localized redness, swelling, itching, intense pain, blistering, and tissue destruction). Allergic skin reaction (redness, swelling, blistering, and itching). Serious damage to the eyes (corneal cloudiness, severe pain, tearing, ulcerations, and significantly impaired or loss of vision). Target organ effects. See Section 11 for additional details.

**4.3. Indication of any immediate medical attention and special treatment required**

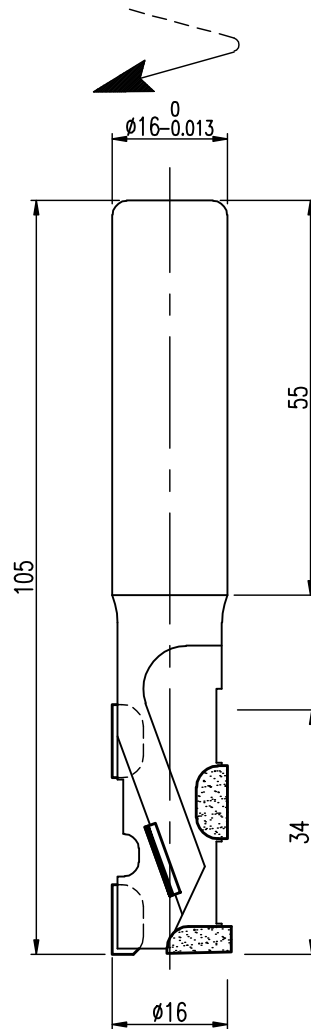
Overexposure to this product may result in methemoglobinemia. Methemoglobinemia may be clinically suspected by the presence of clinical "cyanosis" in the presence of a normal PaO<sub>2</sub> (as obtained by arterial blood gases). Routine pulse oximetry may be inaccurate for monitoring oxygen saturation in the presence of methemoglobinemia, and should not be used to make the diagnosis of this disorder. If the patient is symptomatic or if the methemoglobin level is >20%, specific therapy with methylene blue should be considered as part of the medical management.

**ANEXO C – DESENHO DA FERRAMENTA**





**MEC**  
DP / Z1+1



**Nota:** B820.016.135.16  
Cód. Embraer 7366442

© Este desenho é propriedade da FREZITE. Toda a reprodução parcial ou na totalidade terá que ser submetida a uma autorização por escrito.	Desen.	Data	Nome	Proj.Europ. 	<b>FREZITE</b> São Bento do Sul - SC - BRASIL
	Verif.	27/02/12	Ronei		
© The copyright of this drawing is owned by FREZITE. The drawing shall not be reproduced nor its contents disclosed to a third part without written permission from FREZITE.	Escalas	Embraer			<b>BDC.5201.1</b>
	1:1	Obs: Recorte peças painel composto			Substitui: Des. de 27/01/12 Substituído: