

EVERTON COELHO DE MEDEIROS

**Fresamento tangencial utilizando eixo árvore de material compósito híbrido: Uma
avaliação experimental do comportamento dinâmico**

Guaratinguetá

2021

Everton Coelho de Medeiros

**Fresamento tangencial utilizando eixo árvore de material compósito híbrido: Uma
avaliação experimental do comportamento dinâmico**

Tese apresentada a Faculdade de Engenharia do
Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual
Paulista, para a obtenção do título de Doutor em
Engenharia Mecânica na Área de Projetos.

Orientador: Prof. Dr. Mauro Hugo Mathias

Co-orientador: Prof. Dr. Manoel Cleber de Sampaio Alves

Guaratinguetá

2021

M488f	Medeiros, Everton Coelho de Fresamento tangencial utilizando eixo árvore de material compósito híbrido: uma avaliação experimental do comportamento dinâmico / Everton Coelho de Medeiros - Guaratinguetá, 2021. 99 f : il. Bibliografia: f. 85 - 95 Tese (Doutorado) – Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, 2021. Orientador: Prof. Dr. Mauro Hugo Mathias Co-orientador: Prof. Dr. Manoel Cleber de Sampaio Alves 1. Materiais compostos. 2. Rotores – Dinâmica. 3. Resinas epoxi. 4. Usinagem. I. Título. CDU 620.1(043)
-------	--

Luciana Máximo

Bibliotecária-CRB-8/3595

EVERTON COELHO DE MEDEIROS

**ESTA TESE FOI JULGADA ADEQUADA PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO DE
“DOUTOR EM ENGENHARIA MECÂNICA”**

**PROGRAMA: ENGENHARIA MECÂNICA
CURSO: DOUTORADO**

APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO

Prof.^a, Dr.^a, Ivonete Ávila
Coordenadora

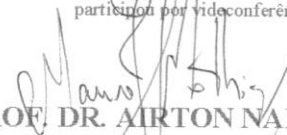
BANCA EXAMINADORA:


PROF. DR. MAURO HUGO MATHIAS

Orientador / UNESP/FEG
participou por videoconferência


PROF. DR. EDSON COCCHIERI BOTELHO

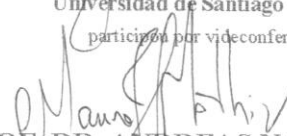
UNESP/FEG
participou por videoconferência


PROF. DR. AIRTON NABARRETE

Instituto Tecnológico de Aeronáutica
participou por videoconferência


PROFa. DRa. MARCELA ANDREA CRUCHAGA

Universidad de Santiago de Chile
participou por videoconferência


PROF. DR. ANDREAS NASCIMENTO

Universidade Federal do Espírito Santo
participou por videoconferência

DADOS CURRICULARES

EVERTON COELHO DE MEDEIROS

NASCIMENTO	26.06.1992 – São José dos Campos / SP
FILIAÇÃO	Ricardo de Medeiros Célia Gonsalves Coelho de Medeiros
27/01/2017	Engenharia Mecânica Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho" Campus de Guaratinguetá – UNESP
20/07/2018	Mestrado em Engenharia Mecânica – Área de Projetos Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho" Campus de Guaratinguetá – UNESP
28/02/2021	Especialização em Formação Didático-Pedagógica para Cursos na Modalidade à Distância Universidade Virtual do Estado de São Paulo - UNIVESP
02/07/2021	Doutorado em Engenharia Mecânica – Área de Projetos Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho" Campus de Guaratinguetá – UNESP

Dedico este trabalho ao meu filho Heitor.
Sempre que papai precisou de forças e as vezes o cansaço ou desanimo vinham, bastava recordar de seu sorriso que vinha vontade de tirar o melhor de mim, só assim que esse doutorado chegou ao fim.

AGRADECIMENTOS

a Deus, que se mantém presente em todos os momentos, me dando forças, calma e sabedoria para lidar com tarefas tão desafiadoras. Colocando as pessoas certas, nos momentos certos. E que enquanto rezava sempre me atendeu com suas bênçãos.

a meus pais que me apoiaram para seguir os estudos, etapa a etapa, sendo sempre o meu porto seguro quando mais precisava. A Caroline, minha amiga e mãe do meu filho, que também me apoiou muito nesse período de tantos sacrifícios e de turbulência. E ao meu filho Heitor, que mesmo tão pequeno me traz paz e serenidade em seu olhar tão cheio de amor, espero ser seu motivo de orgulho no futuro quando olhar para mim.

a meu amigo e orientador Prof. Dr. Mauro Hugo Mathias, que considero primeiramente como amigo para em seguida ser orientador, afinal seu papel foi muito maior do que ser apenas o meu tutor. Toda minha trajetória acadêmica (graduação, mestrado e doutorado) é devida aos seus vários ensinamentos, conselhos e conversas com cafés que tivemos. Tenho uma gratidão eterna por tudo o que fez por mim.

ao Prof. Dr. Manoel Cleber de Sampaio Alves pela amizade e o auxílio dado no ajuste do trabalho nessa reta final.

a meus amigos, colegas de trabalho e alunos do Colégio Técnico e da Faculdade de Engenharia que em seu ambiente tão acolhedor me fizeram sentir que estou em casa novamente.

a todos que de alguma forma contribuíram para alcançar esse objetivo de vida que sempre almejei.

“Inteligência é a capacidade de se adaptar à mudança. ”

STEPHEN HAWKING

RESUMO

Elementos rotativos, tais como eixos em máquinas rotativas, vêm sendo projetados com o objetivo de aumentar a performance e baixar o custo. O uso de materiais diferentes dos metálicos tem encontrado cada vez mais espaço em aplicações de engenharia. O material compósito vem sendo utilizado em segmentos automobilísticos e aeroespaciais, devido à capacidade de se ter altos níveis de resistência mecânica aliado a baixa densidade. Em máquinas operatrizes, essa mudança e pesquisa por aplicação de diferentes materiais em eixos árvores vêm sendo pouco explorada, principalmente na usinagem do tipo tangencial. A usinagem tangencial é utilizada para produção de peças como engrenagens, cremalheiras, guias e encaixes. Os eixos árvore de material compósitos estão sujeitos a mecanismos de falha por roçamento, que são compostos pelo roçamento contínuo (atrito) e roçamento intermitente (impacto). Esta pesquisa tem como objetivo apresentar uma avaliação experimental de um eixo árvore aplicado a usinagem do tipo tangencial, feito de material de fibra de carbono e resina epóxi nas situações de operação em que há o roçamento do tipo intermitente, ou seja, durante o período de usinagem. Dentro dessa avaliação é feito uma caracterização do eixo, observando sua construção híbrida feita de fibras unidirecionais, ordenados ortogonalmente em empilhamento de camadas, e de uma camada mais externa feita de um tecido do tipo plano (*plain weave*). Além disso, foram obtidos os valores das propriedades mecânicas do eixo, tais como o seu módulo de elasticidade longitudinal (54,33 GPa), e também os seus valores de frequência natural (493,77 Hz) e fator de amortecimento (14,58%). Durante a operação de usinagem por fresamento tangencial os parâmetros de corte foram controlados em diferentes aplicações de materiais, variando sua magnitude de roçamento de acordo com as condições operacionais de usinagem. Pode-se perceber nesse ensaio que o eixo de material compósito apresentou gráficos de órbitas com formas diferentes de um eixo metálico, em suas apresentações espectrais algumas frequências percebidas (1X e 2X) foram atenuadas no eixo de fibra de carbono e alguns outros valores sem relação harmônica também foram proeminentes, podendo ter relação com a excitação de seus modos de vibração lateral e torcional. Ao fim, uma avaliação da rugosidade resultante após processo de usinagem também foi feita e por meio da análise de variância constatou-se diminuição dos valores de Rz e Rt quando há aplicação do eixo compósito em relação ao metálico. Esse estudo experimental contribuiu para uma otimização do processo de usinagem tangencial utilizando de eixos feitos de materiais compósitos.

Palavras-chave: Eixo de Compósito. Fresagem Tangencial. Rotores. Análise Experimental.

ABSTRACT

Rotating elements, such as shafts on rotating machines, have been proposed with the objective of increasing performance and low cost. The application of different materials has been used in different fields in engineering. The composite material has been used in automotive, aerospace and oil & gas segments, due to its high levels of mechanical resistance combined with low density. In machine tools, modification and research by application of different materials in spindle axes are little explored, mainly in tangential milling. Tangential milling is used to produce parts such as gears, racks, guides and fittings. The rotors are subject to rubbing failure mechanisms, which consist of continuous rubbing by friction and intermittent rubbing by impact. This work aims to present an experimental evaluation of a spindle applied to the tangential milling, made of carbon fiber and epoxy resin considering operation situations where there is intermittent rubbing due to cutting process. Within this evaluation, a characterization of the axis is made, observing its hybrid construction made of unidirectional fibers, ordered orthogonally in stacking layers, and of an outer layer made of a braided type fabric (plain weave). In addition, the values of the mechanical properties of the shaft, such as its longitudinal elasticity module (54,33 GPa), as well as its values of natural frequency (493,77 Hz) and damping factor (14,58%), were collected. During the machining operation by tangential milling, the cutting parameters were controlled in different material applications, varying their rubbing magnitude. It can be seen in this essay that the composite rotor presented orbit graphs with different shapes than a metallic rotor. Its spectral presentations some perceived frequencies (1X and 2X) were attenuated in the carbon fiber axis and some other unrelated values harmonics were also prominent, and may be related to the excitation of their lateral and torsional vibration modes. At the end, an evaluation of the resulting roughness surface after the machining process was also carried out and, through the analysis of variance, a decrease in the values of R_z and R_t was verified when the composite rotor is applied in substitution to the metallic rotor. This experimental study contributed to an optimization of the tangential machining process using rotor made of composite materials.

Keywords: Composite Rotor. Tangential Milling. Rotor. Experimental Analysis.

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Valores de K_{s1} e $z-1$	37
Tabela 2: Valores dos parâmetros de corte na usinagem.....	43
Tabela 3: Descrição dos ensaios realizados.....	46
Tabela 4: Deslocamento estático do eixo durante ensaio de deflexão.	53
Tabela 5: Rugosidades após usinagem com eixo árvore de aço.....	67
Tabela 6: Rugosidades após usinagem com eixo árvore de compósito.....	68

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Falha em motor elétrico devido ao efeito de roçamento: (a) efeito sobre superfície do rotor e (b) desgaste interno no estator.	16
Figura 2: Modelo analítico do rotor analisado.....	21
Figura 3: Sequência de empilhamento em um material compósito.....	26
Figura 4: Assinatura espectral de falha por desbalanceamento.....	27
Figura 5: Assinatura espectral de falha por desalinhamento.	28
Figura 6: Modelo analítico do rotor em roçamento.....	29
Figura 7: Sistema de coordenadas e forças que agem no roçamento.	30
Figura 8: Assinatura espectral de falha por roçamento.	32
Figura 9: Gráfico de órbita de um mecanismo de falha do tipo roçamento.	32
Figura 10: Fresamento concordante e discordante.	35
Figura 11: Fresagem no sentido discordante e suas forças envolvidas.	36
Figura 12: Seccionamento das amostras para microscopia ótica: (a) ilustração do tamanho das amostras; (b) corte sendo executado na máquina.	39
Figura 13: Montagem de ensaio de deflexão do eixo.....	40
Figura 14: Montagem de ensaio para análise de frequências naturais e amortecimento.....	41
Figura 15: Análise da frequência natural e decaimento logarítmico da resposta de vibração do eixo após excitação por martelo modal.	42
Figura 16: Fresa escolhida com ângulos de saída, folga e cunha.	43
Figura 17: Eixo de compósito preparado para fixação na fresadora após colagem (em baixo).	44
Figura 18: Alinhamento da morsa de fixação com o uso de relógio comparador digital.....	45
Figura 19: Ajuste de montagem dos proximetros com calibres de folga (a) e ajuste do valor de tensão (b).	47
Figura 20: Detalhe da montagem dos acelerômetros.....	48
Figura 21: Fresadora com instrumentação montada.....	48
Figura 22: Validação do sistema com o uso de um excitador de fonte conhecida nos acelerômetros.....	49
Figura 23: Medição de rugosidade após usinagem das peças.	50
Figura 24: Microscopia da seção transversal do eixo de compósito.	51
Figura 25: Microscopia da seção longitudinal do eixo de compósito.	52
Figura 26: Curva ajustada de carregamento x deslocamento.	53

Figura 27: Avaliação da frequência natural.....	54
Figura 28: Comparações entre órbitas - Ensaio 1.....	55
Figura 29: Comparações entre órbitas - Ensaio 2.....	55
Figura 30: Comparações entre órbitas - Ensaio 7.....	56
Figura 31: Comparações entre órbitas - Ensaio 8.....	56
Figura 32: Comparações entre órbitas - Ensaio 10.....	57
Figura 33: Comparações entre órbitas - Ensaio 3.....	57
Figura 34: Comparações entre órbitas - Ensaio 4.....	58
Figura 35: Comparações entre órbitas - Ensaio 5.....	58
Figura 36: Comparações entre órbitas - Ensaio 6.....	58
Figura 37: Comparações entre órbitas - Ensaio 9.....	59
Figura 38: Comparações entre órbitas - Ensaio 11.....	59
Figura 39: Comparações entre órbitas - Ensaio 12.....	59
Figura 40: Comparações entre espectros de frequência - Ensaio 1.	61
Figura 41: Comparações entre espectros de frequência - Ensaio 2.	61
Figura 42: Comparações entre espectros de frequência - Ensaio 3.	62
Figura 43: Comparações entre espectros de frequência - Ensaio 4.	62
Figura 44: Comparações entre espectros de frequência - Ensaio 5.	63
Figura 45: Comparações entre espectros de frequência - Ensaio 6.	63
Figura 46: Comparações entre espectros de frequência - Ensaio 7.	64
Figura 47: Comparações entre espectros de frequência - Ensaio 8.	64
Figura 48: Comparações entre espectros de frequência - Ensaio 9.	65
Figura 49: Comparações entre espectros de frequência - Ensaio 10.	65
Figura 50: Comparações entre espectros de frequência - Ensaio 11.	66
Figura 51: Comparações entre espectros de frequência - Ensaio 12.	66
Figura 52: Comparação rugosidade (Ra) nos materiais após usinagem com eixo de aço e compósito.	68
Figura 53: Comparação rugosidade média (Rz) nos materiais após usinagem com eixo de aço e compósito.....	69
Figura 54: Comparação rugosidade total (Rt) nos materiais após usinagem com eixo de aço e compósito.	69
Figura 55: Dados da análise de variância para a rugosidade Ra.	71
Figura 56: Relação dos efeitos principais entre os parâmetros de entrada e a saída Ra [μm]. ..	72
Figura 57: Relação das interações entre os parâmetros de entrada e a saída Ra [μm].	73

Figura 58: Dados da análise de variância para a rugosidade Rz.	74
Figura 59: Relação dos efeitos principais entre os parâmetros de entrada e a saída Rz [μm]. ..	75
Figura 60: Relação das interações entre os parâmetros de entrada e a saída Rz [μm].	76
Figura 61: Dados da análise de variância para a rugosidade Rt.	77
Figura 62: Relação dos efeitos principais entre os parâmetros de entrada e a saída Rt [μm]. .	78
Figura 63: Relação das interações entre os parâmetros de entrada e a saída Rt [μm].	78

LISTA DE ABREVIATURAS

ABS	<i>Acrylonitrile Butadiene Styrene</i>
EMBT	<i>Equivalent Modular Beam Theory</i>
LBT	<i>Layerwise Beam Theory</i>
SHBT	<i>Simplified Homogenized Beam Theory</i>
SAE	<i>Society of Automotive Engineers</i>
HSS	<i>High Speed Steel</i>
CNC	<i>Computer Numerical Control</i>
UHM	<i>Ultra High Module</i>
HM	<i>High Module</i>
IM	<i>Intermediate Module</i>
LM	<i>Low Module</i>
UHS	<i>Ultra High Strength</i>
HS	<i>High Strength</i>
DGEBA	Diglicidil éter do bisfenol

LISTA DE SÍMBOLOS

c_i	Coeficiente de amortecimento interno
c_e	Coeficiente de amortecimento externo
u, v	Coordenadas de deslocamento
k	Rigidez
m	Massa
ζ	Fator de amortecimento
Ω, ω	Velocidade de rotação
ω_n	Frequência natural
M	Matriz de massa
C	Matriz de amortecimento
K	Matriz de rigidez
N	Força normal
μ	Coeficiente de atrito
F_t	Força tangencial de corte
F_{ap}	Força de apoio
F_f	Força de avanço
F_c	Força de corte
K_s	Pressão específica de corte
A	Área de seção transversal
H	Espessura do cavaco
a_p	Comprimento do gume da ferramenta de corte
σ_t	Limite de resistência a tração
f_z	Avanço por dente
a_e	Profundidade de corte
D	Diâmetro da ferramenta
φ_0	Ângulo de incidência do corte
V_c	Velocidade de corte
T	Torque
Ra	Rugosidade média
Rz	Rugosidade média total
Rt	Rugosidade total

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	15
1.1	MOTIVAÇÃO.....	15
1.2	OBJETIVOS	16
1.3	CONTRIBUIÇÕES	17
1.4	ESTRUTURA DA TESE	17
2	REVISÃO DE LITERATURA	19
2.1	EIXOS ROTATIVOS DE MATERIAL COMPÓSITO.....	19
2.1.1	Modelagem de rotores	20
2.1.2	Modelagem considerando amortecimento no eixo	20
2.2	MATERIAIS COMPÓSITOS	22
2.3	TEORIAS APLICADAS A EIXOS DE COMPÓSITOS.....	24
2.3.1	Teoria baseado em vigas	24
2.3.2	Teoria baseada em camadas	24
2.4	ADESIVOS EM MATERIAIS COMPÓSITOS	25
2.5	EIXOS HÍBRIDOS DE MATERIAIS COMPÓSITOS	26
2.6	MECANISMOS DE FALHAS EM MÁQUINAS ROTATIVAS	27
2.6.1	Desbalanceamento	27
2.6.2	Desalinhamento	28
2.6.3	Roçamento	28
2.6.3.1	Modelagem do efeito de roçamento do tipo intermitente.....	29
2.6.3.2	Assinatura experimental do roçamento.....	32
2.7	DINÂMICA ENVOLVIDA EM PROCESSOS DE USINAGEM	33
2.7.1	O processo de fresamento tangencial	34
2.7.2	Modelagem de forças envolvidas na usinagem por fresamento tangencial..	35
2.8	VIBRAÇÃO NA USINAGEM	38
3	MATERIAIS E MÉTODOS	39
3.1	CARACTERIZAÇÃO DE MATERIAIS COMPÓSITOS	39
3.2	AVALIAÇÃO ESTÁTICA DO EIXO	40
3.3	AVALIAÇÃO DINÂMICA DO EIXO.....	41
3.4	ENSAIO DE USINAGEM	42
3.4.1	Fixação do eixo de carbono como eixo árvore da fresadora	43
3.4.2	Procedimento de usinagem	45

4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	51
4.1	RESULTADO DA MICROSCOPIA	51
4.2	RESULTADO DA ANÁLISE ESTÁTICA	52
4.3	RESULTADO DA ANÁLISE DINÂMICA	54
4.4	RESULTADOS DOS ENSAIOS DE USINAGEM.....	54
4.4.1	Comparação das órbitas	54
4.4.2	Comparação entre os espectros de frequência.....	60
4.4.3	Resultados das rugosidades resultantes.....	67
5	CONCLUSÃO.....	79
5.1	SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS.....	80
	REFERÊNCIAS	81

1 INTRODUÇÃO

1.1 MOTIVAÇÃO

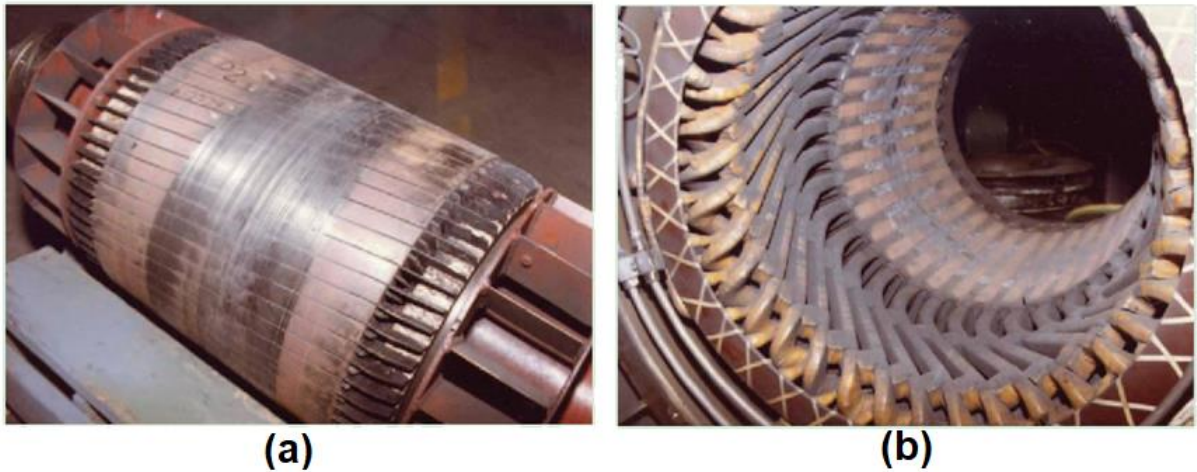
A usinagem de materiais é um importante processo de fabricação mecânica, por meio dela diferentes peças e elementos mecânicos são produzidos. Constantes evoluções nas máquinas operatrizes e nas ferramentas de corte vêm sendo implementadas com o objetivo comum de ampliar os índices de produtividade, bem como sua qualidade dimensional e superficial das peças fabricadas.

Dentre os processos de usinagem, o fresamento, processo em que consiste da ferramenta de corte estar em movimento e a peça a ser usinada fixa, produz peças poligonais e de diferentes perfis. No fresamento, o eixo árvore pode estar disposto no sentido vertical ou no horizontal. Operações com eixo árvore no sentido horizontal permitem a execução de entalhes, dentes de engrenagens, encaixes e outros perfis acabados.

A operação de usinagem produz vibração mecânica, indesejada, justificada por fenômenos como o desbalanceamento, desalinhamento, roçamento entre partes móveis e fixas e outros.

O estudo desses mecanismos em máquinas rotativas tem sido importante para a execução de boas práticas de manutenção preditiva. As falhas motivadas por interações entre rotor-estator, também chamadas de roçamento, possuem um elevado índice de destruição do equipamento. O roçamento se inicia principalmente por meio de outro mecanismo de falha, como por exemplo o desbalanceamento. Conforme um rotor se desbalanceia, as vibrações laterais do eixo levam ao choque com partes estáticas, esse choque à medida que aumenta a duração, transforma em períodos de desgaste entre as partes, chegando até um momento de colapso total do rotor. Um exemplo de falha do tipo é apresentado na Figura 1.

Figura 1: Falha em motor elétrico devido ao efeito de roçamento: (a) efeito sobre superfície do rotor e (b) desgaste interno no estator.



Fonte: Adaptado de Culbert; Letal (2017).

A evolução de materiais aplicados a eixos rotativos tem sido vista nos mais diversos campos da engenharia. Em automóveis de alta performance, como carros de corrida, há aplicações de eixos compósitos feitos de fibra de carbono em barras de direção e juntas cardan.

Entretanto, devido ao comportamento anisotrópico de materiais compósitos, os fenômenos e mecanismos de falhas não são previstos pela literatura clássica. Até mesmo as teorias de critério de falha, passam a ser diferentes em virtude da assimetria das propriedades do eixo.

1.2 OBJETIVOS

Este trabalho consiste da avaliação do comportamento dinâmico de um eixo árvore feito de material compósito, com base em fibra de carbono e matriz epóxi, aplicado a operação de fresamento tangencial. A assinatura de vibração desse tipo de operação pode ser comparada ao mecanismo de falha do tipo roçamento e por isso deve ser avaliado seu comportamento dinâmico enquanto sua operação de usinagem. Uma série de objetivos específicos estão ligados para o desenvolvimento do trabalho, assim é possível uma avaliação do comportamento dinâmico do sistema, sendo eles:

- Caracterização microscópica do eixo de compósito.
- Caracterização estática e dinâmica do eixo de compósito: obtenção do módulo de elasticidade longitudinal, frequência natural e fator de amortecimento.
- Avaliação experimental, através do uso de fresagem tangencial com o uso do eixo de compósito como sendo o eixo árvore. Variando os materiais a serem usinados, velocidade de corte, taxa de avanço e profundidade de corte.

1.3 CONTRIBUIÇÕES

A diversa implementação de materiais compósitos vem apresentando resultados positivos em diferentes campos da engenharia. Este estudo busca apresentar o estudo da aplicação de um rotor feito de material compósito para ser utilizado como eixo árvore em aplicação de usinagem tangencial.

A expansão do conhecimento de como eixos de materiais compósitos estão sujeitos a fenômenos de falha é de grande valia para a escolha e definição do uso de material em eixos árvores mais leves, com melhor desempenho de operação e com menores valores de vibração enquanto comparado com outras ligas metálicas.

1.4 ESTRUTURA DA TESE

No capítulo 1 se encontram tópicos de introdução, objetivos geral e específicos, contribuições previstas e a estrutura da tese. No capítulo 2 é apresentado uma revisão de literatura pertinente para fundamentação teórica do tema dessa tese. São apresentados, inicialmente, as aplicações de eixos compósitos como eixos principais em máquinas rotativas, bem como estudos de vibrações com esse material. Depois, são apresentadas as teorias que tratam de eixos feitos com material compósito, além disso são vistos o conceito de eixos híbridos e como suas propriedades mecânicas e dinâmicas mudam conforme sua construção, e o uso de adesivos para a montagem de sistemas híbridos. Mais adiante há a definição do roçamento, primeiramente tratando de mecanismos de falhas de uma maneira geral em máquinas rotativas, seus padrões dinâmicos identificados por meio de técnicas de medição e a análise de vibrações. Apresenta-se também o processo de modelagem dinâmica de um rotor sujeito a interações entre partes móveis e fixas. Mais ao fim é visto o estudo da dinâmica envolvida em processos de usinagem, em particular o fresamento tangencial, para ter

conhecimento da magnitude das forças envolvidas no eixo durante ensaio de roçamento simulado pela usinagem.

No capítulo 3 são apresentadas as metodologias utilizadas para o estudo proposto. No item 3.1, é descrito as etapas para definição da estrutura do compósito testado. Neste item o procedimento de avaliação por microscopia do eixo. No item 3.2 é visto a avaliação estática do eixo, onde nessa avaliação é obtido o valor do módulo de elasticidade longitudinal enquanto submetido ao ensaio de deflexão. No item 3.3 está a metodologia de ensaio para caracterização dinâmica do eixo através de análise modal, obtendo valores de frequência natural e fator de amortecimento. Por fim, no item 3.4, é apresentado a forma que o eixo de material compósito foi instalado em uma fresadora como sendo eixo-árvore horizontal, considerando os seus efeitos de torques máximos presentes no momento de usinagem é determinado o uso do adesivo para fixar eixo compósito a outras partes de outros materiais.

No capítulo 4 são apresentados os resultados oriundos da metodologia aplicada, a qual foi detalhada no capítulo 3. No item 4.1, são apresentados os números de camadas, bem como sua orientação de empilhamento e distinção de uso de tecidos. Item 4.2 apresenta o valor experimental do módulo de elasticidade longitudinal do eixo, obtidos pelo ensaio de deflexão. Já no item 4.3, são apresentados os valores das frequências naturais e fator de amortecimento obtido pelo decaimento logarítmico da resposta ao impulso de um martelo modal. No item 4.4.1 são apresentados os resultados das órbitas de vibração relativa do eixo quando no ensaio de usinagem, no item 4.4.2 são vistos os espectros de vibração para o mesmo ensaio de fresamento tangencial e no item 4.4.3 foram analisados os resultados dos valores de rugosidade superficial R_a , R_z e R_t , após fresagem tangencial. Houve um tratamento das variâncias para verificação da relevância estatística do material do eixo em relação aos demais parâmetros. Os resultados de ambos os eixos são comparados, visto que ambos possuem mesmas características geométricas, para assim perceber diferenças entre o uso de material metálico em comparação com o composto de carbono-epóxi.

Por fim, no capítulo 5 são dados as considerações finais levando em conjunto a caracterização feita do eixo objeto de estudo e sua relação com os resultados experimentais do comportamento dinâmico quando usado em teste de usinagem como eixo árvore, levando assim as conclusões da tese e sugestões para trabalhos futuros.

2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 EIXOS ROTATIVOS DE MATERIAL COMPÓSITO

A presença de máquinas rotativas é frequente em diversos setores industriais. Máquinas de grande porte, que percebem elevada carga dinâmica durante sua operação, tais como turbinas a vapor, turbinas a gás, hidro geradores e equipamentos de exploração de óleo & gás. A busca de aumento das demandas de produtividade e eficiência de operação, levam projetistas e engenheiros a buscarem diferentes abordagens no desenvolvimento de máquinas, alterando seus níveis de resistência mecânica e níveis de vibração durante sua faixa de operação.

Uma máquina rotativa é composta por um conjunto de peças, dentre elas, o conjunto rotor e estator, que é foco de estudos nas etapas de projeto, operação e manutenção. Segundo a ISO 1925 (2001) um rotor é um elemento apoiado em mancais, capaz de girar em torno de um eixo fixo no espaço.

O uso de ligas metálicas como material para construção do rotor é comumente percebido em vários equipamentos, como em motores a jato (YADAV et al., 2020) que utiliza de ligas de níquel, paládio e titânio em suas pás. Turbinas a vapor, apresentado por Bovsunovsky (2018), utilizam liga metálica aço R2MA em sua construção. Rauert et al. (2016) e Herrmann et al. (2016) apresentam um estudo de fadiga em um gerador de energia eólica em que possui um rotor forjado feito de uma liga de aço composta por cromo e molibdênio (42CrMo4). E em motores de helicópteros, parte do seu elemento rotor é feito de liga de alumínio 6068, como visto em Yang, Yannian et al. (2020).

Apesar do uso de ligas metálicas trazerem grandes níveis de resistência mecânica, sua densidade e por consequência seu peso, elevam a inércia para o movimento. Essa inércia obriga a máquina rotativa possuir um conjunto motor de alta potência para iniciar o movimento e manter esse movimento na faixa de operação. No entanto, pesquisas vêm sendo realizadas com a substituição do material metálico por outros materiais. Lipian et al. (2019) apresenta como alternativa o uso do polímero ABS (*acrylonitrile butadiene styrene*) como material do rotor de uma pequena turbina eólica.

A aplicação de eixos feitos de material compósito tem sido vista no ramo automobilístico, como as aplicações de eixos de transmissão (BODAKE e AHER, 2018; ELANCHEZHIAN et al., 2018; e NADEEM et al., 2018).

2.1.1 Modelagem de rotores

A dinâmica de rotores, campo de estudo específico para a avaliação do comportamento da movimentação em máquinas rotativas, apresenta modelos analíticos que compõem a dinâmica do sistema. Diversos autores em seus livros, tais como Friswell (2010), Muszynska (2005), Lallane e Ferraris (1997) e Rao (1996) mostram demonstrações para obtenção de equações de movimento em um conjunto rotor.

Chouksey et al. (2012) apresentam a análise modal de um sistema rotor levando em consideração efeitos de amortecimento interno do eixo e forças fluidodinâmicas. Roy e Tiwari (2020) em seu trabalho mostram a estimação dos parâmetros de amortecimento interno e externo por meio de análise de espectro de precessão direta e reversa de um eixo com trinca por fadiga.

Medeiros (2016) baseado na literatura de Friswell (2010), onde há modelos previstos quanto a condição de contorno para os mancais e eixo, sendo inicialmente apresentado o eixo flexível e mancais rígidos, em seguida eixo rígido e mancais flexíveis, e por fim eixos e mancais flexíveis. Essa última abordagem demonstrou resultados mais próximos entre o modelo analítico, modelo numérico e experimental proposto.

No entanto, quando se trata de eixos compósitos não há isotropia garantida entre seus módulos de elasticidade transversal e longitudinal. O eixo compósito então deve ser tratado como um material ortotrópico. Alguns trabalhos apresentam estudos da influência dessa anisotropia em eixos, Thurnherr et al. (2016) apresentam modelo de viga de alta ordem para a previsão de tensões em vigas curvas feitas de materiais anisotrópicos.

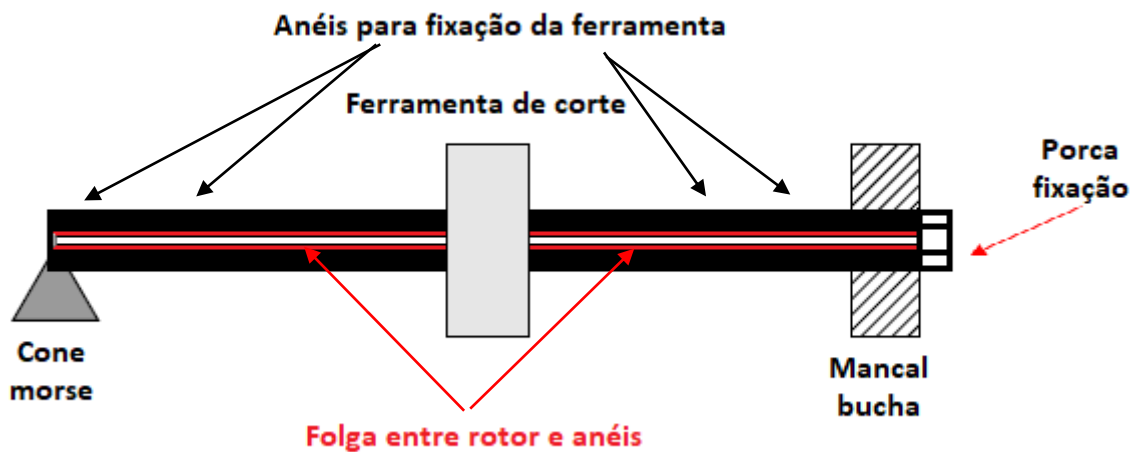
Outro ponto que se destaca em relação a modelagem tradicional de rotores feitos por ligas metálicas é o fato de seu fator de amortecimento ser baixo, com valores abaixo de 1 a 2% (RAO e XU, 2019; ORŠULOVÁ et al., 2019). Para este trabalho deve ser levado em consideração o eixo flexível e mancais rígidos.

2.1.2 Modelagem considerando amortecimento no eixo

A inserção do amortecimento no elemento rotativo leva a considerações diferentes das vistas na literatura tradicional de dinâmica de rotores. Alguns trabalhos apresentam que a inserção do amortecimento apresenta mudanças nos limites de instabilidade de operações com rotores (BEN ARAB et al., 2018; VERVISCH et al., 2016; MAZZEI e SCOTT, 2003).

A configuração de montagem do eixo árvore mostra que o rotor será submetido apenas a esforços de flexão, pois a folga entre os anéis que fixam a ferramenta de corte e o rotor é suficiente para que o eixo deforme e encoste nos anéis. Veja a configuração e a folga na cor vermelha na Figura 2.

Figura 2: Modelo analítico do rotor analisado.



Fonte: Autoria própria.

Considerando uma configuração onde o disco montado em um eixo simétrico flexível com amortecimento interno (FRISWELL, 2010), e que esse amortecimento seja do tipo viscoso, a força devida a esse amortecimento é dada por Equação 1:

$$F_{amort} = -c_i \begin{Bmatrix} \dot{u} \\ \dot{v} \end{Bmatrix} \quad (1)$$

Onde c_i é o coeficiente do amortecimento interno do rotor e o vetor composto pelas as velocidades de um sistema de coordenadas local.

A equação de movimento é dada segundo Friswell (2010) como Equação 2:

$$m \begin{Bmatrix} \ddot{u} \\ \ddot{v} \end{Bmatrix} + (c_e + c_i) \begin{Bmatrix} \dot{u} \\ \dot{v} \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} k & c_i \Omega \\ -c_i \Omega & k \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} u \\ v \end{Bmatrix} = 0 \quad (2)$$

Onde c_e é o coeficiente de amortecimento externo, m o valor da massa do rotor, k o valor da rigidez do sistema e Ω a rotação de operação.

Dividindo a equação por m , a equação de movimento é expressão em função do fator de amortecimento, Equação 3:

$$\begin{Bmatrix} \ddot{u} \\ \ddot{v} \end{Bmatrix} + 2\omega_n(\xi_e + \xi_i) \begin{Bmatrix} \dot{u} \\ \dot{v} \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} \omega_n^2 & 2\omega_n\xi_i\Omega \\ -2\omega_n\xi_i\Omega & \omega_n^2 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} u \\ v \end{Bmatrix} = 0 \quad (3)$$

Onde $\omega_n = \sqrt{k/m}$, $\xi_e = \frac{c_e}{2m\omega_n}$ e $\xi_i = \frac{c_i}{2m\omega_n}$.

Continuando em Friswell (2010), a equação característica, Equação 4, que irá trazer as informações de estabilidade ao sistema é:

$$s^2 + 2(\xi_e + \xi_i)\omega_n s + \omega_n^2(1 \pm 2\xi_i\eta i) = 0 \quad (4)$$

Onde $\eta = \Omega/\omega_n$.

Os autovalores dessa equação característica são vistas na Equação 5:

$$s_1, s_2, s_3, s_4 = -(\xi_e + \xi_i)\omega_n \pm \sqrt{(\xi_e + \xi_i)^2 - (1 \pm 2\xi_i\eta i)} \quad (5)$$

Se os autovalores possuírem partes reais negativas, ou seja, ao colocar os polos da equação característica no diagrama Real X Imaginário e ocuparem apenas o 2º e 3º quadrantes, o sistema é estável (FRISWELL, 2010).

2.2 MATERIAIS COMPÓSITOS

Os materiais compósitos possuem dois constituintes básicos: o reforço, segundo Berthelot (1999), garante aos materiais compósitos características mecânicas de rigidez, dureza e resistência mecânica. Também permite melhora em propriedades de natureza térmica, desgaste e elétrica, há duas classificações principais que os reforços: os reforços particulados e os reforços com fibras. Neste trabalho abordaremos apenas os reforços com fibras.

As estruturas de materiais compósitos que se baseiam por reforços com fibras são mais rígidas e resistentes do que a mesma base em sua forma unitária (CALLISTER, 2008). As fibras de carbono se apresentam quanto ao seu módulo de elasticidade, sua resistência a tração e a temperatura de tratamento térmico. Quanto ao módulo de elasticidade é dividido em quatro grupos: ultra-alto módulo (UHM) para módulos maiores que 500 GPa, alto módulo (HM) com

valores entre 300 e 500 GPa possuindo razão resistência/módulo de 5 a $7 \cdot 10^{-3}$, módulo intermediário (IM) de valores até 300 GPa com razão resistência/módulo maior que 10^{-2} e baixo módulo (LM) para módulos de até 100 GPa. Quanto a resistência a tração a fibra de carbono é dividida entre ultra-alta resistência (UHS) com resistência à tração maior que 5 GPa e razão resistência/rigidez entre 2 e $3 \cdot 10^{-2}$, e alta resistência (HS) para fibras com resistência a tração maiores que 2,5 GPa e razão resistência/rigidez entre 1,5 e $2 \cdot 10^{-2}$ (LEVY NETO e PARDINI, 2006).

No entanto, as fibras não têm utilidade estrutural de forma isolada, elas necessitam de um material adicional para que as aglutine, chamado de matriz. O objetivo fundamental da matriz é a união das fases de reforço, além disso também é responsável pela proteção do reforço de eventos ambientais e de manuseio (KAW, 2006). Por base, a matriz tem menor densidade, rigidez e menor resistência mecânica do que o reforço por fibras, porém determina os módulos transversais de resistência, cisalhamento, a resistência à compressão, propriedades térmicas de expansão, resistência térmica e de fadiga do material.

A matriz de resina epóxi é um tipo de resina polimérica classificada como termorrígido, sendo essa menos suscetível as variações de temperatura quando comparadas às resinas termoplásticas, no entanto, quando se atinge um valor de temperatura, a resina inicia seu processo de degradação.

Dentre as resinas epóxi mais utilizadas e conhecidas pode-se citar a DGEBA, diglicidil éter do bisfenol A, sinterizada através da reação entre a epicloidrina e o bisfenol-A. A proporção entre seus componentes varia, permitindo a obtenção de resinas fisicamente mais líquidas ou sólidas (LEVY NETO e PARDINI, 2006).

Existem também outros tipos de resinas como as de glicidil éter de novolaca, glicidil de aminas trifuncionais ou tetrafuncionais, de características multifuncionais e maior viscosidade à temperatura ambiente, permitindo a fabricação de materiais pré-impregnados. Além disso esses tipos de resina também apresentam maior grau de reticulação comparadas a DGEBA, tornando-as mais eficazes em altas temperaturas (LEVY NETO e PARDINI, 2006)

Podem ser citadas algumas outras vantagens e características atrativas desse tipo de matriz as boas propriedades mecânicas, o bom comportamento a temperaturas de 150 a 190°C em uso contínuo, boa resistência e estabilidade química, baixo encolhimento no processo de moldagem e no processo de cura, e boa adesão a materiais metálicos (BERTHELOT, 1999).

2.3 TEORIAS APLICADAS A EIXOS DE COMPÓSITOS

2.3.1 Teoria baseado em vigas

A modelagem de estruturas feitas de materiais compósitos deve levar em consideração parâmetros da sua fibra e resina de construção. Tsai¹ (1988, *apud* Ri et al., 2019) utilizou da teoria clássica de laminados para determinar os módulos de cisalhamento longitudinal e transversal, com base nisso foi possível obter os valores de frequência natural, considerando o comportamento ortotrópico do eixo.

O método proposto por Tsai, conhecido por Teoria Modular Equivalente de Viga ou em inglês *equivalent modular beam theory (EMBT)*, possui limitações quando o eixo de compósito com empilhamento assimétrico. Para que a teoria ainda fosse aplicada, Gubran e Gupta (2005) apresentam uma versão modificada do *EMBT* que considera o efeito de Poisson, a sequência de empilhamento e os acoplamentos entre flexão e torção.

2.3.2 Teoria baseada em camadas

Em paralelo uma teoria baseada na avaliação do eixo como cascas, chamada de teoria de viga baseada em camadas ou em inglês *layerwise beam theory (LBT)*, apresenta uma representação mais fidedigna em relação a *EMBT*, pois considera deformações em cada camada separadamente além do efeito da sequência de empilhamento e efeitos de acoplamento entre elas (SINGH e GUPTA, 1996).

Hajianmaleki e Qatu (2013) apresentam em seu artigo uma revisão entre os anos de 1989 a 2012, onde são apresentados teorias, metodologias de solução de equações, métodos experimentais, vigas inteligentes (como as que possuem memória de forma), dentre outros efeitos nos materiais compósitos e estrutura. Dentre as várias teorias apresentadas, as que se baseiam em teorias de camadas são vistas e destacadas quando comparadas as demais.

A avaliação de eixos feitos de fibra de carbono baseando na teoria das camadas, onde elas estão curvadas, vem sendo extensivamente estudada em busca de soluções exatas. Yasin et al. (2020) utilizam da solução de equações de continuidade e para reduzir o sistema a 3 variáveis, levando a uma eficiência computacional e obtendo seus valores de frequências naturais. Monge

¹ TSAI, S., **Composites Design**. 4th ed., 1988 *apud* RI et al. The effects of coupling mechanisms on the dynamic analysis of composite shaft. **Composite Structures**, Oxford, v. 224, n. April, p. 111040, 2019.

e Mantari (2020) apresentam em seu artigo uma solução exata para materiais compósitos montados como cascas curvadas sujeitas a carregamentos térmicos, a solução é baseada em equações de equilíbrio e a temperatura ao longo da espessura da casca é calculada por equações de condução de calor de Fourier.

Tubos de fibras de carbono são então estudados por Barbosa et al. (2020) e Fu et al. (2020), avaliando seu comportamento dinâmico. Barbosa et al. (2020) utiliza de uma aproximação baseado em SHBT, que seria uma simplificação da teoria de vigas como apresentado antes por Tsai, porém com uma abordagem intermediária e consideração de homogeneidade no modelo, a solução do modelo foi feito por aplicação de elementos finitos.

2.4 ADESIVOS EM MATERIAIS COMPÓSITOS

O uso combinado de materiais compósitos com outros tipos materiais vem sendo estudado para ampliar os ganhos de resistência mecânica, redução de densidade, dentre outras vantagens. Uma das técnicas que mais vem sendo estudada e aplicada é o uso de materiais adesivos que permitem a junção de materiais dissimilares termorrígidos, há estudos no campo de construção civil (WANG et al., 2020; ZHANG et al., 2020; e ZHAO et al., 2020), aeroespacial (QUAN et al., 2018) e outros.

O processo de escolha do tipo de adesivo é uma tarefa complexa e deve levar em consideração além dos materiais que serão colados, a espessura disponível para aplicação da cola, máximo e mínima temperatura de trabalho, qual o tipo de carregamento a ser submetido (cisalhamento, flexão ou tração/compressão), velocidade de cura, propriedades especiais (tais como elétricas, térmica ou ótica), conhecimento da superfície de adesão (rugosidade) e custos (POWELL e GREEN, 2020).

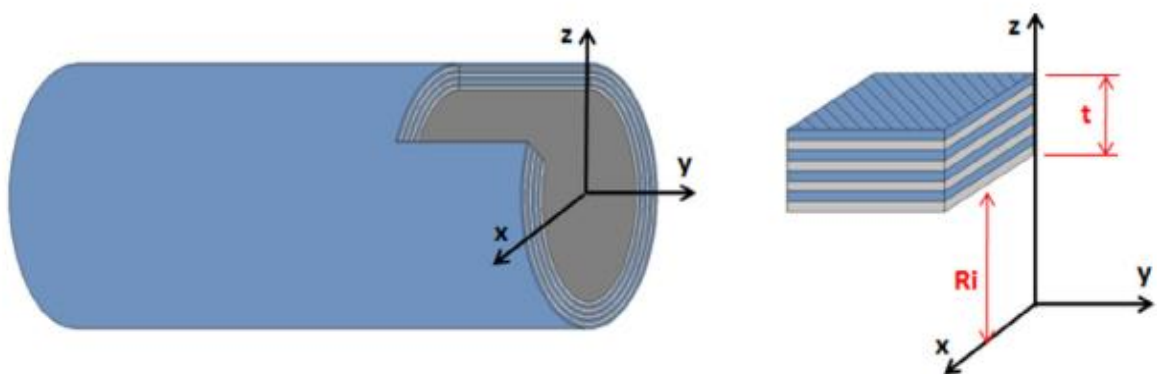
A combinação de junção utilizando de métodos de fixação, como juntas por parafuso e porcas, também pode ser vista. Zhang et al. (2021) apresentam uma análise numérica desse tipo de junta híbrida, tratando também sobre a simulação da montagem dessas junções híbridas. Wolter et al. (2020) analisam a união de compósitos distintos (Fibra de Carbono e Basalto), mostrando uma alta absorção de energia além de ser uma alternativa viável para união de componentes distintos. Sahoo et al. (2019) demonstram um método de ensaio não destrutivo para avaliação de juntas unidas por adesivos, uma técnica chamada de ressonância magnética nuclear, se mostrando um método eficiente para verificação desse tipo de aplicação, como no setor aeroespacial.

2.5 EIXOS HÍBRIDOS DE MATERIAIS COMPÓSITOS

Uma outra opção de aplicação dos eixos é através do uso misto/híbrido entre compósitos e material metálico, Lee et al. (2004) apresentam um projeto de um eixo de transmissão híbrido, onde o eixo é feito de um tubo de material de alumínio e internamente revestido com fibra de carbono e fibra de vidro, esse eixo apresentou como melhoria 7,5% de redução de massa, 160% de aumento de capacidade de torque e mudança da frequência natural para um valor mais alto, sendo assim um sistema mais rígido. Badie et al. (2011) utilizaram reforços de fibra de carbono e vidro em um eixo de transmissão, como consequência os eixos híbridos obtiveram melhorias nos valores das frequências naturais, flambagem, fadiga, aumento de rigidez torcional e modos de falha.

A combinação de mais de um tipo de reforço, como no caso de fibras de carbono juntamente de fibras de vidro ou de aramida elevam os valores de resistência torcional e melhor dureza superficial (TARIQ et al., 2018). Aklilu et al. (2019) apresentam o estudo da análise de falha em vigas híbridas de compósitos estruturadas com camadas diferenciadas [0/30/0], [0/45/0] e totalmente unidirecional [0/0/0], o desempenho da montagem híbrida foi superior em relação ao compósito montado sem alteração em suas camadas. Essa combinação de camadas (sequência de empilhamento) pode ser vista na Figura 3.

Figura 3: Sequência de empilhamento em um material compósito.



Fonte: Mendonça et al. (2017).

A combinação de mais de um tipo de reforço, como no caso de fibras de carbono juntamente de fibras de vidro ou de aramida elevam os valores de resistência torcional.

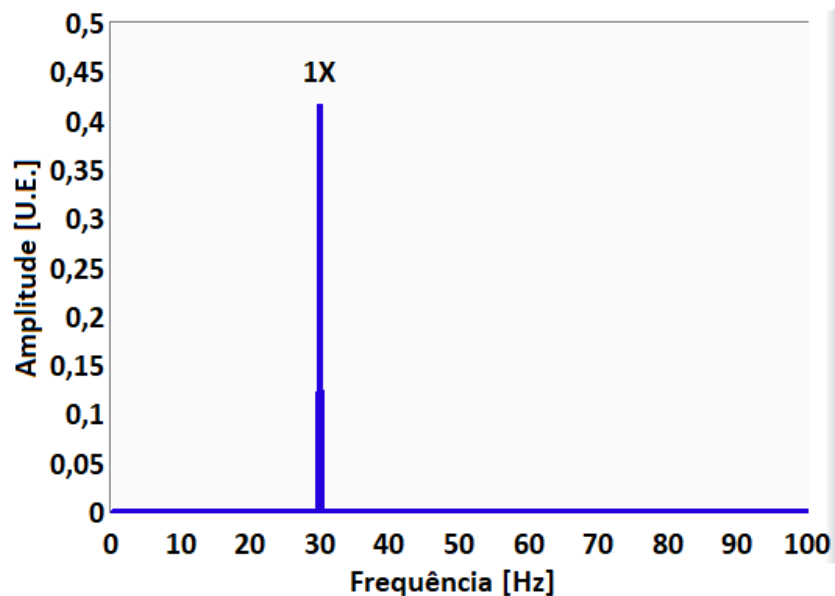
2.6 MECANISMOS DE FALHAS EM MÁQUINAS ROTATIVAS

Uma máquina quando vem a falhar, no diagnóstico durante fase de manutenção acusa alguns mecanismos que podem ter levado ao comprometimento ou parada total do equipamento. Randall (2010), Bently (2002) e Muszynska (2005) apresentam em livros publicados que na manutenção preditiva, esses mecanismos podem ser detectados e avaliados mesmo antes da parada total do equipamento.

2.6.1 Desbalanceamento

Dos mecanismos de falhas, o desbalanceamento é o mais presente e possui como característica principal em seu espectro de frequência mostrar um crescimento na magnitude do valor de 1X a rotação (Figura 4). Diversos trabalhos apresentam estudos de modelos de rotores com desbalanceamento ou experimentos de avaliação da condição (GOHARI e EYDI (2020); PARMAR et al. (2020); SHRIVASTAVA e MOHANTY (2019)).

Figura 4: Assinatura espectral de falha por desbalanceamento.

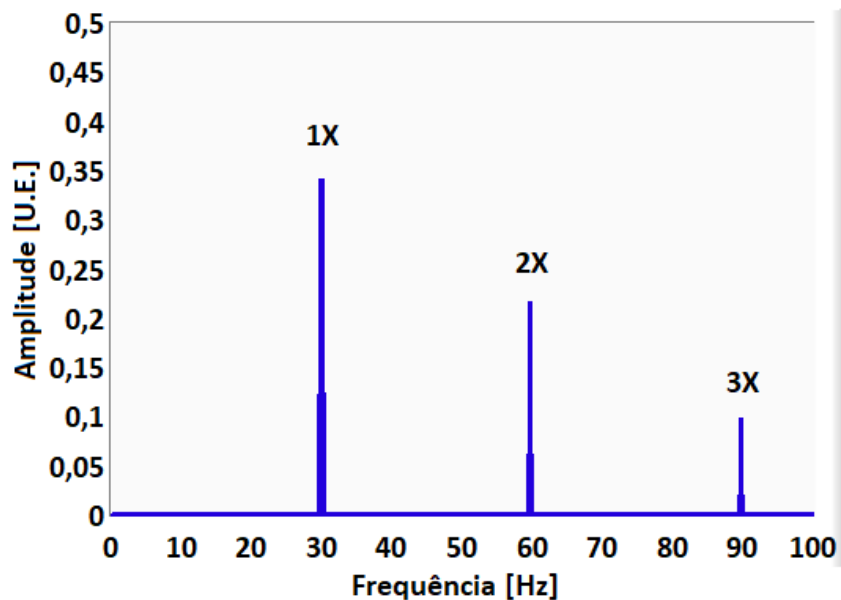


Fonte: Autoria própria.

2.6.2 Desalinhamento

O desalinhamento é outro mecanismo de falha em que sua ocorrência é frequente. Tal efeito pode estar relacionado com erros de paralelismo ou defasagem em acoplamentos (NABARRETE e FONSECA, 2021). Sua assinatura espectral apresenta aumentos em 1X e 2X a rotação da máquina (Figura 5), além de órbita da movimentação do eixo diferente do formato circular obtido em condição normal ou em desbalanceamento. Caso et al. (2020), Hujare e Karnik (2018), Tonks; e Wang (2017) e Tuckmantel e Cavalca (2019) apresentam em seus trabalhos estudos relacionados a desalinhamento aplicado a máquinas rotativas, dentre os assuntos tratados estão os modelos não-lineares propostos e avaliações experimentais.

Figura 5: Assinatura espectral de falha por desalinhamento.



Fonte: Autoria própria.

2.6.3 Roçamento

Em decorrência do desalinhamento e/ou do desbalanceamento, pode levar o rotor que está girando a entrar em contato com uma parte fixa, o estator (LAHRIRI et al., 2012). Esse fenômeno de impacto entre partes móveis e fixas é denominado de roçamento.

O roçamento pode ser classificado como contínuo, quando o eixo ou rotor está a todo momento sofrendo atrito com as paredes do estator (PENNACCHI et al., 2009) e pode ser considerado como roçamento do tipo intermitente, esse roçamento acontece quando há

intervalos entre os choques do rotor com estator. Sendo que para cada caso cabe o grau de intensidade do roçamento, podendo ser pouco a elevado, como estudado por Torkhani et al. (2012). O roçamento do tipo intermitente é a forma mais comum de roçamento em máquinas (BENTLY, 2002). Em virtude disso, diversos autores tais como Bab et al. (2019), Liu et al. (2020), Yang et al. (2020) e Yang et al. (2020) apresentam estudos de máquinas rotativas que tenham como efeito dinâmico incidente o roçamento entre as partes móveis e fixas.

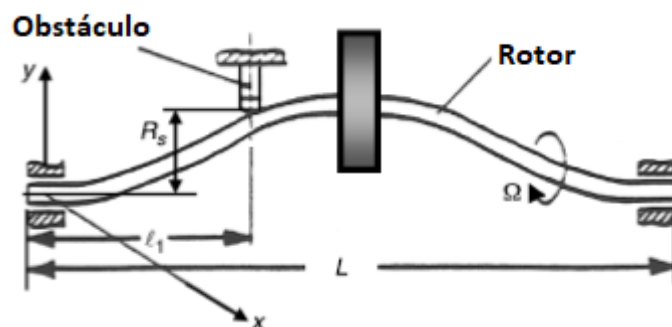
2.6.3.1 Modelagem do efeito de roçamento do tipo intermitente

Durante as interações de roçamento intermitente entre rotor e estator, os principais fenômenos envolvidos são o de impacto e atrito. A repetição desses impactos gera uma força radial com direção ao centro da órbita de rotação do eixo, após o impacto o rotor tem como resposta um período transiente de movimento lateral e torcional, a vibração lateral possui frequências igual a uma ou mais frequências naturais do rotor. A força tangencial, que está relacionada ao atrito entre parte móvel e fixa tem sentido oposto ao da precessão do rotor. (BENTLY (2002) e MUSZYNSKA (2005).

A equação de movimento, Equação 6, do rotor em roçamento (Figura 6 e Figura 7), segundo Muszynska (2005) é descrita a seguir:

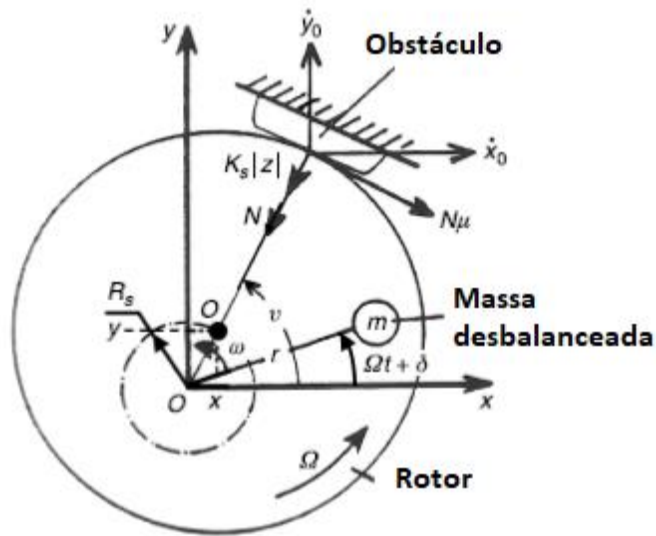
$$M\ddot{z} + C\dot{z} + Kz + F(\omega t)[K_s|z| + N(1 + j\mu)]e^{j\nu} = mr\Omega^2 e^{j(\Omega t + \delta)} \quad (6)$$

Figura 6: Modelo analítico do rotor em roçamento.



Fonte: Adaptado de Muszynska (2005).

Figura 7: Sistema de coordenadas e forças que agem no roçamento.



Fonte: Adaptado de Muszynska (2005).

Onde M é a massa, C o coeficiente de amortecimento e K a rigidez do rotor. A coordenada z vem da combinação dos movimentos no eixo x e y , $z(t) = x(t) + jy(t)$. Ao lado direito estão expressos os parâmetros da excitação devido desbalanceamento, m é a massa desbalanceadora, r o raio e δ a diferença de fase. Os elementos em seguida indicam a inclusão do roçamento, sendo que v é a orientação angular do ponto de roçamento, Ω é a velocidade de rotação, t o tempo, N a força normal e μN a força de atrito. A componente $K_s|z|$ representa o aumento da rigidez do sistema quando o rotor toca o estator e $F(\omega t)$ indica a periodicidade das forças relacionadas ao roçamento. Na Figura 6 e Figura 7 são vistas representações de um rotor com disco na posição central, se apresenta também o efeito do roçamento em virtude do contato entre disco que está em movimento de rotação Ω e o obstáculo fixo

A função de periodicidade (Equação 7) do contato e não contato entre eixo e parte fixa pode ser modelado como uma função periódica de pulsos:

$$F(\omega t) = \begin{cases} 1 & \text{para } 2(i-1)\pi + \omega t_1 < \omega t < 2(i+1)\pi \\ 0 & \text{para } 2(i-1)\pi < \omega t < 2(i+1)\pi + \omega t_1 \end{cases} \quad (7)$$

Essa função pode ser expandida como uma série de Fourier (Equação 8), logo:

$$F(\omega t) = C_0 + \sum_{i=1}^n (A_i \cos i\omega t + B_i \sin i\omega t) \equiv C_0 + \sum_{i=1}^n C_i \cos(i\omega t - \varphi_i) \quad (8)$$

Onde os coeficientes são dados pela Equação 9:

$$\begin{aligned} C_0 &= \int_{t_1}^{\frac{2\pi}{\omega}} (1) dt \\ A_i &= \int_{t_1}^{\frac{2\pi}{\omega}} (1) \cos i\omega t dt \\ B_i &= \int_{t_1}^{\frac{2\pi}{\omega}} (1) \sin i\omega t dt \\ C_i &= \sqrt{A_i^2 + B_i^2} \text{ e } \varphi_i = \arctg \frac{B_i}{A_i} \end{aligned} \quad (9)$$

Após integração os coeficientes da série serão (Equação 10):

$$\begin{aligned} A_i &= -\frac{\sin i\omega t_1}{i} \\ B_i &= -\frac{\cos i\omega t_1 - 1}{i} \\ C_i &= \frac{1}{i} \sqrt{\sin^2 i\omega t_1 + \cos^2 i\omega t_1 - 2 \cos i\omega t_1 + 1} = \frac{2}{i} \sin \frac{i\omega t_1}{2} \\ \varphi_i &= \arctg \frac{\cos i\omega t_1 - 1}{-\sin i\omega t_1} = \arctg \left(\tg \frac{i\omega t_1}{2} \right) = \frac{i\omega t_1}{2} \end{aligned} \quad (10)$$

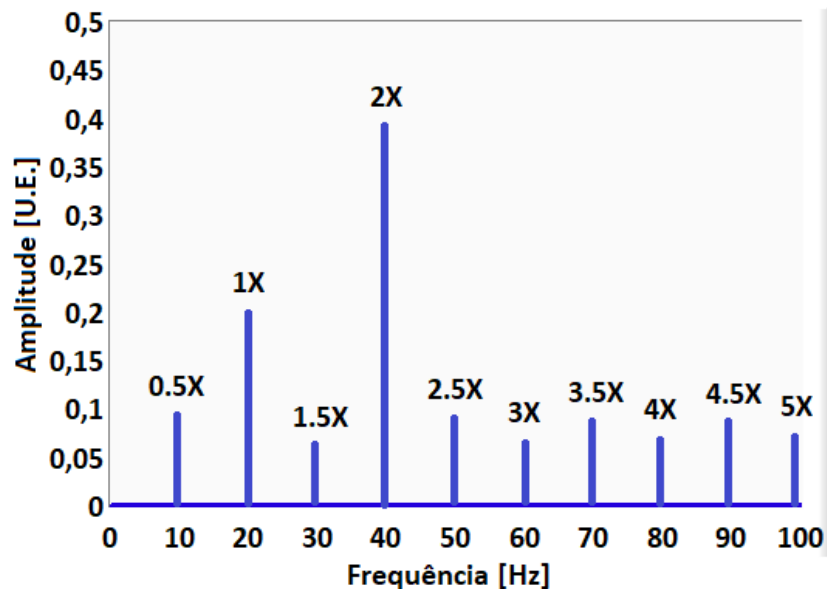
A função periódica então pode ser escrita como a Equação 11:

$$F(\omega t) = 1 - \frac{1}{\pi} \left\{ \frac{\omega t_1}{2} - \sum_{i=1}^n \frac{2}{i} \sin \frac{i\omega t_1}{2} \cos \left[i\omega \left(t - \frac{t_1}{2} \right) \right] \right\} \quad (11)$$

2.6.3.2 Assinatura experimental do roçamento

O padrão reconhecido para esse tipo de mecanismo de falha é dado por uma assinatura de vibração composta de vários harmônicos em relação a rotação da máquina, como visto na Figura 8. Uma outra forma de saber o grau de severidade do roçamento presente está na avaliação do gráfico de órbita, esta órbita por sua vez possui um perfil particular, uma sequência de ondulações ilustra a presença do roçamento. Este gráfico é obtido através da composição de sinais vindos da vibração na direção horizontal e vertical do eixo, veja na Figura 9.

Figura 8: Assinatura espectral de falha por roçamento.



Fonte: Autoria própria.

Figura 9: Gráfico de órbita de um mecanismo de falha do tipo roçamento.



Fonte: Adaptado de Scheffer e Girdhar (2004).

A avaliação da órbita do eixo é uma importante ferramenta na análise de vibrações e em trabalhos como o de Nembhard et al. (2015), observações experimentais são feitas em máquinas flexíveis sujeitas a rotores com diferentes falhas. Alguns algoritmos baseados por redes neurais convolucionais, como o mostrado por Lahiri et al. (2012) conseguem diagnosticar automaticamente o tipo de falha em função da órbita percebida.

2.7 DINÂMICA ENVOLVIDA EM PROCESSOS DE USINAGEM

O processo de usinagem de materiais é um dos métodos de fabricação mais utilizados. Materiais bruto passam pela usinagem a fim de obter o produto final com formas e dimensões dentro de tolerâncias especificadas. Máquinas baseadas em comando numérico (CNC) são as mais utilizadas devido aos altos índices de produtividade e baixas variações dimensionais e geométricos das peças feitas (SHNEOR, 2018). Uma máquina operatriz possui como componentes principais o eixo árvore, a ferramenta de corte e mecanismo de fixação. Alguns autores apresentam como eixo árvore, o uso de materiais compósitos para melhoria de desempenho e ganho de resistência mecânica (YANG et al., 2018)

Dentre os vários processos dentro da usinagem de materiais, o processo de fresamento é utilizado para produzir peças de geometrias poligonais, rasgos de diversos perfis (Tê e rabo de andorinha por exemplo), faceamento e etc. Uma máquina fresadora pode utilizar de configuração vertical, onde as ferramentas de corte são fresas de topo ou de canais, mais presentes em estudos do campo de usinagem e desgaste de ferramentas (KAR et al., 2020; LIZZUL et al., 2020; PELAYO e TREJO, 2020; e XIA et al., 2020). Também pode ser do tipo horizontal, com fresas de disco, módulo e perfiladas. Yang et al. (2018) apresentam o estudo prático das uniões presentes para operação de fresagem do tipo tangencial.

Com a evolução das máquinas CNC os processos de fresagem são realizados frequentemente em centros de usinagem, portanto, as observações científicas, ainda que incipientes que buscam a otimização da usinagem com modificação dos elementos de máquina, tal como o eixo árvore, acabam sendo mais presentes e atuais em máquinas com esses eixos dispostos na direção vertical, Kono et al. (2019) apresentam uma estrutura híbrida de aço e fibra de carbono no eixo árvore na intenção de reduzir a rigidez do eixo, seu estudo mostrou que apresentam valores de rigidez estática similares e pequena expansão térmica comparado com o eixo em material metálico.

Bang e Lee (2002), Choi e Lee (1997), Lee et al. (1985) apresentam configurações de eixos árvore horizontais feitos com materiais compósitos. Os trabalhos apresentam conclusões

de que devido a redução da massa, os valores de frequência natural se deslocam para altos patamares, considerando assim um ganho para máquinas operatrizes disponíveis na época (máximo de 6000 rpm).

Há ainda trabalhos acadêmicos que vêm explorando o potencial da usinagem de materiais compósitos, com o objetivo da busca de melhores parâmetros de corte para as ferramentas e otimização do processo de usinagem (RAJENDRAN et al., 2021; KUO et al., 2021).

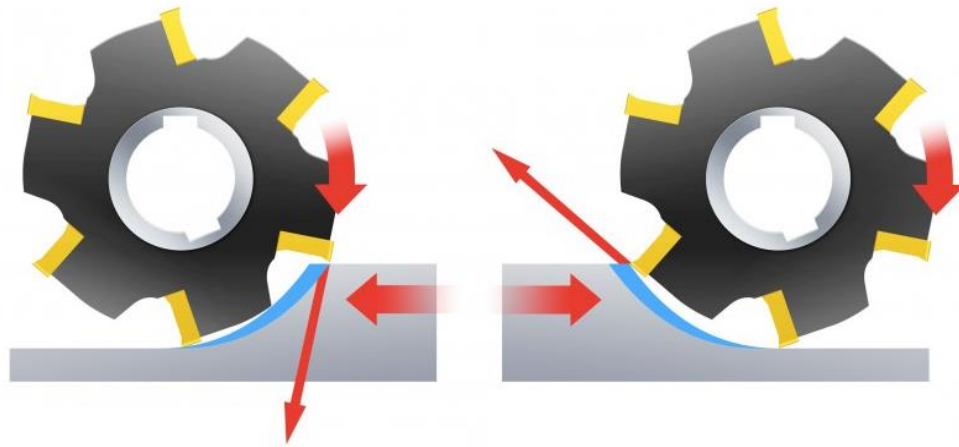
2.7.1 O processo de fresamento tangencial

A orientação do eixo árvore implica no tipo de fresamento proposto, o do tipo tangencial, onde o rotor está disposto na horizontal, permite operações de desbaste, acabamento, perfilhamento, abertura de canais utilizando de fresas em formas distintas como a de disco, convexas e côncavas.

O sentido de giro do eixo árvore juntamente do sentido de movimento da peça presa na morsa também irá promover diferentes condições de corte. Quando a fresa gira em sentido que tende a “puxar” a peça em sua direção, temos o movimento concordante, esse movimento começa com a remoção de pouco material e ao fim do movimento de corte a espessura do cavaco aumenta. Em contrapartida quando a fresa gira em sentido que tende a empurrar a peça que está vindo em sua direção, temos o movimento discordante, nesse caso o cavaco começa com uma espessura maior e à medida que o dente termina a remoção do material o cavaco se torna menos espesso (DINIZ et al., 2014). A ilustração da Figura 10 abaixo apresenta esses movimentos e sua influência na espessura do cavaco.

Figura 10: Fresamento concordante e discordante.

Fresamento concordante fresamento discordante



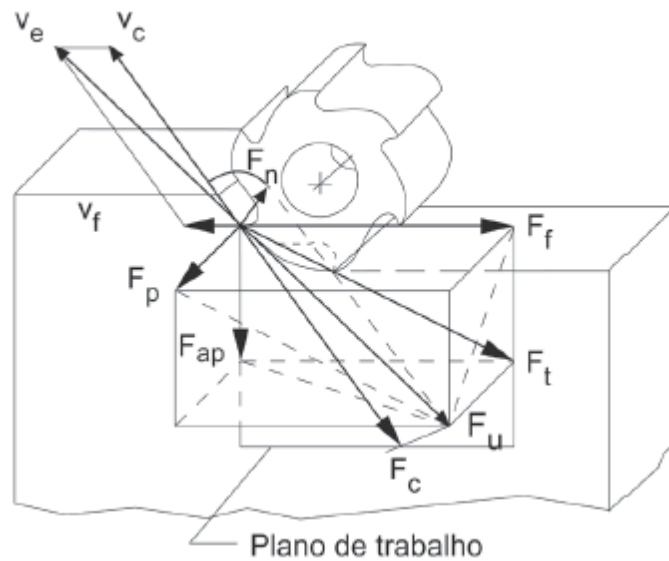
Fonte: Adaptado de <https://www.sandvik.coromant.com/pt-pt/knowledge/milling/pages/up-milling-vs-down-milling.aspx?Country=br> acessado em 04/02/21.

Ocorre que as principais fabricantes de ferramentas corte recomendam o fresamento do tipo concordante, pois a espessura dos cavacos diminuirá ao longo do corte, evitando um roçamento e o dano por aumento de temperatura da aresta de corte da ferramenta contra a superfície da peça usinada. Porém, essa recomendação é válida para máquinas onde o seu conjunto de movimentação possui folgas mecânicas mínimas, como em máquinas que trabalham com comando numérico (CNC), em usinagem convencional a existência de folgas entre os fusos e buchas podem gerar “trancos” ao longo da usinagem, sendo assim a usinagem no sentido discordante condiciona a não ter essas folgas (DINIZ et al., 2014).

2.7.2 Modelagem de forças envolvidas na usinagem por fresamento tangencial

Para o presente estudo, é visto o ensaio utilizando de fresamento tangencial com fresa de disco de diâmetro e espessura conhecidas. A partir dessa consideração, a fresagem horizontal pode ser no sentido discordante ou concordante, veja a distribuição de forças segundo Diniz et al. (2014) para uma fresagem horizontal no sentido discordante (Figura 11).

Figura 11: Fresagem no sentido discordante e suas forças envolvidas.



Fonte: Diniz et al. (2014).

Considerando a operação no sentido discordante, onde no início do corte há uma remoção menor de material e finaliza com maior parte, uma fresa possui os seguintes esforços de corte visto na Equação 12:

$$F_t = \sqrt{F_{ap} + F_f} \quad (12)$$

Onde F_t é a força tangencial ao corte composta pela força de apoio (F_{ap}) e força de avanço (F_f). A força de corte é dada pela Equação 13:

$$F_c = K_s \cdot A \quad (13)$$

O parâmetro K_s é a pressão específica do corte e a área de seção (A) que é dada pela espessura do cavaco h vezes o comprimento do gume da ferramenta (a_p). Utilizando com base essa equação, Kienzle e Victor² (1957, *apud* Diniz et al., 2014) apresentou a força de corte máxima (Equação 14) como sendo:

² KIENZLE, O.; VICTOR H. Spezifische Schnittkräfte bei der Metallbearbeitung. **Werkstattstechnik und Maschinenbau**, Bd. 47, H. 5, 1957 *apud* DINIZ, A. E.; MARCONDES, F. C.; COPPINI, N. L. **Tecnologia da Usinagem dos Materiais**. 9th ed., São Paulo: Artliber Editora, 63 p., 2014.

$$F_{c-max} = K_{s1} \cdot h_m^{1-z} \cdot a_p \quad (14)$$

Os valores de K_{s1} e $1-z$ são empíricos e apresentados na tabela a seguir.

Tabela 1: Valores de K_{s1} e $z-1$.

Material – aço ABNT	σ_t [N/mm ²]	1-z	Ks1 [N/mm ²]
1030	520	0,74	1990
1040	620	0,83	2110
1045	670	0,86	2220
1050	720	0,70	2260
1060	770	0,82	2130
8620	770	0,74	2100

Fonte: Diniz et al. (2014).

Ao analisar o perfil do material a ser removido da peça, o cavaco, quando executado uma usinagem no sentido discordante, tem espessura mínima até uma máxima. O valor médio da espessura desse cavaco é dado na usinagem periférica como sendo a Equação 15:

$$h_m = f_z \cdot \sin \varphi_0 \quad (15)$$

Onde f_z é o avanço por dente da ferramenta de corte e o valor de φ_0 pode ser obtido pela Equação 16:

$$\varphi_0 = \arccos \left(1 - \frac{2a_e}{D} \right) \quad (16)$$

Onde a_e é a profundidade de corte e D é o diâmetro da ferramenta de corte.

Uma ferramenta de corte do tipo fresa de disco possui um número de dentes discreto, ou seja, com um intervalo entre eles, pode se fazer uma analogia em que há o momento do corte há um roçamento intermitente ocorrendo entre o elemento que gira (no caso a fresa que está presa ao eixo) e o elemento fixo (material usinado).

Desta forma, com o controle de parâmetros de corte, tais como a rotação, o avanço de mesa e a profundidade de corte, é possível obter a grande da força exercida durante o evento do roçamento intermitente simulado em uma fresagem horizontal. Este é a proposta de simulação

desse mecanismo de falha em um eixo de material compósito, com informações desconhecidas, e determinar o seu comportamento dinâmico nessa condição de operação, utilizando de métodos experimentais.

2.8 VIBRAÇÃO NA USINAGEM

O processo de usinagem envolve a remoção de material em materiais brutos ou semiacabados, o produto dessa retirada de material é o cavaco (SIDDHPURA e PAUROBALLY, 2012). Além da dinâmica envolvida para a formação do cavaco, o conjunto de acionamento do sistema, tais como caixas de avanço e de transmissão de rotação geram inúmeros ruídos e vibrações durante o processo de corte (SCHMITZ, 2020). Desta forma, alguns autores tentam reduzir essas vibrações complexas com variações do processo, indo desde a fixação da peça até a estratégia de caminho da ferramenta de corte.

Ransom et al. (2016) apresentam um método de fixação ajustável para as peças que vão ser usinadas, a conclusão é o aumento da estabilidade devido alterações na estrutura e verificadas com análise modal e ensaios de usinagem. Wang et al. (2019) também tratam da redução de vibração em resultado de modificações do sistema de fixação. Moradi et al. (2015) propõem o projeto de um absorvedor dinâmico de vibrações para reduzir comportamentos não-lineares durante o processo de fresamento.

Ulutan (2020) apresenta uma análise da usinagem com variação da sua profundidade de corte enquanto há fresamento, essa avaliação focou no resultado desgaste da ferramenta de corte. Gross et al. (2020) compara as estratégias de usinagem frontal e linear para a redução do desgaste e vibração, foi concluído que a primeira não é a mais adequada para redução desses parâmetros.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

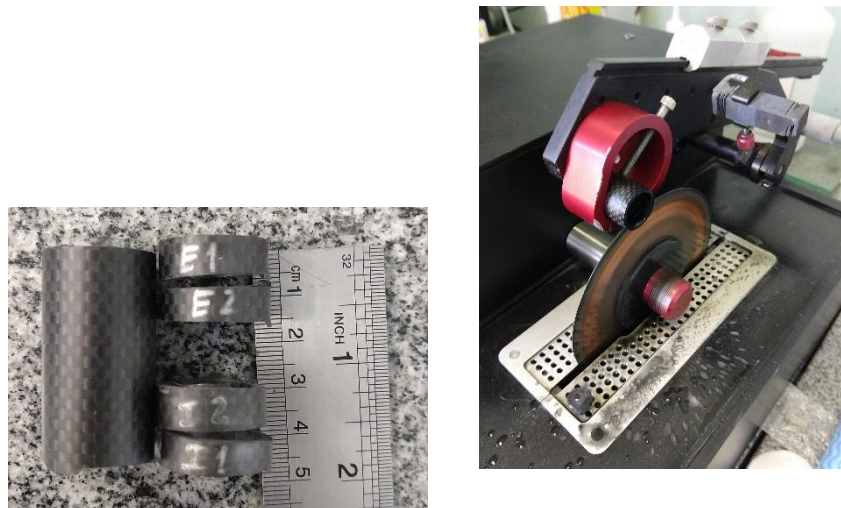
O eixo de carbono utilizado nos experimentos foi adquirido via fornecedor internacional, cujos parâmetros e especificações não foram apresentados. Cabe então um procedimento de caracterização do material que foi objeto de estudo.

3.1 CARACTERIZAÇÃO DE MATERIAIS COMPÓSITOS

No aspecto de materiais, a caracterização se deu através da observação microscópica do compósito utilizado. Esse procedimento incluiu etapas como a de preparação de amostras, lixamento e observação junto a um microscópio ótico.

A preparação da amostra foi feita com o seccionamento do tubo em anéis de 5 a 7 mm de espessura (Figura 12a), o corte foi feito utilizando uma serra de disco diamantado (Figura 12b). Houve também um corte no sentido longitudinal, para a geração de outras imagens e comparação da caracterização microscópica ótica.

Figura 12: Seccionamento das amostras para microscopia ótica: (a) ilustração do tamanho das amostras; (b) corte sendo executado na máquina.



Fonte: Autoria própria.

Os espécimes foram então embutidos em uma resina acrílica, curada sem aquecimento externo, para a formação mínima de bolhas. Após o processo de cura foi feito o lixamento através de uma máquina poltriz orbital modelo Metprep 3 PH-3, variando a granulometria da

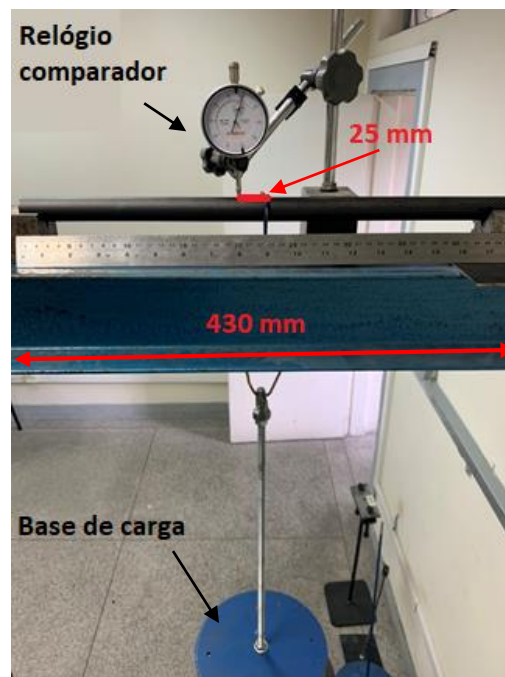
lixa entre: 220, 320, 400, 600, 1200, 1500 e 2000 grãos por polegada. O tempo do processo de lixamento foi igual para todas as lixas, em um ciclo de 3 minutos cada com uso de lubrificante. Não houve necessidade de polimento da amostra.

A avaliação microscópica foi feita em um microscópio da marca Zeiss, modelo Imager.z2m, com 5 vezes de ampliação, utilizando visão em campo claro e campo escuro.

3.2 AVALIAÇÃO ESTÁTICA DO EIXO

Em seguida, o eixo foi avaliado para o levantamento de parâmetro de módulo de elasticidade longitudinal. Isso foi feito através de ensaio de deflexão do eixo. O eixo tem comprimento de 450 mm e 22 mm de diâmetro, montado sob uma estrutura rígida e apoiado sobre blocos prismáticos. O comprimento apoiado em cada bloco foi de 10 mm, deixando um vão livre de 430 mm. Em seu centro foram adicionadas massas conhecidas em modelo de carregamento ascendente. Deslocado de 25 mm em relação ao centro, um relógio comparador da marca Digimess de resolução de medida igual a 0,01 mm, montado na parte superior do eixo, acompanhava o deslocamento estático do eixo enquanto o carregamento era aplicado (Figura 13).

Figura 13: Montagem de ensaio de deflexão do eixo.



Fonte: Autoria própria.

Com o deslocamento, o valor da posição onde estava montado o relógio comparador, aplicação de carga central e as propriedades geométricas do eixo o módulo equivalente é obtido pela Equação 17 abaixo. Este método considera que não houve empenamentos das seções transversais ou enrugamentos da superfície.

$$E = \frac{P.L^3}{48.I.y} \quad (17)$$

3.3 AVALIAÇÃO DINÂMICA DO EIXO

Compreende como estudo dinâmico, a avaliação da frequência natural desse eixo e fator de amortecimento. A obtenção desses parâmetros foi feita com o uso de análise de vibrações, mais precisamente, o uso de espectros de frequência aliado a análise da resposta temporal após a excitação do sistema.

O eixo foi suspenso por fios de material Nylon e sua resposta foi obtida por um acelerômetro, marca Bruel&Kjaer modelo 4371 de massa 5 gramas, utilizando de fixação adesiva cola na posição central do seu comprimento. A excitação foi feita por meio de martelo modal, marca ENDEVCO modelo 133 (Figura 14). Todas os impactos foram no sentido vertical para baixo.

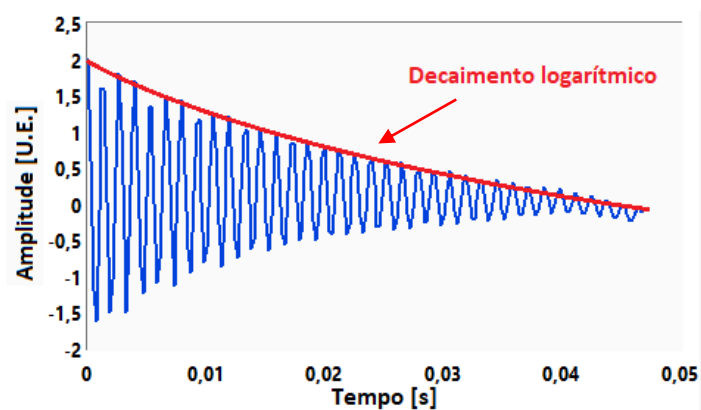
Figura 14: Montagem de ensaio para análise de frequências naturais e amortecimento



Fonte: Autoria própria.

Após o impulso dado pelo martelo um sistema de instrumentação virtual, composto por placas de aquisição de dados ADC, marca National Instruments modelo 9234, enviou os dados para uma rotina de pós-processamento no software LabVIEW para identificação da frequência natural e estimação do valor de fator de amortecimento (Figura 15).

Figura 15: Análise da frequência natural e decaimento logarítmico da resposta de vibração do eixo após excitação por martelo modal.



Fonte: Autoria própria.

3.4 ENSAIO DE USINAGEM

A simulação de roçamento do tipo intermitente em um eixo rotativo feito de material compósito foi feita através de uma montagem desse elemento junto de uma fresadora universal, marca Clever modelo VH2 ECO, montada de uma fresa de disco de número de dentes conhecidos, rotação conhecida, profundidade de corte e avanço também controlados. Variando assim a magnitude do roçamento intermitente imposto ao eixo de compósito.

Para isso o eixo teve de ser fixo em uma ponta com cone morse do tipo MT2 com rosca para varão M16 para transmissão de rotação e na outra ponta apoiado em um mancal do tipo deslizamento. A fresa de discos é presa no meio do comprimento do conjunto e através de anéis, quando uma porca de rosca fina MF 22 x 1,5 filete à esquerda dá aperto ao conjunto e trava a fresa pelo atrito. O eixo tem comprimento de 450 mm e 22 mm de diâmetro. A distância entre os mancais (rolamento na região de torque) e de deslizamento (região de apoio) é de 500 mm.

O conjunto completo sem a ferramenta e anéis e porca de fixação 2,38 kg para o eixo de aço e 1,06 kg para o feito de material compósito.

3.4.1 Fixação do eixo de carbono como eixo árvore da fresadora

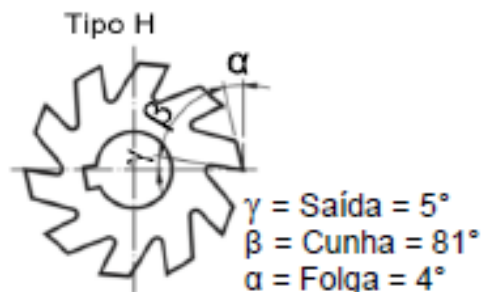
Iniciando com o processo de cálculo visto na revisão de literatura, item 2.7.2, foi estimado o valor do torque máximo que o eixo ia ser submetido. Para isso foram considerados as condições geométricas da fresa escolhida (Figura 16) e os parâmetros de corte (Tabela 2):

Tabela 2: Valores dos parâmetros de corte na usinagem.

Descrição	Valor
Material a usinar (crítico)	SAE 1030
Fresa de corte	Aço rápido - tipo H
Diâmetro externo fresa de corte	100 mm
Número de dentes fresa	12
Largura da fresa	10 mm
a_e	1 mm
V_c	470 m/min (1500 RPM)
F_z	0,1 mm/dente

Fonte: Autoria própria.

Figura 16: Fresa escolhida com ângulos de saída, folga e cunha.



Fonte: Adaptado de Chiaverini (1986).

Com esses valores e juntamente de informações da Tabela 1 foi calculado que:

$$\varphi_0 = \arccos\left(1 - \frac{2.1}{100}\right) \cong 11,48^\circ$$

$$h_m = 0,1 \cdot \text{sen } 11,48^\circ = 0,02 \text{ mm}$$

$$F_{c-max} = 202.0,02^{0,74} \cdot 10 = 111,71 \text{ kgf } (1095,5 \text{ N})$$

$$T_{max} = F_{c-max} \cdot \frac{D}{2} = 1095 \cdot \frac{0,1}{2} = 54,78 \text{ N.m}$$

Chegando ao torque máximo de 54,775 N.m.

Como o material do eixo é de fibra de carbono com resina epóxi, sua fixação em elementos de aço foi feita por adesivo, o qual foi escolhido do fabricante Henkel modelo HY 4090 onde mais especificações dela estão no Anexo 1, respeitando os valores de torque máximo durante o processo de usinagem de um material de aço (condição crítica).

O adesivo foi passado na superfície externa do eixo e encaixada em um rebaixo do cone morse que se acopla a parte de rotação da máquina. Para que se prenda a fresa de disco, são necessários anéis a serem inseridos no eixo e através de uma porca na outra extremidade é dado então o aperto e fixação por atrito da fresa. Por isso, na outra extremidade do eixo foi também necessário o uso de adesivo, mas dessa vez na parte interna do eixo que foi acoplada com uma peça roscada feita de acordo com a porca da máquina fresadora (Figura 17).

Figura 17: Eixo de compósito preparado para fixação na fresadora após colagem (em baixo).



Fonte: Autoria própria.

Os procedimentos de colagem foram seguidos conforme orientação do fabricante da cola, que são:

1. Deixar folga entre as superfícies para preenchimento de cola;
2. Lixamento das superfícies para melhor adesão;
3. Respeitar tempo de cura, conforme apresentado no seu documento de orientação (*datasheet*).

3.4.2 Procedimento de usinagem

A fresadora universal possui condições de usinagem com eixo árvore na vertical ou na horizontal, nessa avaliação foi utilizado na horizontal. Foi utilizado como ferramenta de corte, uma fresa de disco de aço rápido com características: 100 mm de diâmetro, largura de 10 mm e 12 dentes. A fresa foi fixada na posição central do eixo. Utilizando do sentido de corte discordante.

O material a ser usinado era fixado em uma morsa de aperto manual, com o uso de borrachas entre seus mordentes e a peça. Esse artifício utilizado como um sistema de isolamento, reduz consideravelmente a transmissibilidade de vibração vinda de outros pontos da máquina, como chapas e motores auxiliares de avanço. A morsa foi alinhada com relógio comparador para evitar fontes de vibração no sentido transversal, devido ao deslocamento combinado da mesa (Figura 18).

Figura 18: Alinhamento da morsa de fixação com o uso de relógio comparador digital.



Fonte: Autoria própria.

Foram ensaiados a usinagem de dois blocos de materiais diferentes (Nylon e Latão), com rotações (1560, 810 e 456 rpm), velocidade de avanço de mesa (50 e 117 mm/min) e profundidade de corte padrão de 0,5 mm. Os corpos de prova são paralelepípedos de dimensões 40 x 40 x 80 mm. A Tabela 3 apresenta a codificação dos ensaios, de acordo com as suas condições de operação. Cada usinagem foi feita com único passe.

Tabela 3: Descrição dos ensaios realizados.

Ensaio	Material	Rotação [RPM]	Velocidade de avanço [mm/min]	Prof. de corte [mm]
1	Nylon	1560	50	0,5
2	Nylon	1560	117	0,5
3	Nylon	810	50	0,5
4	Nylon	810	117	0,5
5	Nylon	456	50	0,5
6	Nylon	456	117	0,5
7	Latão	1560	50	0,5
8	Latão	1560	117	0,5
9	Latão	810	50	0,5
10	Latão	810	117	0,5
11	Latão	456	50	0,5
12	Latão	456	117	0,5

Fonte: Autoria própria.

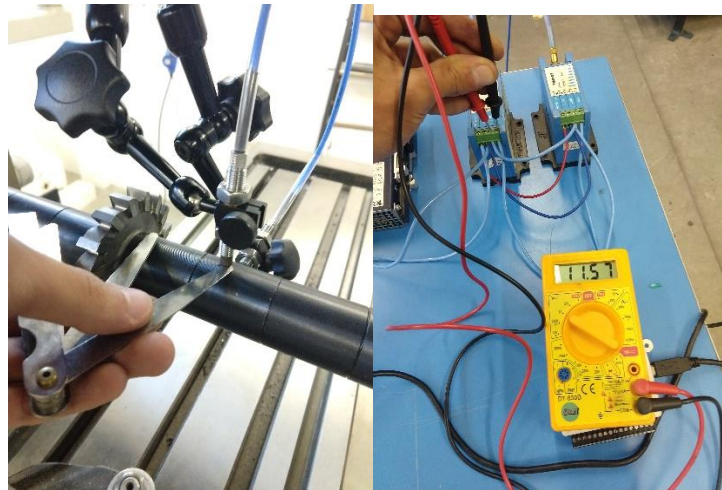
Para fins de comparação também foram ensaiadas as mesmas condições de usinagem, porém com um eixo metálico de mesmas dimensões (comprimento e diâmetro).

Os sinais de vibração foram monitorados com instrumentação aplicada na máquina. Foram utilizados dois sensores do tipo proximetro, marca Provibtech modelo TM0105-07-00-05-05-02 com distância sensora de 2,5 mm, em montagem de 0 e 90° para acompanhar as vibrações no sentido horizontal e vertical, além da construção de gráficos de órbita do eixo.

Os proxímetros foram posicionados nos anéis de fixação mais próximos da ferramenta de corte, dessa forma quando o eixo deflete na região da ferramenta, os anéis vizinhos irão mostrar a grandeza desse deslocamento observado.

Os sensores foram ajustados inicialmente utilizando de um calibre de folga do tipo lâmina, e em seguida um refinamento dos ajustes através do acompanhamento dos valores de tensão recebidos em seus condicionadores individuais (Figura 19).

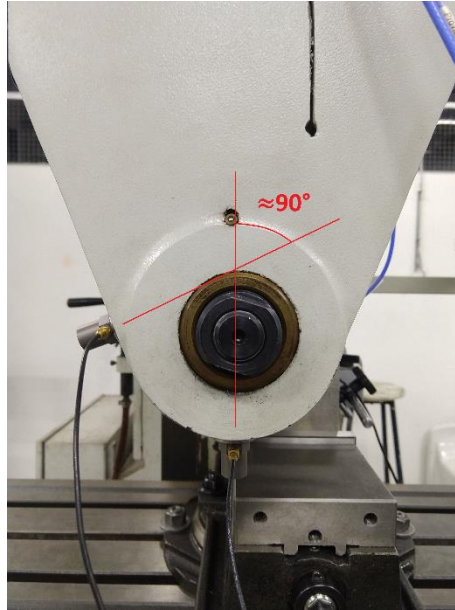
Figura 19: Ajuste de montagem dos proxímetros com calibres de folga (a) e ajuste do valor de tensão (b).



Fonte: Autoria própria.

Também foram utilizados dois acelerômetros de carga, marca Bruel&Kjaer modelo 4371, fixados por base magnética na região do mancal de deslizamento da fresadora (Figura 20), na direção vertical e horizontal (aproximada). Não foram fixados próximos a região de acoplamento de rotação, devido a presença de mais ruídos vindos da caixa de redução e outros componentes.

Figura 20: Detalhe da montagem dos acelerômetros.



Fonte: Autoria própria.

E também o uso de um sensor do tipo indutivo, modelo LJ12A3-4-Z/BX, com distância sensora de 4 mm, na região de rotação, esse sensor tem a função de obter o valor da rotação no mesmo tempo em que a máquina operava a usinagem. A montagem completa pode ser vista na Figura 21.

Figura 21: Fresadora com instrumentação montada.

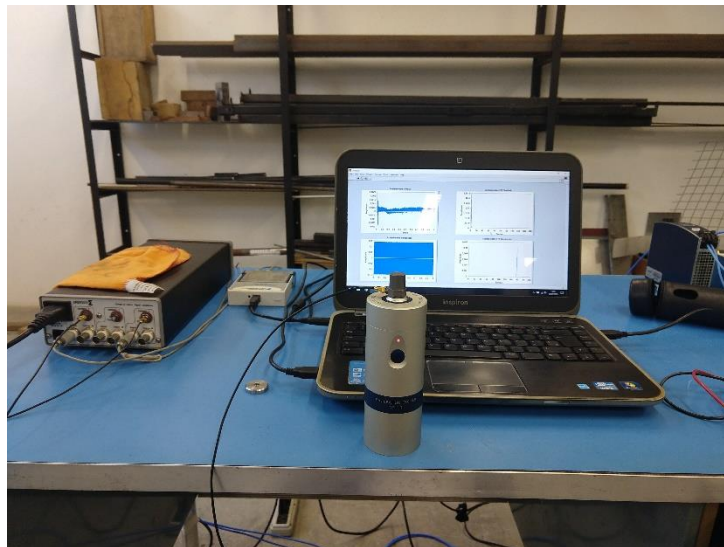


Fonte: Autoria própria.

Os sinais obtidos pelos sensores foram adquiridos pelas placas de aquisição ADC NI-USB 6008 e NI 9234, ambas da National Instruments. Houve também o uso do condicionador de sinais, marca ENDEVCO modelo, para os sinais dos acelerômetros de carga.

Com os dados, uma rotina de aquisição e pré-processamento elaborada pelo software LabVIEW 2013 apresentou os sinais no domínio do tempo, frequência e gráficos de órbitas do eixo. A validação do sistema foi feita com o uso de calibradores padrão, como mostrado na Figura 22 abaixo.

Figura 22: Validação do sistema com o uso de um excitador de fonte conhecida nos acelerômetros.



Fonte: Autoria própria.

Também foram avaliados os valores das rugosidades resultantes dos processos de usinagem (Figura 23), para analisar se houve melhorias na qualidade superficial da peça quando variado o tipo de eixo árvore. Para isso foi utilizado um rugosímetro portátil da marca Mahr modelo MarSurf M300/RD18. Os parâmetros de rugosidade coletados foram a rugosidade média (R_a), rugosidade média total (R_z) e rugosidade total (R_t), com comprimento de amostragem (*Cut-off*) de 2,5 mm, 5 divisões para cada amostra e 3 medições para cada ensaio (no início, meio e fim da usinagem).

Figura 23: Medição de rugosidade após usinagem das peças.



Fonte: Autoria própria.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 RESULTADO DA MICROSCOPIA

Após preparação das amostras retiradas do eixo de material compósito, na microscopia pode-se perceber uma montagem híbrida entre tecidos unidirecionais e tecidos trançados. Há uma quantidade de 10 camadas unidirecionais intercaladas, na Figura 24 é visto a contagem dessas camadas começando da parte interna do eixo até a anterior a ondulada.

A orientação das camadas unidirecionais também muda ao longo do empilhamento, variando entre a direção longitudinal e transversal, configurando assim uma orientação 0 e 90° ou 90/0/90/0°.

Na região mais externa é visto na Figura 24 abaixo que há ondulações nas fibras. Essa ondulação juntamente de uma avaliação a visual sem microscópio pode levar a concluir que na camada final o eixo é composto por um tecido plano trançado (*plain weave*).

Figura 24: Microscopia da seção transversal do eixo de compósito.



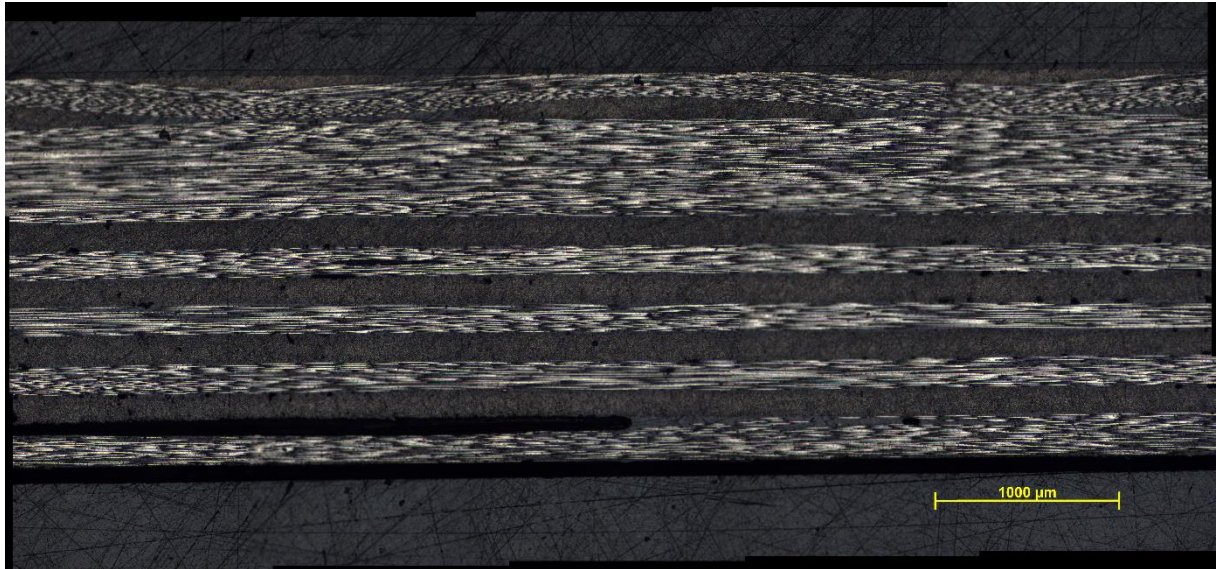
Fonte: Autoria própria.

Na Figura 25 abaixo também é possível notar a quantidade de camadas unidirecionais sobrepostas e na superfície mais externa a ondulação das fibras, confirmando a montagem híbrida desse eixo de fibra de carbono e resina epóxi.

O empilhamento interno com tecidos unidirecionais leva a entender que o objetivo final do compósito deveria ter comportamento ortotrópico, por isso da igualdade entre camadas orientadas ao longo do comprimento do eixo (longitudinais) e perpendiculares (transversais).

Com relação a montagem híbrida com o uso de um tecido trançado na camada externa pode ter relação com o acabamento superficial do eixo e sua aparência estética, pois foi aplicado apenas uma camada desse tipo de tecido.

Figura 25: Microscopia da seção longitudinal do eixo de compósito.



Fonte: Autoria própria.

4.2 RESULTADO DA ANÁLISE ESTÁTICA

Após montagem da configuração mostrada na Figura 13, o eixo foi carregado utilizando de massas conhecidas e o seu deslocamento foi percebido com o uso de um relógio comparador de resolução 0,01 mm, posicionado a 25 mm do centro de aplicação de carga. Como o eixo de material compósito pode ter imperfeições no seu processo de empilhamento dos tecidos de fibra de carbono e cura da resina epóxi, a aplicação de carga foi feita rotacionando o eixo em quadrantes de 90° para assim ter um deslocamento médio. A Tabela 4 apresenta os resultados de acordo com aplicação de carga.

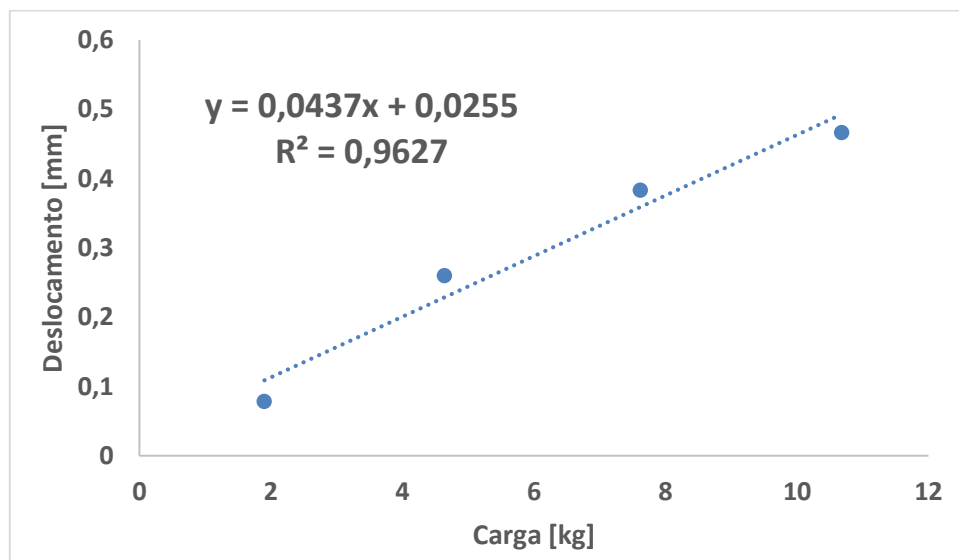
Tabela 4: Deslocamento estático do eixo durante ensaio de deflexão.

Ensaio	Peso [Kg]	Deslocamento [mm] – 0°	Deslocamento [mm] – 90°	Deslocamento [mm] – 180°
1	1,90	0,08	0,07	0,08
2	4,64	0,26	0,26	0,25
3	7,62	0,38	0,39	0,38
4	10,68	0,46	0,46	0,47

Fonte: Autoria própria.

Com os resultados, obtém-se a média para cada ponto e assim é apresentado o comportamento entre o carregamento e o deslocamento (Figura 26). O tipo de comportamento pode ser representado por uma regressão linear com um bom ajuste da equação obtida.

Figura 26: Curva ajustada de carregamento x deslocamento.



Fonte: Autoria própria.

Para obter o módulo elástico utilizou da Equação 17, tendo como módulo de elasticidade longitudinal o valor médio de 54,33 GPa.

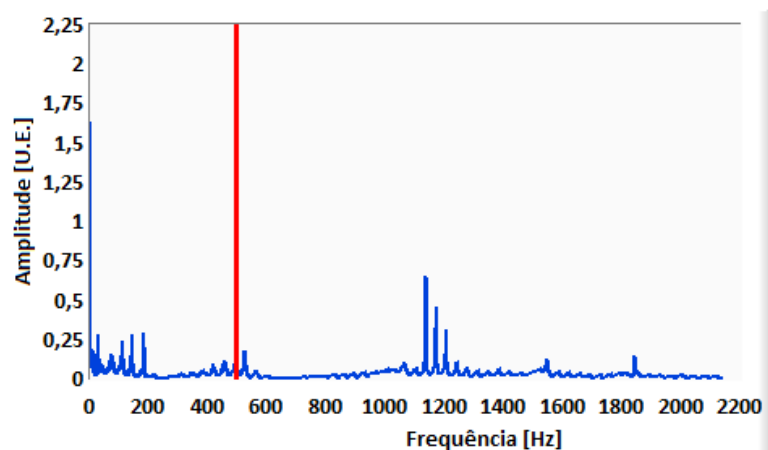
Lembrando que a ferramenta de corte possui mesmo valor do diâmetro interno para encaixe no eixo árvore, porém como o eixo não é chavetado, a rotação da ferramenta de corte é presa por um conjunto de anéis externos ao eixo árvore, desta forma os anéis transmitem a rotação do cone morte para a ferramenta de corte. Há uma diferença de folga entre o interno dos anéis e externo de eixo (1 mm), portanto, observando os resultados da Tabela 4, a deflexão

do eixo é menor do que a folga entre eixo e anéis, provando que a modelo analítico deve considerar apenas movimentos de flexão.

4.3 RESULTADO DA ANÁLISE DINÂMICA

Seguindo a configuração descrita na Figura 14 o eixo foi excitado por meio de um martelo modal, obtendo como resposta o espectro de frequência em Figura 27. O valor experimental da frequência natural é de 493,77 Hz. Enquanto que o valor teórico baseado em um eixo flexível e mancais rígidos, considerando uma massa do eixo de 0,7 kg, é de 509,34 Hz.

Figura 27: Avaliação da frequência natural.



Fonte: Autoria própria.

O valor do fator de amortecimento para o eixo de material compósito se aproxima de 14,58%.

4.4 RESULTADOS DOS ENSAIOS DE USINAGEM

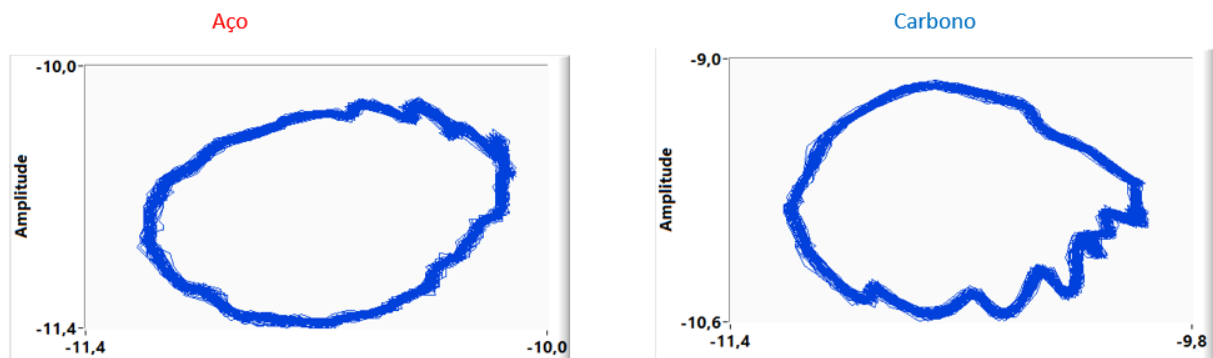
4.4.1 Comparação das órbitas

Abaixo estão apresentadas todas as órbitas de movimentação do eixo quando submetido ao ensaio de usinagem tangencial com fresa de disco. Ao lado esquerdo estão os resultados vindos do eixo árvore metálico e no direito no eixo de material compósito. Os deslocamentos

são relativos, logo cada gráfico de órbita apresenta em seus eixos as amplitudes de vibração, medidas na ordem de $[\text{mm}^{-2}]$. Os resultados são discutidos a seguir.

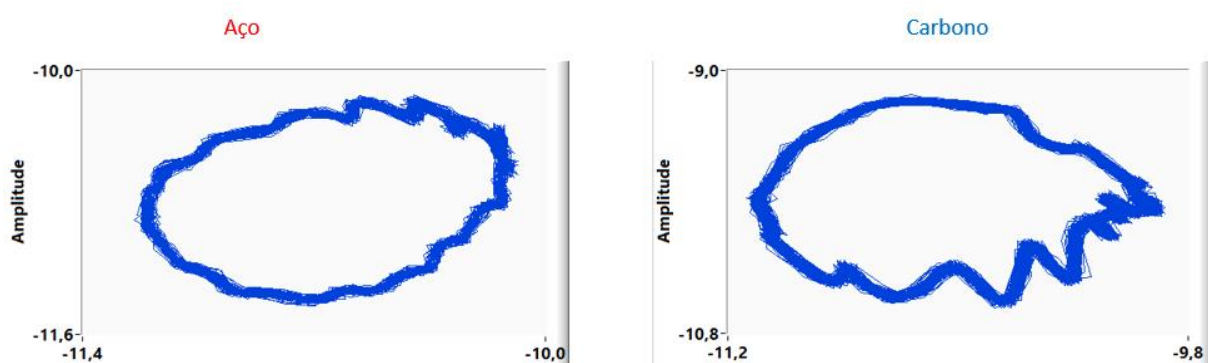
Ao analisar as órbitas obtidas para cada eixo, em algumas situações, como apresentadas nos ensaios 1 (Figura 28) e 2 (Figura 29). Houveram semelhança na forma obtida entre ambos os eixos, ou seja, independente do eixo árvore ter sido fabricado de liga metálica ou de material compósito a forma e perfil da órbita são semelhantes. Em todas essas condições foi utilizada uma rotação de operação mais alta (26 Hz), reduzindo o período de contato entre a ferramenta de corte e o material usinado, diminuindo assim o tempo de roçamento intermitente (*dwell time*), apresentando assim apenas em parte da sua órbita (uma pequena parte fica ondulada).

Figura 28: Comparações entre órbitas - Ensaio 1.



Fonte: Autoria própria.

Figura 29: Comparações entre órbitas - Ensaio 2.

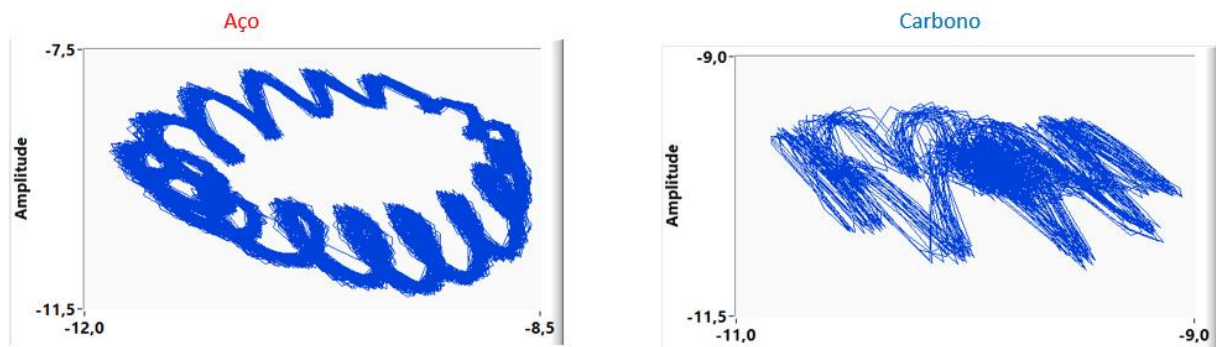


Fonte: Autoria própria.

Alguns resultados apresentaram considerável nível de ruídos no material de compósito não sendo possível ver uma forma de órbita de roçamento (Figuras 30 a 32). Tal indefinição foi presente quando o corpo de prova era de Nylon operando a rotação menor (7,6 Hz).

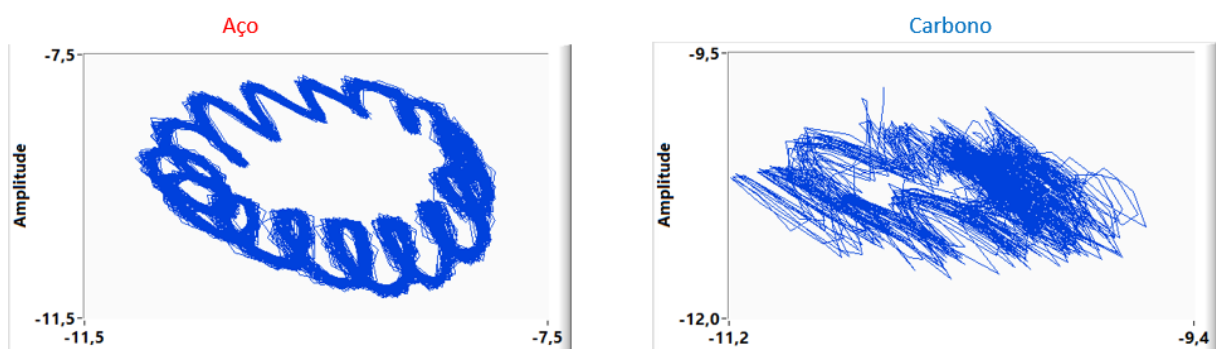
Apesar da rotação mais alta (26 Hz) diminuir o tempo de roçamento entre a ferramenta de corte e a peça usinada, quando a usinagem foi feita no corpo de prova de latão (Figuras 30 e 31) a formação da órbita conforme literatura prevê é apresentada no eixo árvore metálico, porém com valores de deslocamento menores quando analisado o eixo de compósito. Apesar das órbitas não serem bem claras em suas formas, seus valores de amplitude são menores quando comparados ao eixo metálico.

Figura 30: Comparações entre órbitas - Ensaio 7.



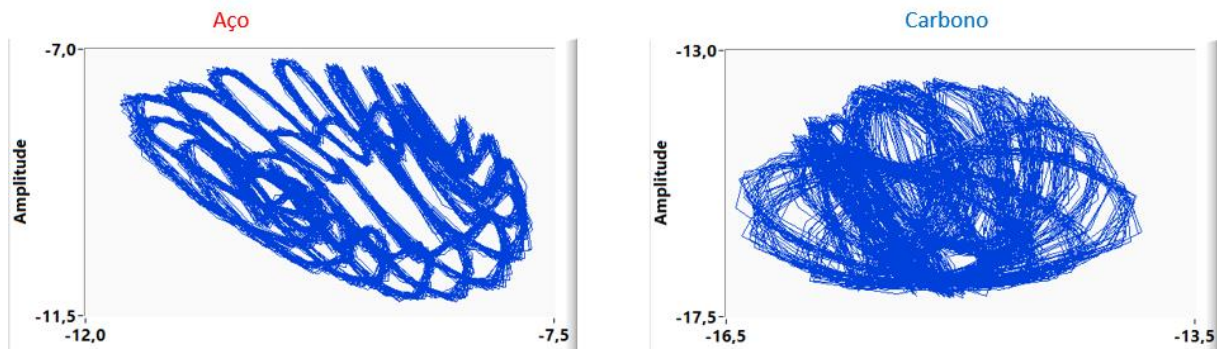
Fonte: Autoria própria.

Figura 31: Comparações entre órbitas - Ensaio 8.



Fonte: Autoria própria.

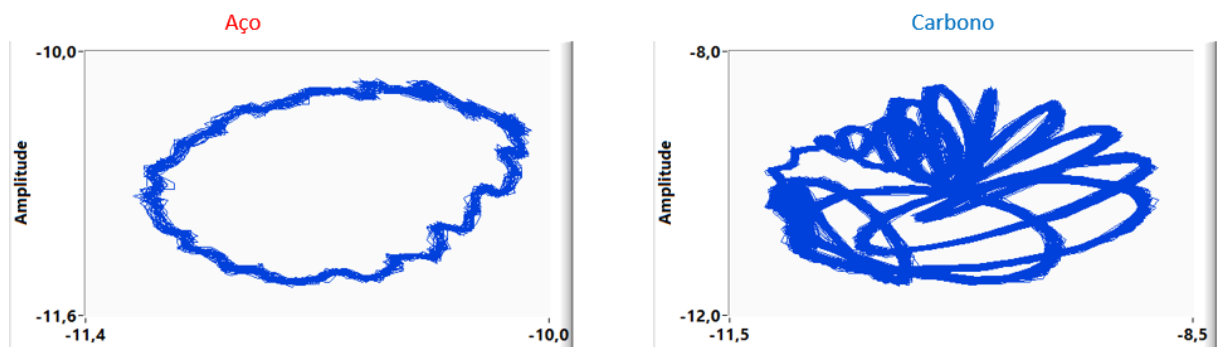
Figura 32: Comparações entre órbitas - Ensaio 10.



Fonte: Autoria própria.

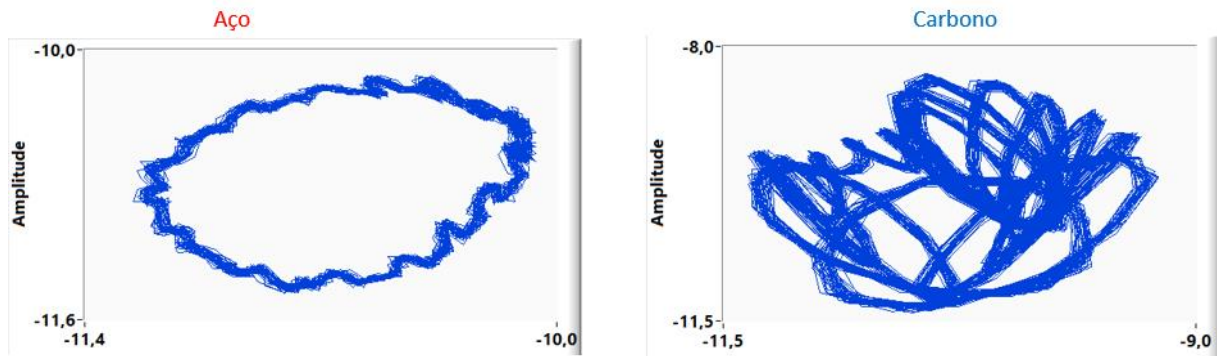
As órbitas dos ensaios 3 a 6 (Figuras 33 a 36) tiveram um comportamento diferenciado quando observado o eixo de material compósito. A órbita do eixo se comporta fazendo os laços e “cachos”, porém com uma tendência de encontro do movimento relativo ao centro do gráfico. Essa instabilidade de formação pode ser decorrente da presença do amortecimento interno que leva mudanças dos limites de instabilidades, aliado ao fato de que o efeito de roçamento intermitente desloca instantaneamente a frequência natural do sistema, esses dois pontos podem ter levados a essas formas únicas de órbitas em um eixo submetido a falha de roçamento.

Figura 33: Comparações entre órbitas - Ensaio 3.



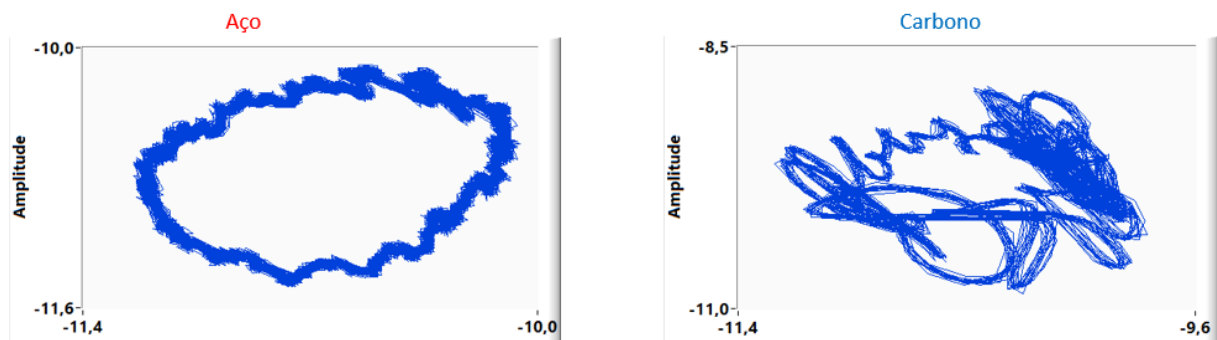
Fonte: Autoria própria.

Figura 34: Comparações entre órbitas - Ensaio 4.



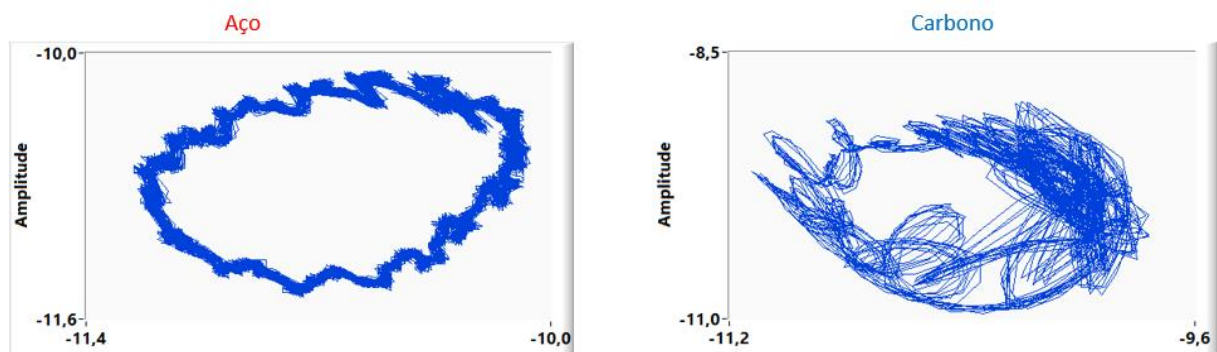
Fonte: Autoria própria.

Figura 35: Comparações entre órbitas - Ensaio 5.



Fonte: Autoria própria.

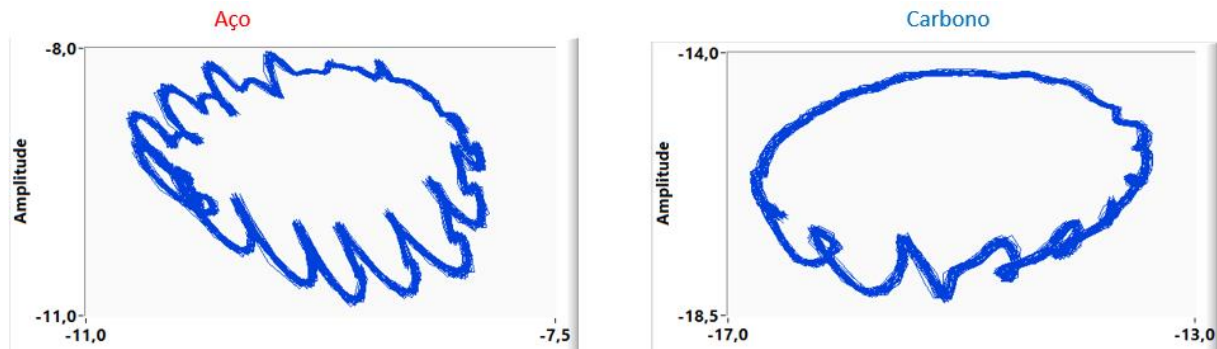
Figura 36: Comparações entre órbitas - Ensaio 6.



Fonte: Autoria própria.

O ensaio 9 apresentou vibrações e formas do gráfico de órbita semelhantes aos vistos nos ensaios 1 e 2. Esses ensaios apresentaram alta rotação e diferentes velocidades de avanço, mostrando redução do efeito de roçamento e órbitas com uma parte ondulada. Como se trata de um corpo de prova de material diferente, a combinação de uma rotação menor e velocidade de avanço promove um efeito similar (Figura 37).

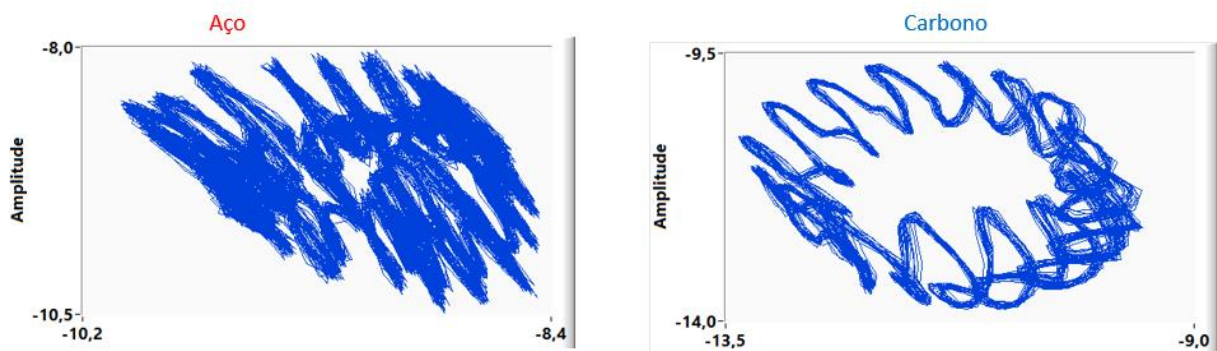
Figura 37: Comparações entre órbitas - Ensaio 9.



Fonte: Autoria própria.

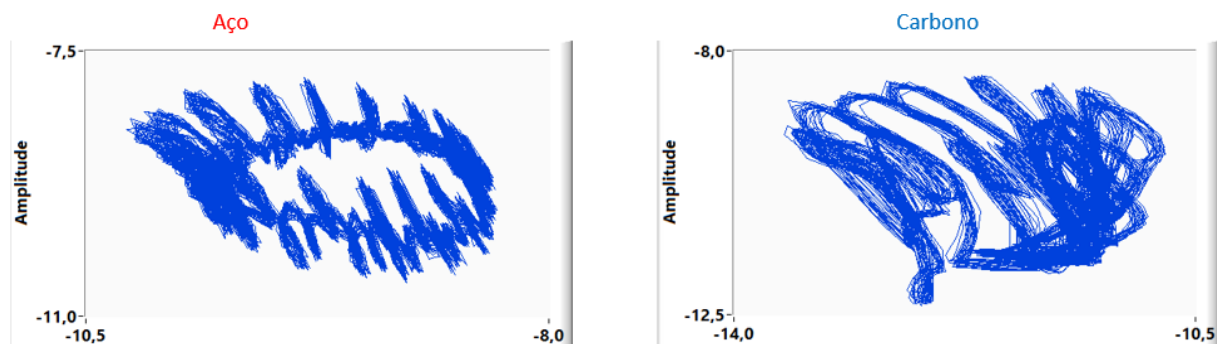
Os ensaios 11 e 12 (Figuras 38 e 39) apresentaram uma órbita de aparência filtrada em relação a órbita do eixo metálico, essa “filtragem” pode ser ocasionada também pela presença do amortecimento interno mais significativo, diminuindo a presença de ruídos nos sinais de deslocamento vertical e horizontal.

Figura 38: Comparações entre órbitas - Ensaio 11.



Fonte: Autoria própria.

Figura 39: Comparações entre órbitas - Ensaio 12.



Fonte: Autoria própria.

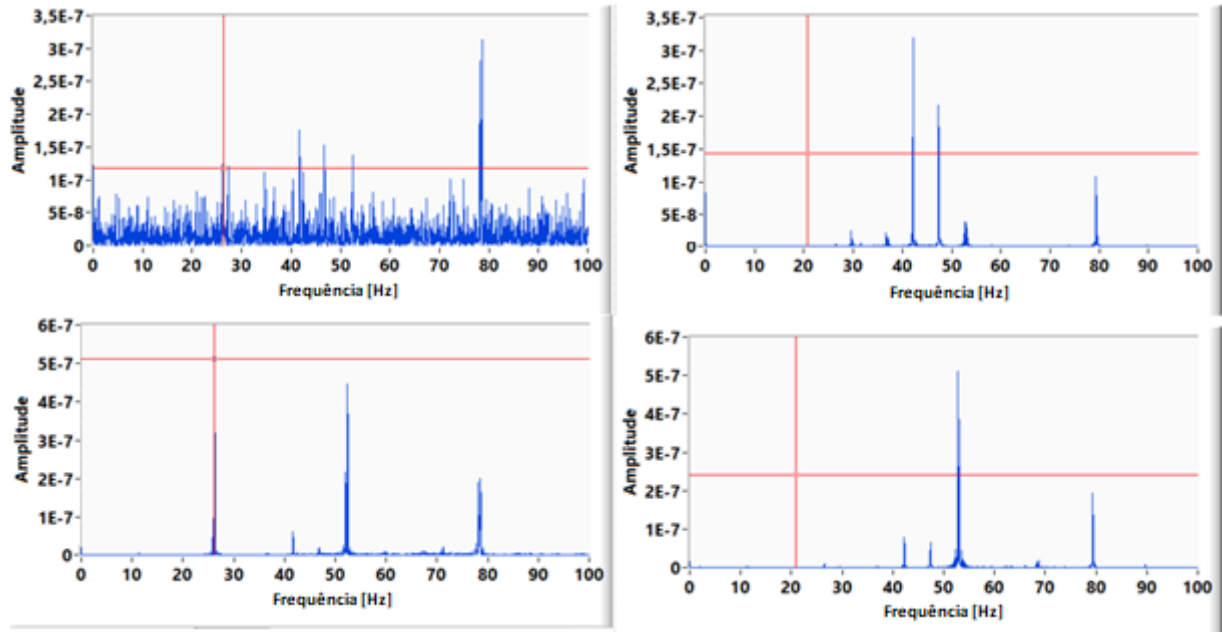
4.4.2 Comparação entre os espectros de frequência

A seguir estão todos os espectros de frequência obtidos pela medição de vibração no mancal com bucha deslizante. O sinal de aceleração, obtido por acelerômetros montados na direção vertical e horizontal estão dispostos na condição: sinais acima (verticais) e abaixo (horizontais). Ao lado esquerdo estão os resultados vindos do eixo árvore metálico e no direito no eixo de material compósito. No eixo horizontal são apresentados os valores de frequência em Hz, enquanto que as amplitudes estão nas chamadas Unidades de Engenharia [U.E.], o acelerômetro de carga possui sensibilidade em pC/g ou mV/U.E, logo o sinal de tensão pode ser relacionado uma variável de aceleração.

Com o material do CDP de Nylon (Figuras 40 a 45) os valores das magnitudes de 1X, seus sub-harmônicos e harmônicos caem quando utilizado o eixo de material compósito. Tal efeito pode estar relacionado a presença do amortecimento interno no sistema, suprimindo parte das vibrações. Salienta-se que a assinatura espectral é a semelhante do fenômeno de roçamento, conforme visto em revisão de literatura anteriormente. Podendo então considerar que o processo de usinagem além de envolverem os efeitos dinâmicos do corte também há o atrito entre parte móvel e fixa que dura o *dwell time*, isso tem relação com a falta ou perda de afiação da ferramenta de corte no processo de usinagem.

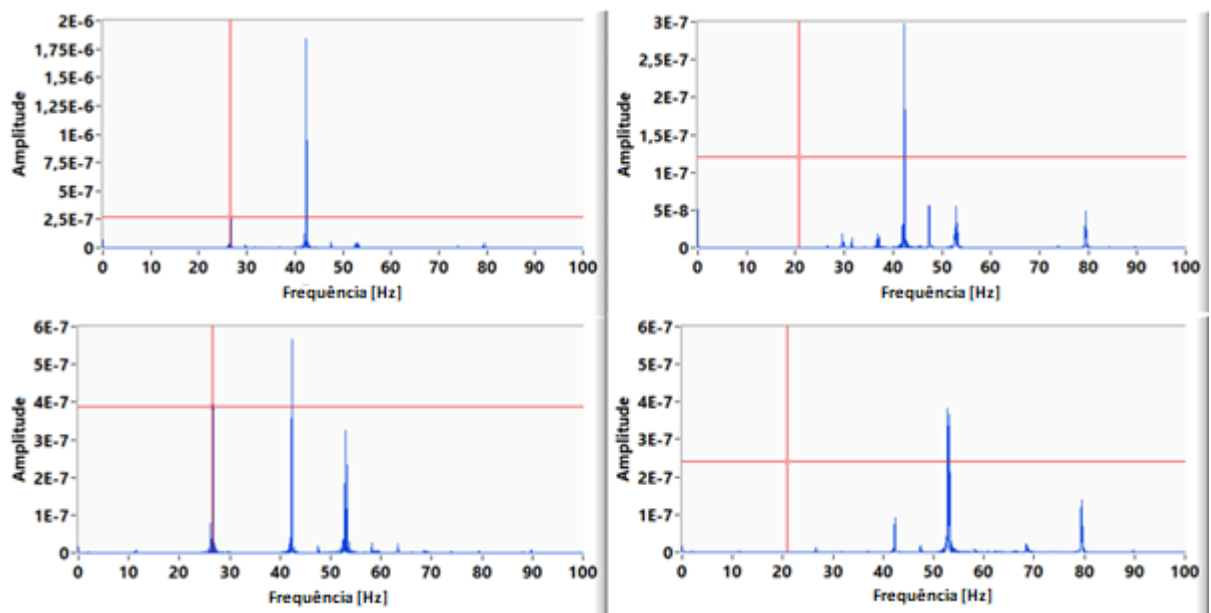
Quando a rotação de operação cai para o valor nominal de 456 RPM (7,6 Hz), os sinais de vibração se aproximam (Figuras 44 a 45) e o gráfico no domínio de frequência mostra grande similaridade entre as magnitudes das principais frequências observadas (1X, 1,5X, 2X, etc). A usinagem em rotação mais lenta promove menores esforços de deflexão do eixo e, portanto, seja a aplicação com eixo árvore metálico ou compósito a vibração resultante do ponto de vista da análise espectral é o mesmo.

Figura 40: Comparações entre espectros de frequência - Ensaio 1.



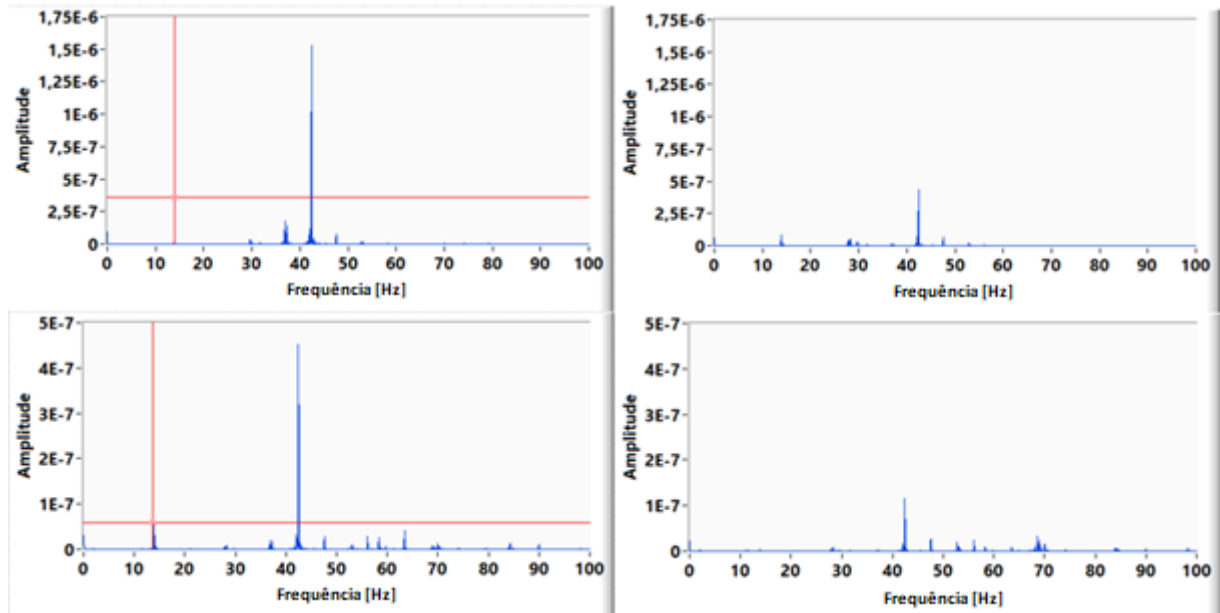
Fonte: Autoria própria.

Figura 41: Comparações entre espectros de frequência - Ensaio 2.



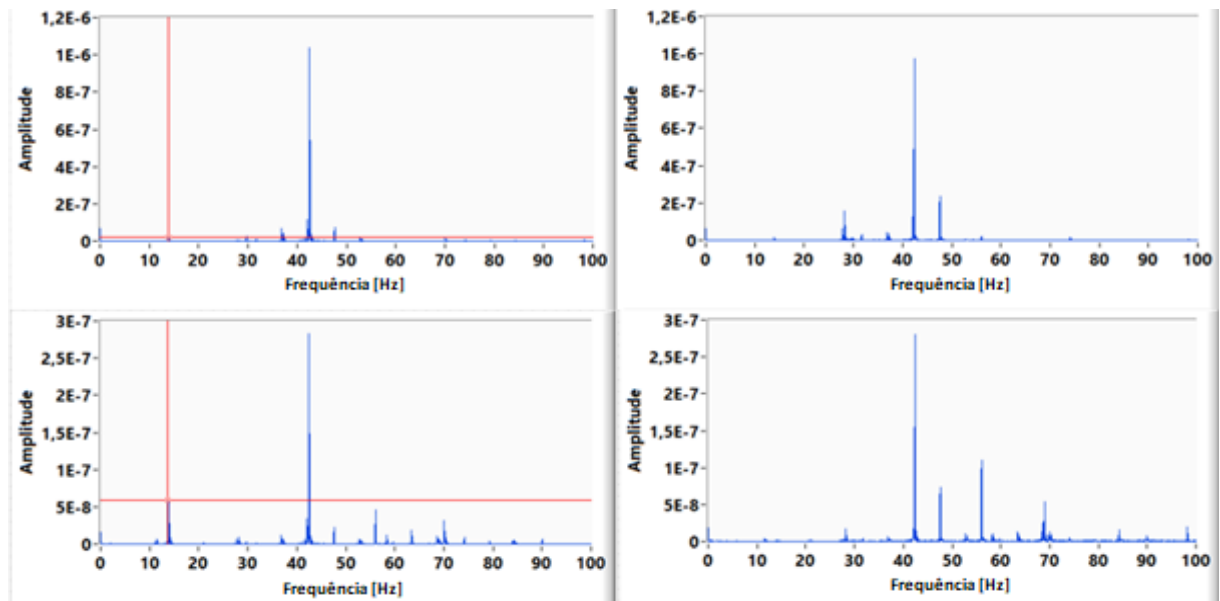
Fonte: Autoria própria.

Figura 42: Comparações entre espectros de frequência - Ensaio 3.



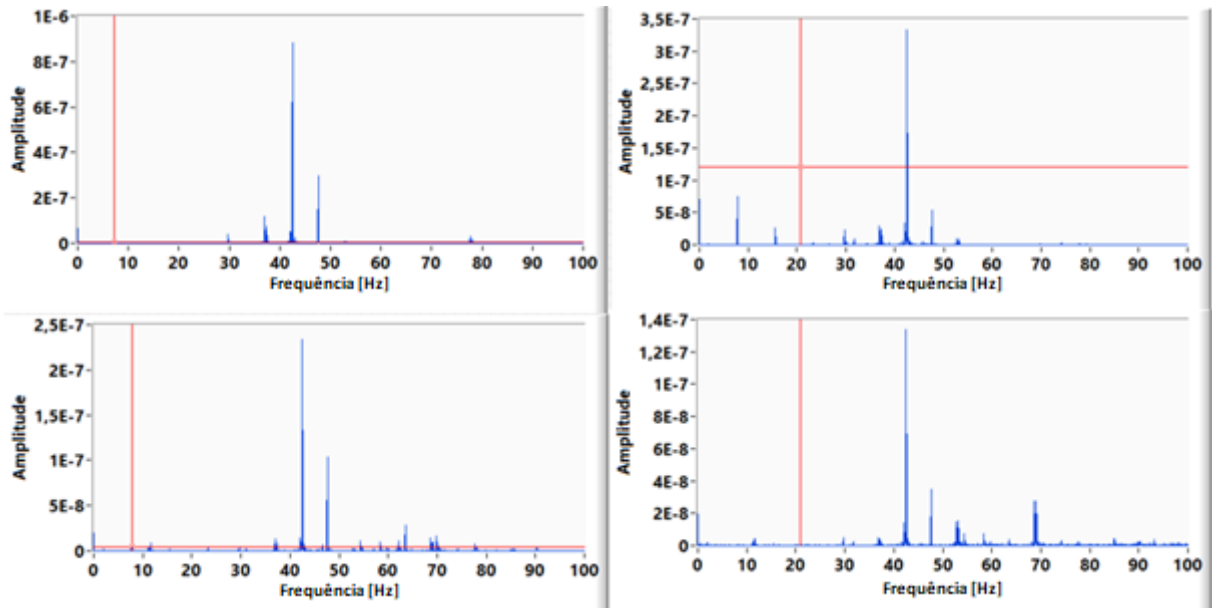
Fonte: Autoria própria.

Figura 43: Comparações entre espectros de frequência - Ensaio 4.



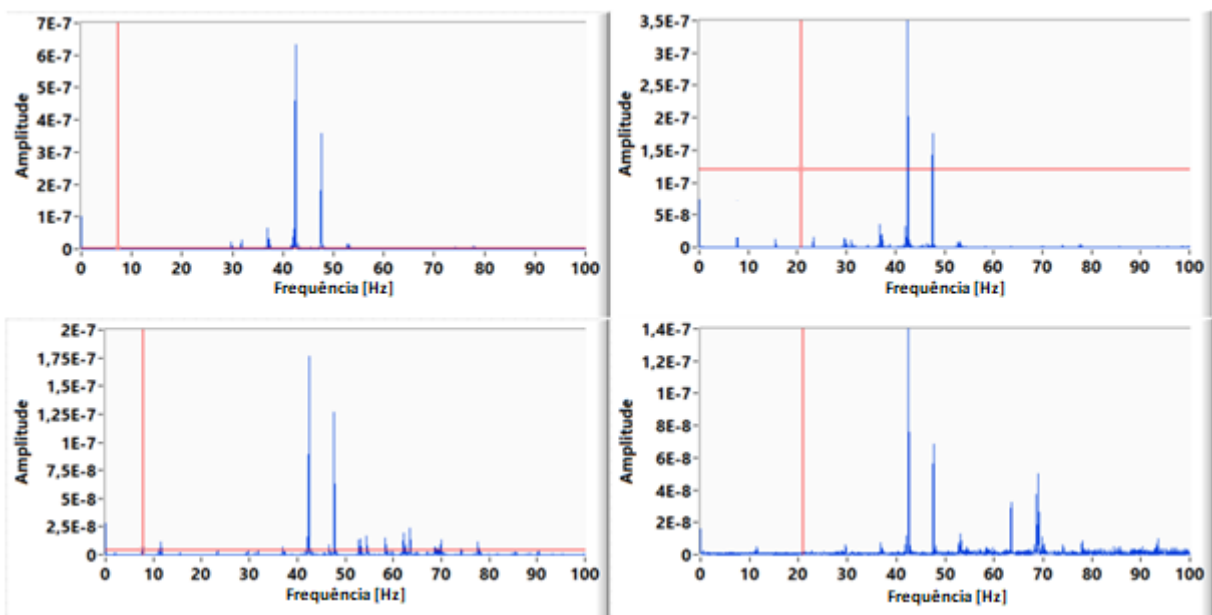
Fonte: Autoria própria.

Figura 44: Comparações entre espectros de frequência - Ensaio 5.



Fonte: Autoria própria.

Figura 45: Comparações entre espectros de frequência - Ensaio 6.

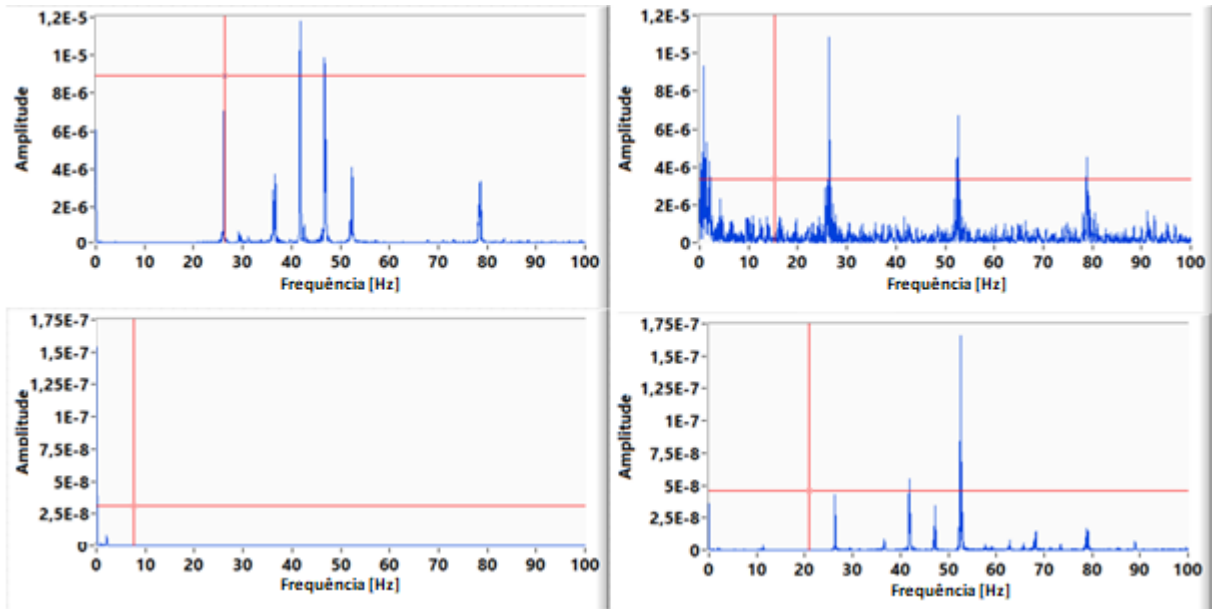


Fonte: Autoria própria.

Por fim são apresentados os resultados quando utiliza o material do CDP de Latão (Figuras 46 a 51). De forma geral, os valores das magnitudes de 1X e harmônicos caem quando utilizado o eixo de material compósito. Porém, na grande maioria das condições de usinagem, com exceção quando rotação é de 810 RPM (13,5 Hz) e velocidade de avanço de 50 mm/min (Figura 48), os sinais obtidos pelo acelerômetro vertical apresentaram ruídos excessivos,

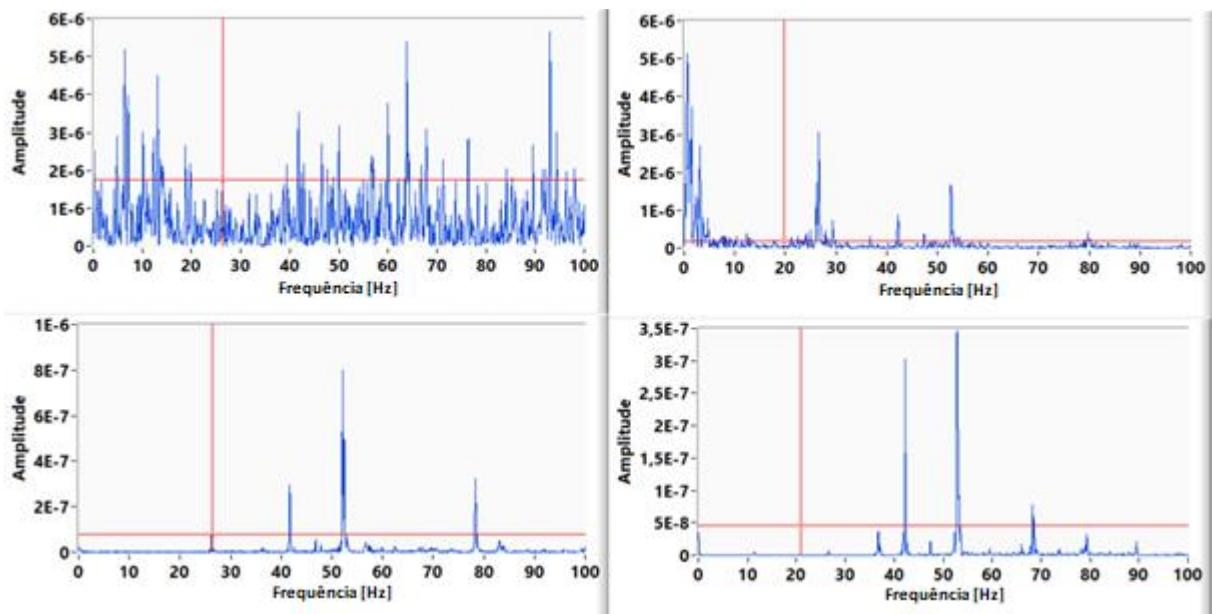
mesmo assim a assinatura espectral é bem observada e é a semelhante do fenômeno de roçamento.

Figura 46: Comparações entre espectros de frequência - Ensaio 7.



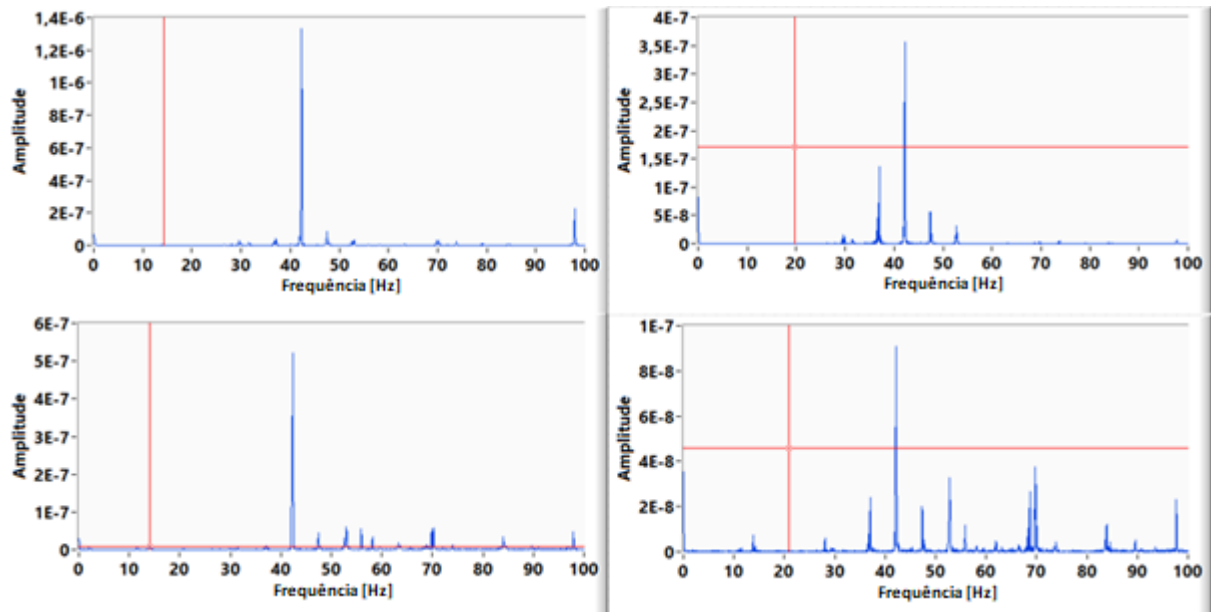
Fonte: Autoria própria.

Figura 47: Comparações entre espectros de frequência - Ensaio 8.



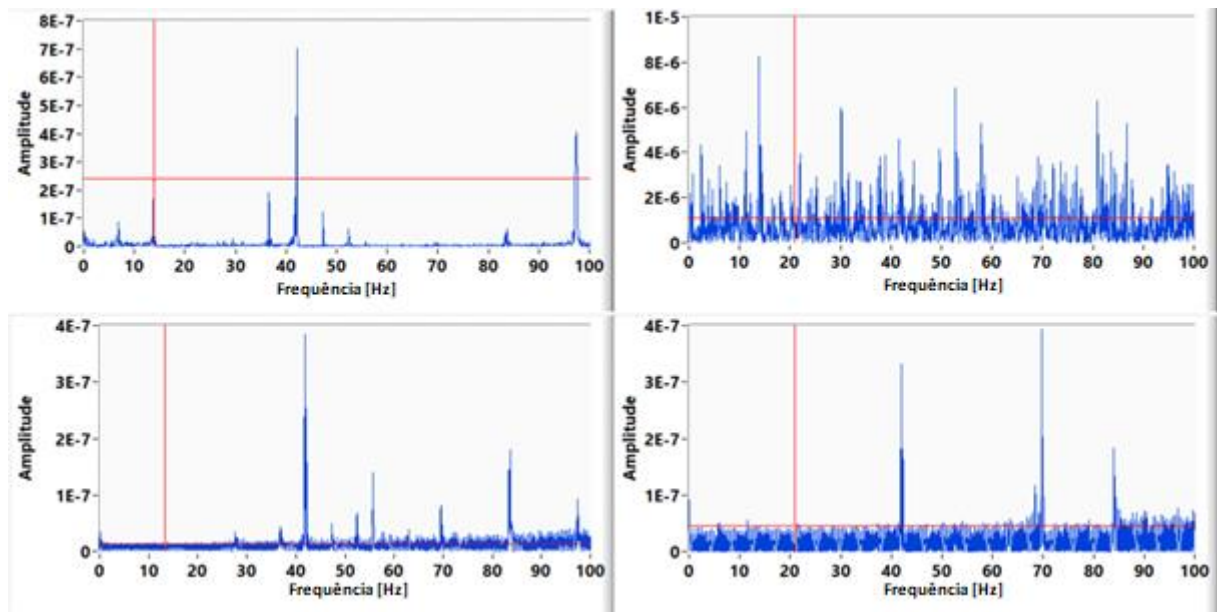
Fonte: Autoria própria.

Figura 48: Comparações entre espectros de frequência - Ensaio 9.



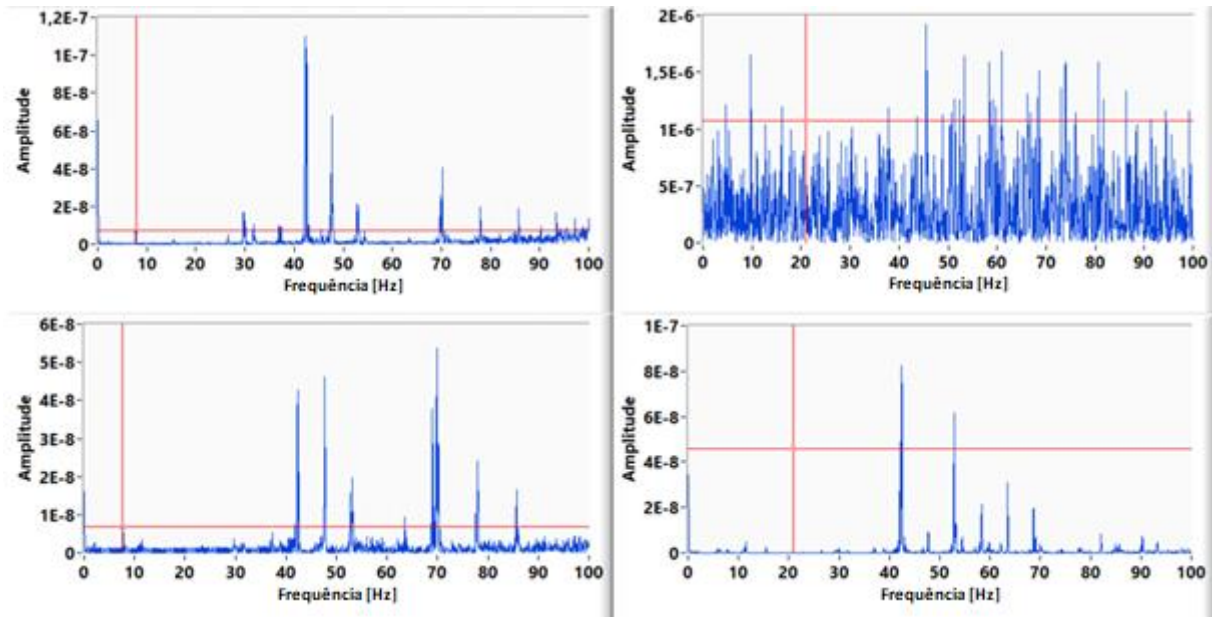
Fonte: Autoria própria.

Figura 49: Comparações entre espectros de frequência - Ensaio 10.



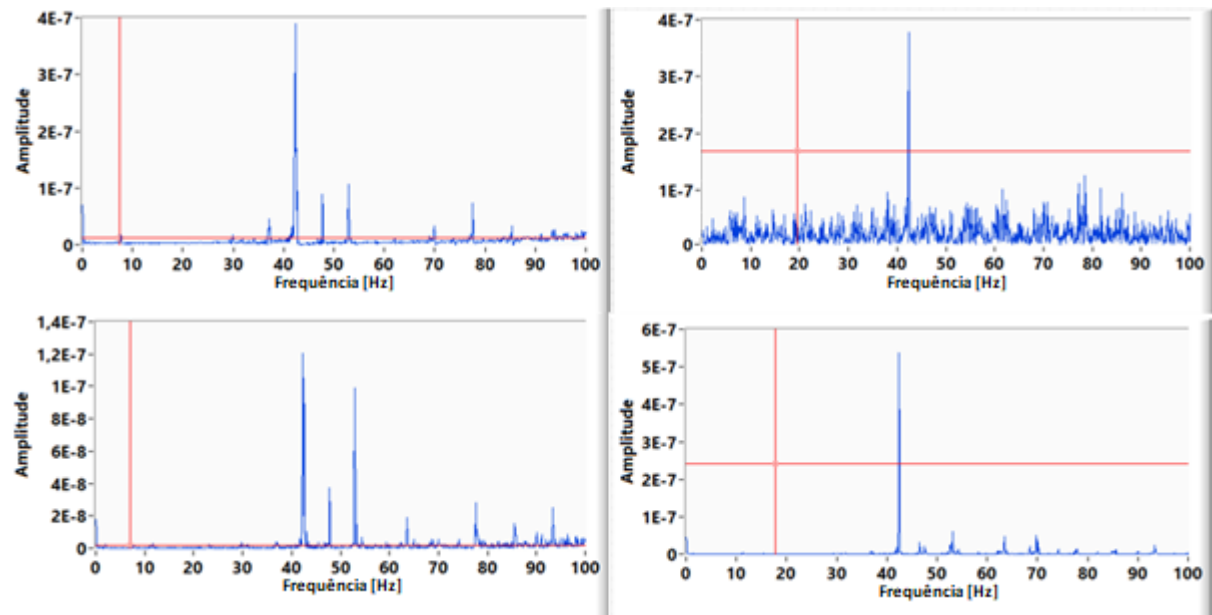
Fonte: Autoria própria.

Figura 50: Comparações entre espectros de frequência - Ensaio 11.



Fonte: Autoria própria.

Figura 51: Comparações entre espectros de frequência - Ensaio 12.



Fonte: Autoria própria.

Como curiosidade, em todos os ensaios que foram feitos com rotação nominal de operação de 1560 RPM (26 Hz), independente do material do CDP, levaram o aparecimento de uma frequência de aproximadamente 80 Hz nos espectros de frequência do eixo de compósito (Figuras 40, 41, 46 e 47). O valor não possui relação harmônica em relação a rotação do sistema, porém é mais evidenciado na configuração do eixo compósito. Quando a usinagem ocorre, a

ferramenta de corte atinge o material por um curto período de tempo, chamado *dwell time*, esse intervalo pode ser comparado quando se excita uma estrutura com um martelo, o que é visto em sequência é uma excitação das frequências naturais de flexão e torção.

4.4.3 Resultados das rugosidades resultantes

Após usinagem de diferentes materiais, foram obtidos nas Tabelas 5 e 6 os valores das rugosidades resultantes após cada condição de cada ensaio. Cada rugosidade foi medida 3 vezes e assim obtido uma média.

As demais rugosidades foram medidas e através das Figuras 52 a 54, foram apresentadas comparações gráficas para cada ensaio realizado. Na Figura 52 pode-se ver que a rugosidade média (R_a) foi menor em todos os pontos quando o eixo árvore é o de material metálico, possivelmente pela robustez e da condição geométrica de eixo maciço do eixo metálico frente ao eixo de fibra de carbono. Nas Figuras 53 e 54 o resultado se difere em alguns pontos, mostrando que utilizando um eixo de peso bem menor e fixado através de adesivo pode levar a condições melhores de rugosidade média total (R_z) e rugosidade total (R_t).

Tabela 5: Rugosidades após usinagem com eixo árvore de aço.

Ensaio	Material	R_a [μm]	R_z [μm]	R_t [μm]
1	Nylon	1,786	8,621	15,617
2	Nylon	1,585	8,146	17,323
3	Nylon	0,753	3,569	5,758
4	Nylon	0,971	3,835	6,814
5	Nylon	0,589	2,746	3,715
6	Nylon	0,861	4,069	6,521
7	Latão	0,472	2,550	4,120
8	Latão	0,394	2,355	4,789
9	Latão	1,820	10,448	18,813
10	Latão	2,025	14,667	28,163
11	Latão	0,675	3,858	8,357
12	Latão	1,034	5,475	9,979

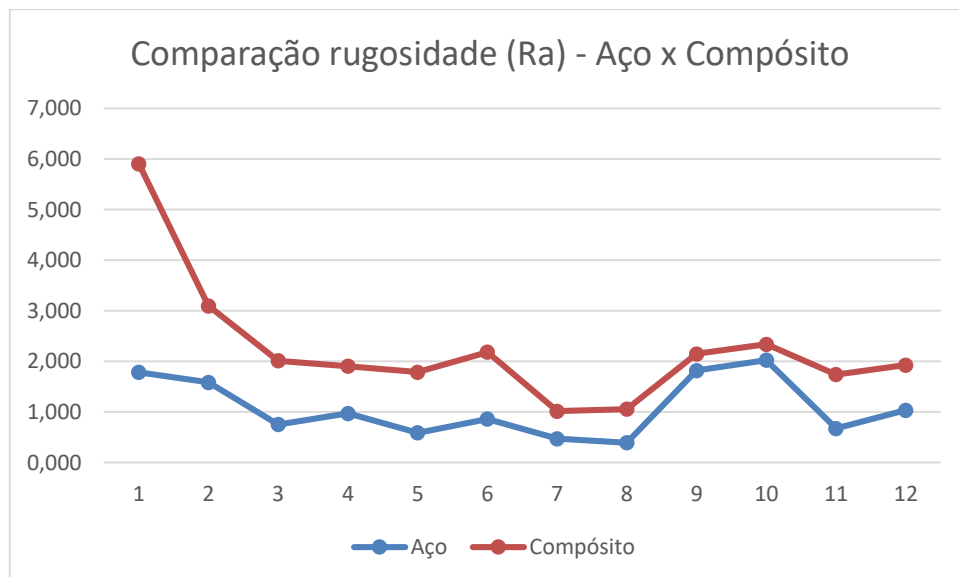
Fonte: Autoria própria.

Tabela 6: Rugosidades após usinagem com eixo árvore de compósito.

Ensaio	Material	Ra [μm]	Rz [μm]	Rt [μm]
1	Nylon	4,116	23,547	35,107
2	Nylon	1,512	6,476	14,672
3	Nylon	1,260	5,213	8,122
4	Nylon	0,935	4,379	6,733
5	Nylon	1,197	4,440	8,027
6	Nylon	1,321	5,366	8,368
7	Latão	0,546	3,293	5,557
8	Latão	0,663	3,023	4,869
9	Latão	0,327	1,560	2,269
10	Latão	0,313	1,827	2,846
11	Latão	1,065	6,143	9,146
12	Latão	0,893	4,641	7,864

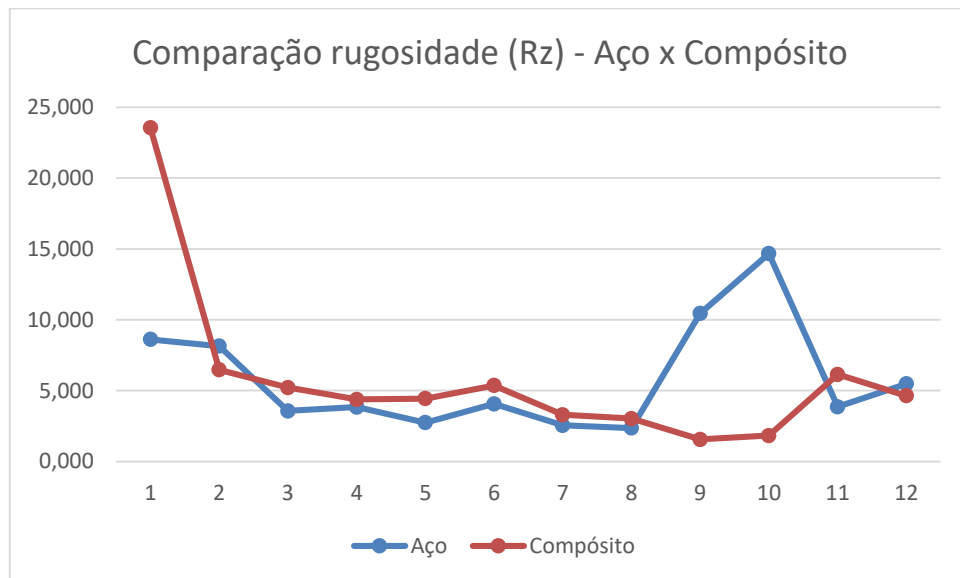
Fonte: Autoria própria.

Figura 52: Comparação rugosidade (Ra) nos materiais após usinagem com eixo de aço e compósito.



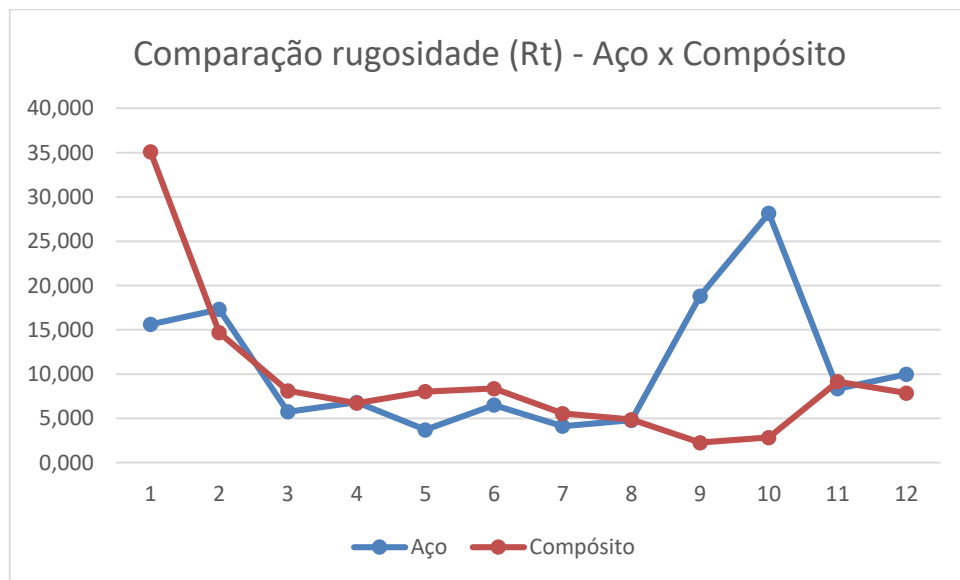
Fonte: Autoria própria.

Figura 53: Comparação rugosidade média (Rz) nos materiais após usinagem com eixo de aço e compósito.



Fonte: Autoria própria.

Figura 54: Comparação rugosidade total (Rt) nos materiais após usinagem com eixo de aço e compósito.



Fonte: Autoria própria.

As análises estatísticas e gráficos foram realizadas através do software Minitab 19 a fim de verificar se houve interações entre o material de construção do eixo árvore, material do CDP, rotação e velocidade de avanço variáveis de rugosidade superficial.

Nas Figura 55, 58 e 61 estão os dados obtidos através da análise de variância e das influências sobre a média. Nessa análise foi feita um experimento fatorial, que consiste de um experimento planejado para se observar os efeitos de diversos fatores sobre uma resposta. Nesse tipo de experiência são variados os níveis de todos os fatores em análise simultaneamente. De maneira geral, são considerados significativos estatisticamente aqueles parâmetros ou combinação de parâmetros que apresentam um valor de *p-value* menor que 0,05, que representa um risco de 5% de se concluir que há uma associação quando não existe uma associação real.

Observando a Figura 55, o material do eixo não influenciou de forma significativa estatisticamente quando analisado sozinho, porém, quando combinado com diferentes tipos de materiais de CDP, rotação e a velocidade de avanço, em interações de segunda ordem, se mostraram significativas estatisticamente. O mesmo ocorre quando combinado em interações de terceira ordem, quando combinado com o material do CDP e rotação ou velocidade de avanço, mas não apenas com a rotação e velocidade de avanço. Há influência estatística quando se combina os quatro parâmetros.

Figura 55: Dados da análise de variância para a rugosidade Ra.

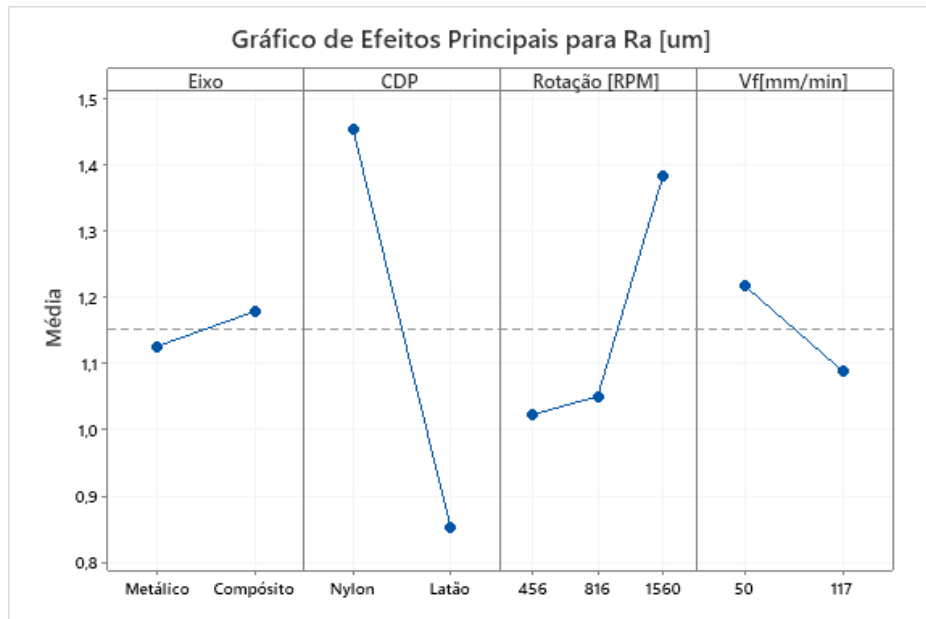
Análise de Variância

Fonte	Valor-P
Modelo	0,000
Blocos	0,700
Linear	0,000
Eixo	0,480
CDP	0,000
Rotação [RPM]	0,000
Vf[mm/min]	0,089
Interações de 2 fatores	0,000
Eixo*CDP	0,000
Eixo*Rotação [RPM]	0,000
Eixo*Vf[mm/min]	0,000
CDP*Rotação [RPM]	0,000
CDP*Vf[mm/min]	0,011
Rotação [RPM]*Vf[mm/min]	0,000
Interações de 3 fatores	0,000
Eixo*CDP*Rotação [RPM]	0,000
Eixo*CDP*Vf[mm/min]	0,001
Eixo*Rotação [RPM]*Vf[mm/min]	0,141
CDP*Rotação [RPM]*Vf[mm/min]	0,000
Interações de 4 fatores	0,002
Eixo*CDP*Rotação [RPM]*Vf[mm/min]	0,002
Erro	
Total	

Fonte: Autoria própria.

A Figura 56 apresenta os efeitos causados pelos materiais aplicados no eixo árvore (Metálico e compósito), material do CDP, velocidade de avanço e rotação em relação rugosidade média total. É possível observar a influência das interações de segunda ordem.

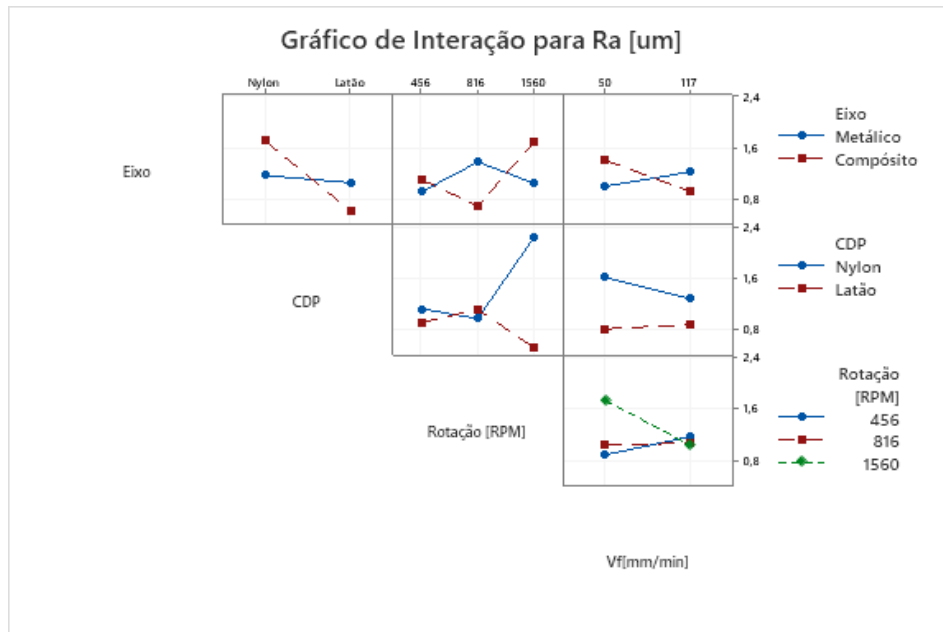
Figura 56: Relação dos efeitos principais entre os parâmetros de entrada e a saída Ra [μm].



Fonte: Autoria própria.

A Figura 57 por sua vez, é a representação gráfica da sinergia entre dois parâmetros, ou seja, parâmetros que tiveram uma significância estatística quando combinados entre si. Quando as linhas dos gráficos se cruzam, ou tem uma tendência a se cruzarem, há uma interação entre parâmetros. No entanto, os gráficos podem não apresentar a informação de forma tão sensíveis e perceptível quanto o valor de *p-value* apresentados na Figura 55, contudo, neste caso, é possível observar que o gráfico do material do eixo árvore em relação aos 3 variáveis apresenta um cruzamento ou então a tendência de cruzamento.

Figura 57: Relação das interações entre os parâmetros de entrada e a saída Ra [μm].



Fonte: Autoria própria.

Na Figura 58 estão os dados obtidos através da análise de variância e das influências sobre a média. É possível concluir que o parâmetro linear do eixo não influenciou de forma significativa estatisticamente quando analisado sozinho, porém, quando combinado com diferentes tipos de materiais de CDP, rotação e a velocidade de avanço, em interações de segunda ordem, se mostraram significativas estatisticamente. O mesmo ocorre quando combinado em interações de terceira ordem, quando combinado com o material do CDP e rotação ou velocidade de avanço e quando combinado com rotação e velocidade de avanço. Também há influência estatística de quarta ordem.

Figura 58: Dados da análise de variância para a rugosidade Rz.

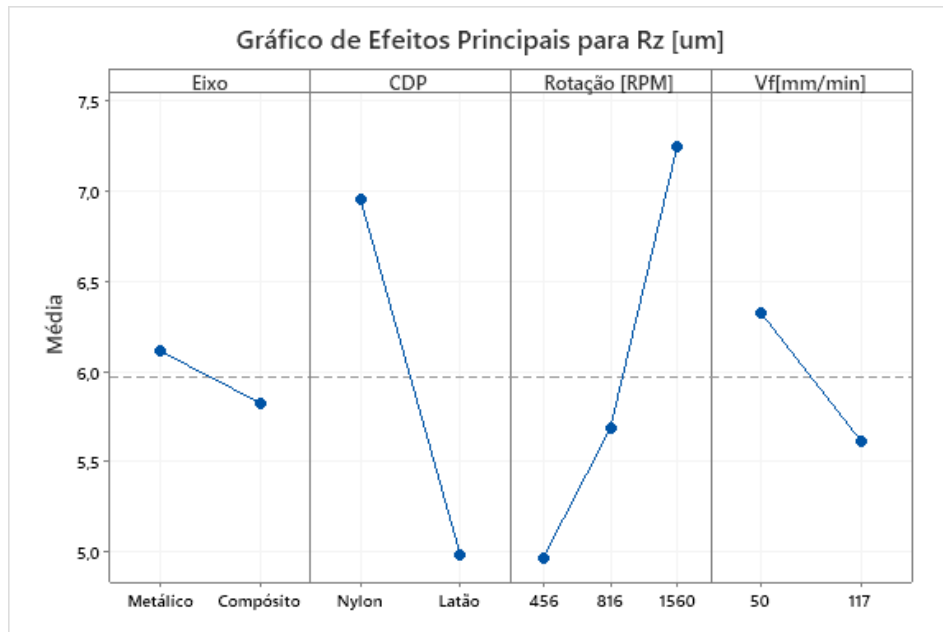
Análise de Variância

Fonte	Valor-P
Modelo	0,000
Blocos	0,402
Linear	0,000
Eixo	0,552
CDP	0,000
Rotação [RPM]	0,001
Vf[mm/min]	0,144
Interações de 2 fatores	0,000
Eixo*CDP	0,000
Eixo*Rotação [RPM]	0,000
Eixo*Vf[mm/min]	0,000
CDP*Rotação [RPM]	0,000
CDP*Vf[mm/min]	0,005
Rotação [RPM]*Vf[mm/min]	0,000
Interações de 3 fatores	0,000
Eixo*CDP*Rotação [RPM]	0,000
Eixo*CDP*Vf[mm/min]	0,018
Eixo*Rotação [RPM]*Vf[mm/min]	0,036
CDP*Rotação [RPM]*Vf[mm/min]	0,000
Interações de 4 fatores	0,000
Eixo*CDP*Rotação [RPM]*Vf[mm/min]	0,000
Erro	
Total	

Fonte: Autoria própria.

A Figura 59 apresenta os efeitos causados pelos materiais aplicados no eixo árvore (Metálico e compósito), material do CDP, velocidade de avanço e rotação em relação rugosidade média total. É possível observar a influência das interações de segunda e terceira ordem.

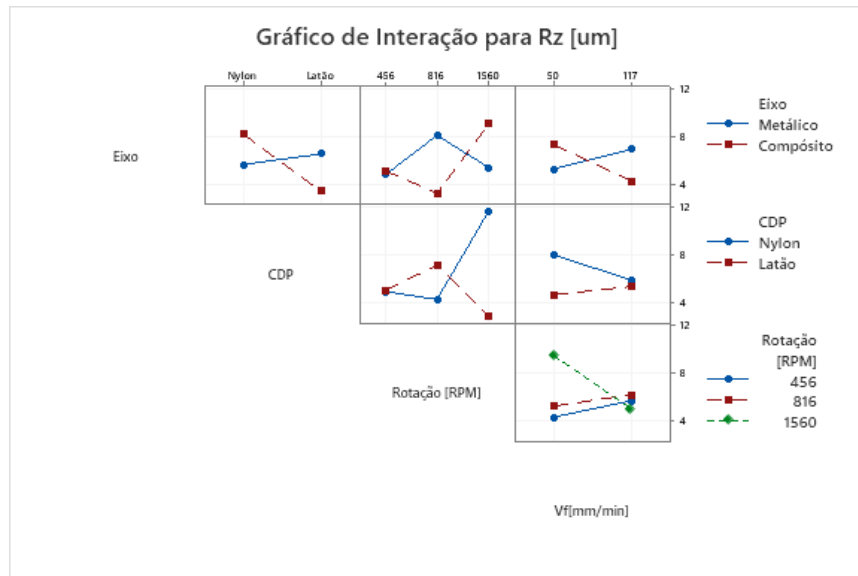
Figura 59: Relação dos efeitos principais entre os parâmetros de entrada e a saída Rz [μm].



Fonte: Autoria própria.

A Figura 60 por sua vez, é a representação gráfica da sinergia entre dois parâmetros, ou seja, parâmetros que tiveram uma significância estatística quando combinados entre si. Quando as linhas dos gráficos se cruzam, ou tem uma tendência a se cruzarem, há uma interação entre parâmetros. No entanto, os gráficos podem não apresentar a informação de forma tão sensíveis e perceptível quanto o valor de *p-value* apresentados na Figura 58, contudo, neste caso, é possível observar que o gráfico do material do eixo árvore em relação aos 3 variáveis apresenta um cruzamento ou então a tendência de cruzamento.

Figura 60: Relação das interações entre os parâmetros de entrada e a saída Rz [μm].



Fonte: Autoria própria.

Na Figura 61 estão os dados obtidos através da análise de variância e das influências sobre a média. Neste caso o parâmetro linear do eixo influenciou de forma significativa estatisticamente quando analisado sozinho, além dele, quando combinado com os demais parâmetros, em interações de segunda ordem, se mostraram significativas estatisticamente. O mesmo ocorre quando combinado em interações de terceira ordem, quando combinado com o material do CDP e rotação unicamente. Também há influência estatística de quarta ordem.

Figura 61: Dados da análise de variância para a rugosidade Rt.

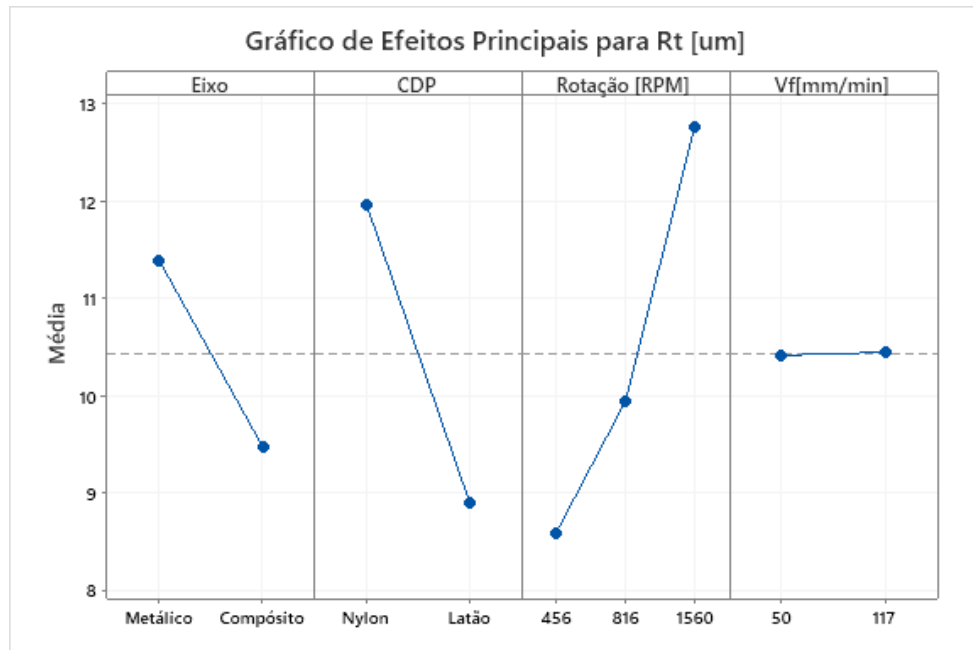
Análise de Variância

Fonte	Valor-P
Modelo	0,000
Blocos	0,194
Linear	0,000
Eixo	0,046
CDP	0,002
Rotação [RPM]	0,003
Vf[mm/min]	0,974
Interações de 2 fatores	0,000
Eixo*CDP	0,000
Eixo*Rotação [RPM]	0,000
Eixo*Vf[mm/min]	0,000
CDP*Rotação [RPM]	0,000
CDP*Vf[mm/min]	0,080
Rotação [RPM]*Vf[mm/min]	0,004
Interações de 3 fatores	0,000
Eixo*CDP*Rotação [RPM]	0,000
Eixo*CDP*Vf[mm/min]	0,082
Eixo*Rotação [RPM]*Vf[mm/min]	0,320
CDP*Rotação [RPM]*Vf[mm/min]	0,014
Interações de 4 fatores	0,018
Eixo*CDP*Rotação [RPM]*Vf[mm/min]	0,018
Erro	
Total	

Fonte: Autoria própria.

Na Figura 62 os efeitos causados pelos materiais aplicados no eixo árvore (Metálico e compósito) com o material do CDP e a rotação mostram influência das interações de segunda ordem. Quando combinado com a velocidade de avanço, essa influência cai devido ao alto valor de *p-value* em interação de terceira ordem.

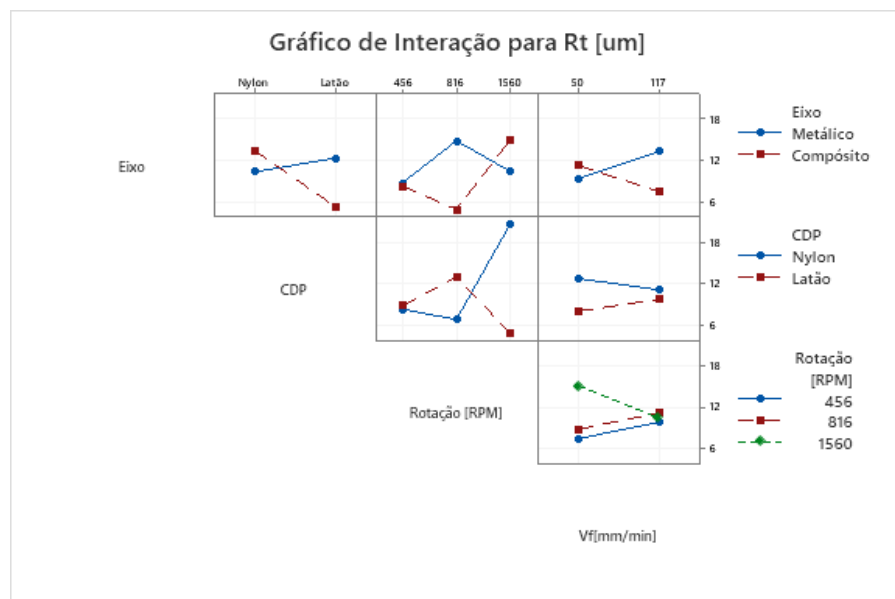
Figura 62: Relação dos efeitos principais entre os parâmetros de entrada e a saída Rt [μm].



Fonte: Autoria própria.

Por fim na Figura 63 observar-se que o gráfico do material do eixo árvore em relação aos 3 variáveis apresentam um cruzamento ou então a tendência de cruzamento, mostrando interações entre os parâmetros.

Figura 63: Relação das interações entre os parâmetros de entrada e a saída Rt [μm].



Fonte: Autoria própria.

5 CONCLUSÃO

As aplicações de materiais compósitos vêm sendo exploradas em diferentes áreas da engenharia, nesse trabalho foi visto como que esse tipo de material pode ser usado como base do eixo árvore em fresadoras horizontais.

O processo de fresamento tangencial, oriundo da configuração de eixo árvore montado no sentido horizontal, promove vibrações durante o processo de corte. Essa vibração além da parcela devida a dinâmica do mecanismo de formação do cavaco, também é composta por uma parte de atrito. O atrito ocorre quando a ferramenta de corte perde sua afiação por exemplo, e quando isso acontece o contato entre parte móvel e fixa, pode ser considerada como efeito de roçamento, o mesmo observado em mecanismo de falha em máquinas rotativas.

Com isso, diante da multidisciplinaridade desta aplicação proposta nesse trabalho, foi necessário o conhecimento de materiais compósitos, a compreensão do comportamento dinâmico quando o roçamento acontece, o processo de usinagem e toda a avaliação experimental para verificar a viabilidade do uso de material compósito como parte de eixos árvores para fresamento tangencial, conclui-se que:

- A partir de uma pré-caracterização foi observado na microscopia ótica que o eixo se trata de um material compósito construído de maneira híbrida, ou seja, sequência de empilhamento variada (90/0/90/0°) e uso de tipos de tecidos variados;
- No ensaio de deflexão e análise modal, foram identificados seu módulo de elasticidade (54,33 GPa), frequência natural experimental (493,77 Hz) e fator de amortecimento (14,58%). Houve uma comparação entre a frequência natural teórica com a experimental, com uma diferença de 3,06%;
- Durante o processo de corte, as órbitas do centro eixo foram observadas com o uso de proxímetros e percebidos os fenômenos de roçamento e a identificação de padrões de órbitas diferentes de um eixo feito de material metálico;
- Também foram analisados os espectros de vibração, mostrando que o eixo árvore produzido de material compósito possui menor magnitude de vibração e assinatura espectral igual a sugerida para o fenômeno de roçamento;
- Ao fim, a avaliação de rugosidade superficial após usinagem foi feita e através de análise das variâncias, pode-se perceber a significância estatística do material em relação aos demais parâmetros de usinagem. A qualidade superficial de usinagem foi

melhor obtida quando é usado o eixo árvore de material compósito, observando a rugosidade média total e rugosidade total com valores menores.

Portanto, o uso de material compósito se mostra mais uma vez viável em uma diferente área da engenharia, nesse caso na otimização do processo de usinagem. Levando menores níveis de vibração e melhor qualidade superficial. Também pode ser visto uma previsibilidade do comportamento dinâmico desse tipo de eixo em relação ao tradicional material metálico, quando é visto que o fenômeno de roçamento é comum em ambos os casos.

5.1 SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS

As sugestões para trabalhos futuros incluem:

- (i) simulação de modelo numérico com os parâmetros experimentais obtidos utilizando de modelos disponíveis destacados na revisão de literatura;
- (ii) Repetição do ensaio de usinagem com ferramenta de corte de comprimento menor (fresa de disco), tornando o contato mais pontual e, portanto, um fenômeno de roçamento discreto;
- (iii) estudo tribo-dinâmico do sistema com aplicação de diferentes fluidos lubrificantes, variando parâmetros como viscosidade e temperatura de trabalho.

REFERÊNCIAS

- AKLILU, G.; ADALI, S.; BRIGHT, G. Failure analysis of rotating hybrid laminated composite beams. **Engineering Failure Analysis**, Oxford, v. 101, n. Mar.ch, p. 274–282, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2019.03.019> Acesso em: 09 jun. 2020.
- BEN ARAB, S. *et al.* Stability analysis of internally damped rotating composite shafts using a finite element formulation. **Comptes Rendus - Mecanique**, Paris, v. 346, n. 4, p. 291–307, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.crme.2018.01.002> Acesso em: 10 jun. 2020.
- BAB, S. *et al.* Annihilation of non-stationary vibration of a gas turbine rotor system under rub-impact effect using a nonlinear absorber. **Mechanism and Machine Theory**, Elmsford, v. 139, p. 379–406, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.mechmachtheory.2019.05.005> Acesso em: 09 jun. 2020.
- BADIE, M. A.; MAHDI, E.; HAMOUDA, A. M. S. An investigation into hybrid carbon/glass fiber reinforced epoxy composite automotive drive shaft. **Materials and Design**, Surrey, v. 32, n. 3, p. 1485–1500, 2011. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.matdes.2010.08.042>. Acesso em: 09 jun. 2020.
- BANG, K. G.; LEE, D. G. Design of carbon fiber composite shafts for high speed air spindles. **Composite Structures**, Oxford, v. 55, n. 2, p. 247–259, 2002.
- BARBOSA, P. C. P. F. *et al.* Experimental analysis of the SHBT approach for the dynamic modeling of a composite hollow shaft. **Composite Structures**, Oxford, v. 236, p. 111892, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2020.111892> Acesso em: 02 fev. 2021.
- BENTLY, D. E.; HATCH, C. T. **Fundamentals of rotating machinery diagnostics**. Canada: Bently Pressurized Bearing Company, 2002, 721 p.
- BERTHELOT, J. **Composite materials: mechanical behavior and structural analysis**. New York: Springer, 1999. 646 p.

BODAKE, P. M.; AHER, V. S. Design and analysis of composite drive shaft. **International Journal for Research in Applied Science and Engineering Technology**, Mumbai, v. 6, n. 5, p. 1570–1576, 2018.

BOVSUNOVSKY, A. P. Estimation of efficiency of vibration damage detection in stepped shaft of steam turbine. **Electric Power Systems Research**, Amsterdam, v. 154, p. 381–390, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2017.09.012> Acesso em: 08 jun. 2020.

CALLISTER, W. D. **Ciência e engenharia de materiais: uma introdução**. 7. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2008. 589 p.

CASO, E. *et al.* Monitoring of misalignment in low speed geared shafts with acoustic emission sensors. **Applied Acoustics**, Amsterdam, v. 159, p. 107092, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2019.107092> Acesso em: 03 mar. 2021.

CHIAVERINI, V. **Tecnologia mecânica: processos de fabricação e tratamento**. 2.ed. São Paulo: Editora McGraw-Hill, 1986. v.2, 334 p.

CHOI, J. K.; LEE, D. G. Manufacture of a carbon fibre-epoxy composite spindle-bearing system for a machine tool. **Composite Structures**, Oxford, v. 37, n. 2, p. 241–251, 1997.

CHOUKSEY, M.; DUTT, J. K.; MODAK, S. V. Modal analysis of rotor-shaft system under the influence of rotor-shaft material damping and fluid film forces. **Mechanism and Machine Theory**, Elmsford, v. 48, n. 1, p. 81–93, 2012. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.mechmachtheory.2011.09.001> Acesso em: 10 jun. 2020.

CULBERT, I.; LETAL, J. Signature analysis for online motor diagnostics: early detection of rotating machine problems prior to failure. **IEEE Industry Applications Magazine**, New York, v. 23, n. 4, p. 76–81, 2017. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/7900405> Acesso em: 09 jun. 2020.

DINIZ, A. E.; MARCONDES, F. C.; COPPINI, N. L. **Tecnologia da usinagem dos materiais**. 9. ed. São Paulo: Artliber Editora, 2014. 63 p.

ELANCHEZHIAN, C. *et al.* Design and comparison of the strength and efficiency of drive shaft made of steel and composite materials. **Materials Today: Proceedings**, Oxford, v. 5, n. 1, p. 1000–1007, 2018.

FRISWELL, M. I. *et al.* **Dynamics of rotating machines**. New York: Cambridge University Press, 2010. 526 p.

FU, C. *et al.* Dynamics analysis of a hollow-shaft rotor system with an open crack under model uncertainties. **Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation**, Oxford, v. 83, p. 105102, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.cnsns.2019.105102> Acesso em: 03 fev. 2021.

GOHARI, M.; EYDI, A. M. Modelling of shaft unbalance: modelling a multi discs rotor using K-nearest neighbor and decision tree algorithms. **Measurement: Journal of the International Measurement Confederation**, London, v. 151, p. 107253, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2019.107253> Acesso em: 03 fev. 2021.

GROSS, D. *et al.*; Comparison of linear and trochoidal milling for wear and vibration reduced machining. **Procedia CIRP**, Oxford, v. 90, p. 563–567, 2020.

GUBRAN, H. B. H.; GUPTA, K. The effect of stacking sequence and coupling mechanisms on the natural frequencies of composite shafts. **Journal of Sound and Vibration**, London, v. 282, n. 1–2, p. 231–248, 2005.

HAJIANMALEKI, M.; QATU, M. S. Vibrations of straight and curved composite beams: A review. **Composite Structures**, Oxford, v. 100, p. 218–232, 2013. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.compstruct.2013.01.001> Acesso em: 10 jun. 2020.

HERRMANN, J. *et al.* Fatigue and fracture mechanical behaviour of a wind turbine rotor shaft made of cast iron and forged steel. **Procedia Structural Integrity**, Oxford, v. 2, p. 2951–2958, 2016. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.prostr.2016.06.369> Acesso em: 09 jun. 2020.

HUJARE, D. P.; KARNIK, M. G. Vibration responses of parallel misalignment in Al shaft rotor bearing system with rigid coupling. **Materials Today: Proceedings**, Oxford, v. 5, n. 11, p. 23863–23871, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2018.10.178> Acesso em: 10 jun. 2020.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 1925**: balancing vocabulary. Genebra: ISO, 2001.

KAR, B. C. *et al.* Research trends in high speed milling of metal alloys: a short review. **Materials Today: Proceedings**, Oxford, v. 26, n. 2, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.02.559> Acesso em: 03 fev. 2021.

KAW, A. K. **Mechanics of composite materials**. 2. ed. Boca Raton: Taylor & Francis Group, 2006. 490 p.

KONO, D. *et al.* A machine tool motorized spindle with hybrid structure of steel and carbon fiber composite. **CIRP Annals**, Paris, v. 68, n. 1, p. 389–392, 2019. CIRP. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2019.04.022> Acesso em: 10 jun. 2020.

KUO, C. *et al.* The effects of cutting conditions and tool geometry on mechanics, tool wear and machined surface integrity when routing CFRP composites. **Journal of Manufacturing Processes**, Dearborn, v. 64, p. 113–129, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2021.01.011> Acesso em: 04 mar. 2021.

LAHRIRI, S. *et al.* Rotor-stator contact dynamics using a non-ideal drive: theoretical and experimental aspects. **Journal of Sound and Vibration**, London, v. 331, n. 20, p. 4518–4536, 2012. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jsv.2012.05.008> Acesso em: 10 jun. 2020.

LALLANE, M.; FERRARIS, G. **Rotordynamics prediction in engineering**. 2 ed. John Chichester: Wiley & Sons, 1997. 266 p.

LEE, D. G. *et al.* Design and manufacture of an automotive hybrid aluminum/composite drive shaft. **Composite Structures**, Oxford, v. 63, n. 1, p. 87–99, 2004.

LEE, D. G.; SIN, H. C.; SUH, N. P. Manufacturing of a graphite epoxy composite spindle for a machine tool. **CIRP Annals: Manufacturing Technology**, Paris, v. 34, n. 1, p. 365–369, 1985.

LIPIAN, M. *et al.* Small wind turbine augmentation: experimental investigations of shrouded- and twin-rotor wind turbine systems. **Energy**, Oxford, v. 186, p. 115855, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.115855> Acesso em: 09 jun. 2020.

LIU, Y. *et al.* A novel fault diagnosis method for rotor rub-impact based on nonlinear output frequency response functions and stochastic resonance. **Journal of Sound and Vibration**, London, v. 481, p. 1–17, 2020.

LIZZUL, L. *et al.* Influence of additive manufacturing-induced anisotropy on tool wear in end milling of Ti6Al4V. **Tribology International**, Oxford, v. 146, p. 106200, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2020.106200> Acesso em: 03 fev. 2021.

MAZZEI, A. J.; SCOTT, R. A. Effects of internal viscous damping on the stability of a rotating shaft driven through a universal joint. **Journal of Sound and Vibration**, London, v. 265, n. 4, p. 863–885, 2003.

MEDEIROS, E. C. **Análise dinâmica de um rotor: modelagem analítica, elementos finitos e avaliação experimental**. 2016. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Mecânica – Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2016.

MENDONÇA, W. R. D. P. *et al.* The dynamic analysis of rotors mounted on composite shafts with internal damping. **Composite Structures**, Oxford, v. 167, p. 50–62, 2017.

MONGE, J. C.; MANTARI, J. L. Exact solution of thermo-mechanical analysis of laminated composite and sandwich doubly-curved shell. **Composite Structures**, Oxford, v. 245, p. 112323, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2020.112323> Acesso em: 10 jun. 2020.

MUSZYNSKA, A. **Rotordynamics**. New York: Taylor & Francis Group, 2005. 1085 p.

MORADI, H. *et al.* Vibration absorber design to suppress regenerative chatter in nonlinear milling process: application for machining of cantilever plates. **Applied Mathematical Modelling**, New York, v. 39, n. 2, p. 600–620, 2015. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.apm.2014.06.010> Acesso em: 09 jun. 2020.

NADEEM, S. K. S.; GIRIDHARA, G.; RANGAVITTAL, H. K. A Review on the design and analysis of composite drive shaft. **Materials Today: Proceedings**, Oxford, v. 5, n. 1, p. 2738–2741, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2018.01.058> Acesso em: 09 jun. 2020.

NEMBHARD, A. D.; SINHA, J. K.; YUNUSA-KALTUNGO, A. Experimental observations in the shaft orbits of relatively flexible machines with different rotor related faults. **Measurement: Journal of the International Measurement Confederation**, London, v. 75, p. 320–337, 2015. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.measurement.2015.08.007> Acesso em: 10 jun. 2020.

LEVY NETO, F.; PARDINI, L. C. **Compósitos estruturais: ciência e tecnologia**. São Paulo: Blucher, 2006. 419 p.

ORŠULOVÁ, T. *et al.* Changes in internal damping of selected types of austenitic stainless steels. **Transportation Research Procedia**, Oxford, v. 40, p. 68–73, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2019.07.012> Acesso em: 10 jun. 2020.

PARMAR., V.; SARAN, V. H.; HARSHA, S. P. Effect of an unbalanced rotor on dynamic characteristics of double-row self-aligning ball bearing. **European Journal of Mechanics, A/Solids**, Amsterdam, v. 82, p. 104006, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.euromechsol.2020.104006> Acesso em: 10 jun. 2020.

PENNACCHI, P.; BACHSCHMID, N.; TANZI, E. Light and short arc rubs in rotating machines: Experimental tests and modelling. **Mechanical Systems and Signal Processing**, Oxford, v. 23, n. 7, p. 2205–2227, 2009. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ymssp.2009.03.008> Acesso em: 08 jun. 2020.

POWELL, J.; GREEN, S. The challenges of bonding composite materials and some innovative solutions. **Reinforced Plastics**, Oxford, v. 65, n. 1, p. 36-39, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.repl.2020.04.076> Acesso em: 02 jan. 2021.

QUAN, D. *et al.* The enhancement of adhesively-bonded aerospace-grade composite joints using steel fibres. **Composite Structures**, Oxford, v. 198, n. April, p. 11–18, 2018.

RANDALL, R. B. **Vibration-based condition monitoring**: industrial, aerospace and automotive applications. Chichester: John Wiley & Sons, 2010. 289 p.

RAJENDRAN, A.; PAUL, B.; SHUNMUGESH, K. Optimization of milling parameters in jute fiber reinforced epoxy composite using GRA. **Materials Today: Proceedings**, Oxford, v. 43, n. 6, p. 3951-3955, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.02.663> Acesso em: 02 jan. 2021.

RANSOM, T.; HONEYCUTT, A.; SCHMITZ, T. A new tunable dynamics platform for milling experiments. **Precision Engineering**, Guildford, v. 44, p. 252–256, 2016. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.precisioneng.2016.01.005> Acesso em: 10 jun. 2020.

RAO, D.; XU, Z. Damping behavior of 304L stainless steel after fatigue loading. **Theoretical and Applied Fracture Mechanics**, Amsterdam, v. 100, n. January, p. 110–113, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.tafmec.2019.01.006> Acesso em: 10 jun. 2020.

RAO, J. S. **Rotordynamics**. 3 ed. Boston: Addison-Wesley, 1996. 435 p.

RAUERT, T. *et al.* Fretting fatigue induced surface cracks under shrink fitted main bearings in wind turbine rotor shafts. **Procedia Structural Integrity**, Oxford, v. 2, p. 3601–3609, 2016. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.prostr.2016.06.449> Acesso em: 09 jun. 2020.

RI, K. *et al.* The effects of coupling mechanisms on the dynamic analysis of composite shaft. **Composite Structures**, Oxford, v. 224, p. 111040, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2019.111040> Acesso em: 09 jun. 2020.

ROY, D. K.; TIWARI, R. Estimation of the internal and external damping from the forward and backward spectrum of a rotor with a fatigue crack. **Propulsion and Power Research**, Amsterdam, v. 9, n. 1, p. 62–74, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jprr.2020.01.001> Acesso em: 02 jan. 2021.

SCHEFFER, C., GIRDHAR, P. **Practical machinery vibration analysis and predictive maintenance**. Oxford: Elsevier, 2004. 264 p.

SAHOO, S. K. *et al.* A novel NDE approach towards evaluating adhesive bonded interfaces. **Materials Today: Proceedings**, Oxford, v. 26, p. 1191–1197, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.02.240> Acesso em: 10 jun. 2020.

SCHMITZ, T. Modal interactions for spindle, holders, and tools. **Procedia Manufacturing**, Amsterdam, v. 48, p. 457–465, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2020.05.069> Acesso em: 04 jan. 2021.

SHNEOR, Y. Reconfigurable machine tool: CNC machine for milling, grinding and polishing. **Procedia Manufacturing**, Amsterdam, v. 21, n. 2017, p. 221–227, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2018.02.114> Acesso em: 10 jun. 2020.

SHRIVASTAVA, A.; MOHANTY, A. R. Identification of unbalance in a rotor system using a joint input-state estimation technique. **Journal of Sound and Vibration**, London, v. 442, p. 414–427, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jsv.2018.11.019> Acesso em: 09 jun. 2020.

SIDDHPURA, M.; PAUROBALLY, R. A review of chatter vibration research in turning. **International Journal of Machine Tools and Manufacture**, Oxford, v. 61, p. 27–47, 2012. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2012.05.007> Acesso em: 10 jun. 2020.

SINGH, S. P.; GUPTA, K. Composite shaft rotordynamic analysis using a layerwise theory. **Journal of Sound and Vibration**, London, v. 191, n. 5, p. 739–756, 1996.

TARIQ, M. *et al.* Effect of hybrid reinforcement on the performance of filament wound hollow shaft. **Composite Structures**, Oxford, v. 184, p. 378–387, 2018. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.compstruct.2017.09.098> Acesso em: 08 jun. 2020.

THURNHERR, C. *et al.* Higher-order beam model for stress predictions in curved beams made from anisotropic materials. **International Journal of Solids and Structures**, Oxford, v. 97_98, p. 16–28, 2016. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijsolstr.2016.08.004> Acesso em: 09 jun. 2020.

TONKS, O.; WANG, Q. The detection of wind turbine shaft misalignment using temperature monitoring. **CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology**, Oxford, v. 17, p. 71–79, 2017. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.cirpj.2016.05.001> Acesso em: 10 jun. 2020.

TORKHANI, M.; MAY, L.; VOINIS, P. Light, medium and heavy partial rubs during speed transients of rotating machines: numerical simulation and experimental observation. **Mechanical Systems and Signal Processing**, Oxford, v. 29, p. 45–66, 2012. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ymssp.2012.01.019> Acesso em: 10 jun. 2020.

TSAI, S. **Composites Design**. 4 ed. France: Think Composites, 1988, 500 p.

TUCKMANTEL, F. W. DA S.; CAVALCA, K. L. Vibration signatures of a rotor-coupling-bearing system under angular misalignment. **Mechanism and Machine Theory**, Elmsford, v. 133, p. 559–583, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.mechmachtheory.2018.12.014> Acesso em: 10 jun. 2020.

ULUTAN, D. True variable-depth milling. **Procedia Manufacturing**, Amsterdam, v. 48, p. 593–597, 2020.

URBIKAIN PELAYO, G.; OLVERA TREJO, D. Model-based phase shift optimization of serrated end mills: Minimizing forces and surface location error. **Mechanical Systems and Signal Processing**, Oxford, v. 144, p. 106860, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2020.106860> Acesso em: 03 fev. 2021

VERVISCH, B. *et al.* On the experimental prediction of the stability threshold speed caused by rotating damping. **Journal of Sound and Vibration**, London, v. 375, p. 63–75, 2016.

WANG, F. C.; LEE, C. H.; ZHENG, R. Q. Benefits of the inerter in vibration suppression of a milling machine. **Journal of the Franklin Institute**, Elmsford, v. 356, n. 14, p. 7689–7703, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jfranklin.2019.02.002> Acesso em: 08 jun. 2020.

WANG, X.; LAM, C. C.; IU, V. P. Bond behaviour of steel-TRM composites for strengthening masonry elements: Experimental testing and numerical modelling. **Construction and Building Materials**, Guildford, v. 253, p. 119157, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.119157> Acesso em: 02 jan. 2021.

WOLTER, N. *et al.* Adhesively- and hybrid- bonded joining of basalt and carbon fibre reinforced polybenzoxazine-based composites. **Composite Structures**, Oxford, v. 236, p. 111800, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2019.111800> Acesso em: 03 fev. 2021.

XIA, Y. *et al.* Development of a toolholder with high dynamic stiffness for mitigating chatter and improving machining efficiency in face milling. **Mechanical Systems and Signal Processing**, Oxford, v. 145, p. 106928, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2020.106928> Acesso em: 02 jan. 2021.

YADAV, M. *et al.* Design and analysis of a high-pressure turbine blade in a jet engine using advanced materials. **Materials Today: Proceedings**, Oxford, v. 25, n. 4, p. 639-645, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2019.07.530> Acesso em: 10 jun. 2020.

YANG, M. *et al.* Dynamic analysis and vibration testing of CFRP drive-line system used in heavy-duty machine tool. **Results in Physics**, Amsterdam, v. 8, p. 1110–1118, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.rinp.2018.01.067> Acesso em: 10 jun. 2020.

YANG, Y. *et al.* Experimental study on noise reduction of a wavy multi-copter rotor. **Applied Acoustics**, Amsterdam, v. 165, p. 107311, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2020.107311> Acesso em: 02 jan. 2021.

YANG, Y. *et al.* Nonlinear vibration mitigation of a rotor-casing system subjected to imbalance–looseness–rub coupled fault. **International Journal of Non-Linear Mechanics**, Oxford, v. 122, n. September 2019, p. 103467, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ijnonlinmec.2020.103467> Acesso em: 10 jun. 2020.

YANG, Y. *et al.* Vibration analysis of a dual-rotor-bearing-double casing system with pedestal looseness and multi-stage turbine blade-casing rub. **Mechanical Systems and Signal Processing**, Oxford, v. 143, p. 106845, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2020.106845> Acesso em: 02 jan. 2021.

YASIN, M. Y.; KHALID, H. M.; BEG, M. S. Exact solution considering layerwise mechanics for laminated composite and sandwich curved beams of deep curvatures. **Composite Structures**, Oxford, v. 244, p. 112258, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2020.112258> Acesso em: 03 mar. 2021.

ZHANG, H. *et al.* Numerical analysis of hybrid (bonded/bolted) FRP composite joints: a review. **Composite Structures**, Oxford, v. 262, n. January, p. 113606, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2021.113606> Acesso em: 03 mar. 2021.

ZHANG, W. *et al.* Shear resistance behavior of partially composite Steel-Concrete-Steel sandwich beams considering bond-slip effect. **Engineering Structures**, Oxford, v. 210, n. November 2019, p. 110394, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2020.110394> Acesso em: 10 jun. 2020.

ZHAO, D. *et al.* New types of steel-FRP composite bar with round steel bar inner core: mechanical properties and bonding performances in concrete. **Construction and Building Materials**, Guildford, v. 242, p. 118062, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.118062> Acesso em: 10 jun. 2020.

ANEXO I

LOCTITE®

Technical Data Sheet

LOCTITE® HY 4090™

July 2017

PRODUCT DESCRIPTION

LOCTITE® HY 4090™ provides the following product characteristics:

Technology	Cyanoacrylate / Epoxy Hybrid
Chemical Type (Part A)	Cyanoacrylate
Chemical Type (Part B)	Epoxy
Appearance (Comp. A)	Transparent colorless to straw colored liquid ¹
Appearance (Comp. B)	Off-white to light yellow gel ¹
Appearance (Mixture)	Off-white to light yellow gel
Components	Two components - requires mixing
Mix Ratio, by volume - Part A: Part B	1 : 1
Viscosity	High
Cure	Room temperature cure after mixing
Application	Bonding

LOCTITE® HY 4090™ is a two component, general purpose adhesive which provides a very fast fixture at room temperature. It is designed to bond a variety of substrates including metals, most plastics and rubbers. LOCTITE® HY 4090™ provides good temperature and moisture resistance which also makes it suitable for applications in high temperature/humidity environments. The thixotropic nature makes it suitable for applications where good gap filling properties on rough and poorly fitting surfaces are required.

TYPICAL PROPERTIES OF UNCURED MATERIAL**Part A:**

Specific Gravity, g/cm³ 1.01
 Viscosity, Cone & Plate, mPa.s (cP):
 Temperature: 25 °C 4,000 to 7,000¹
 Flash Point - See SDS

Part B:

Specific Gravity, g/cm³ 1.06
 Viscosity, Cone & Plate, mPa.s (cP):
 Temperature: 25 °C 25,000 to 40,000¹
 Flash Point - See SDS

TYPICAL CURING PERFORMANCE

Curing is initiated on mixing the Part A and Part B components. Handling strength is achieved rapidly; full strength is achieved over time.

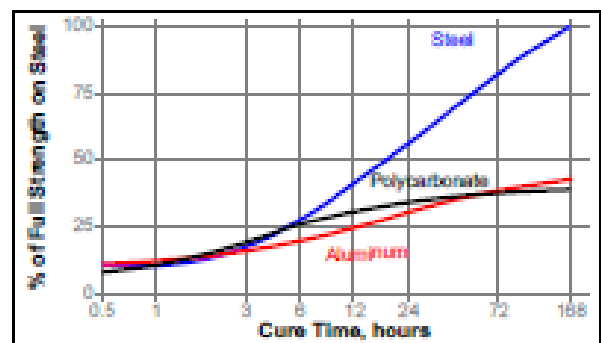
Fixture Time

Fixture time is defined as the time to develop a shear strength of 0.1 N/mm².

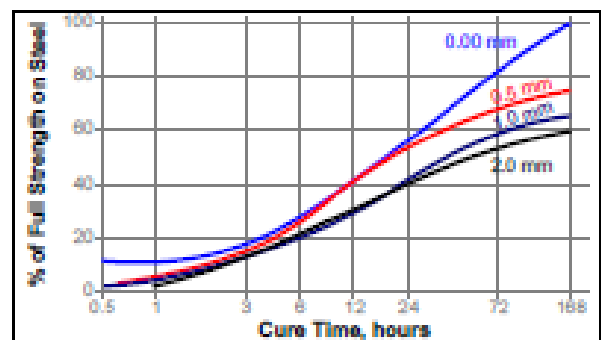
Fixture Time @ 25°C, seconds <180¹

Cure Speed vs. Substrate

The rate of cure will depend on the substrate used. The graph below shows the shear strength developed with time on steel lap shears compared to different materials and tested according to ISO 4587.

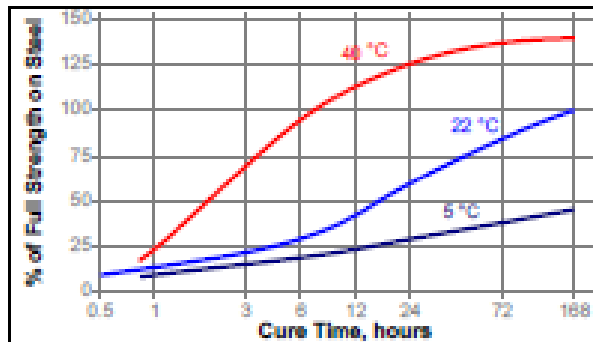
**Cure Speed vs. Bond Gap**

The rate of cure will depend on the bondline gap. The following graph shows the shear strength developed with time on grit blasted mild steel lap shears at different controlled gaps and tested according to ISO 4587.

**Cure Speed vs. Temperature**

The rate of cure will depend on the ambient temperature. The graph below shows the shear strength developed with time at different temperatures on grit blasted mild steel lap shears and tested according to ISO 4587.





TYPICAL PROPERTIES OF CURED MATERIAL

Cured for 1 week @ 22 °C

Physical Properties:

Glass Transition Temperature, ISO 11359-2, °C 88

Coefficient of Thermal Expansion, ISO 11359-2 K⁻¹:

Below T_g (88°C) 71×10⁻⁶

Above T_g (88°C) 175×10⁻⁶

Shore Hardness, ISO 868, Durometer D 65 to 69

Tensile Strength, at break, ISO 527-3 N/mm² 7.1
(psi) (1,025)

Tensile Modulus, ISO 527-3 N/mm² 565
(psi) (81,800)

Elongation, at break, ISO 527-3, % 3.6

TYPICAL PERFORMANCE OF CURED MATERIAL

Adhesive Properties

Cured for 168 hours @ 22 °C

Shear Strength, Lap Shear Strength, ISO 4587:

Steel (grit blasted)	N/mm ² 17 (psi) (2,420)
Aluminum	N/mm ² 7.6 (psi) (1,100)
Aluminum (etched)	N/mm ² 13 (psi) (1,900)
Zinc dichromate	N/mm ² 9.1 (psi) (1,320)
Stainless steel	N/mm ² 15 (psi) (2,120)
ABS	N/mm ² 5.2 (psi) (750)
Phenolic	N/mm ² 3.2 (psi) (460)
Polycarbonate	N/mm ² 6.9 (psi) (1,000)
Nitrile	N/mm ² 0.7 (psi) (100)
Wood (Oak)	N/mm ² 4.8 (psi) (700)
Epoxy	N/mm ² 9.1 (psi) (1,320)
Polyethylene	N/mm ² 0.5 (psi) (72)
Polypropylene	N/mm ² 0.6 (psi) (87)

TYPICAL ENVIRONMENTAL RESISTANCE

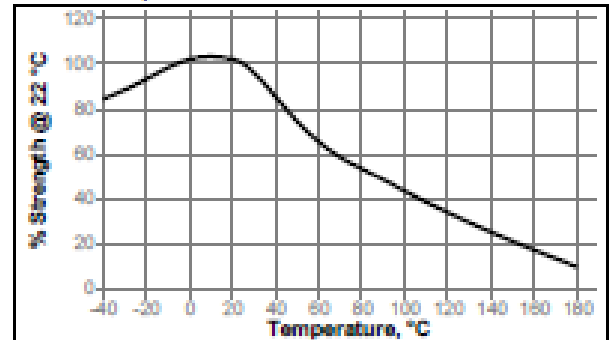
Cured for 1 week @ 22 °C

Lap Shear Strength, ISO 4587:

Steel (grit blasted)

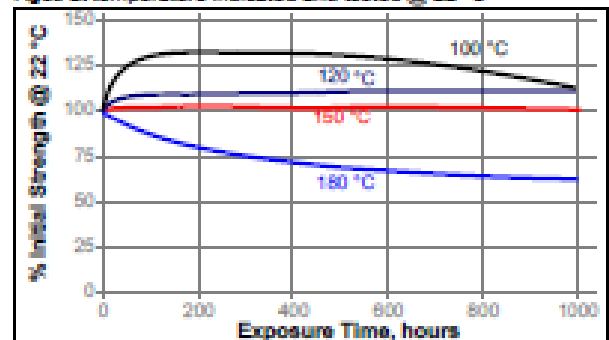
Hot Strength

Tested at temperature



Heat Aging

Aged at temperature indicated and tested @ 22 °C



Chemical/Solvent Resistance

Aged under conditions indicated and tested @ 22 °C.

Environment	°C	% of initial strength		
		100 h	500 h	1000 h
Water	22	90	75	70
Water	60	80	55	55
Motor oil	40	120	130	130
Unleaded gasoline	22	95	100	105
Ethanol	22	85	90	90
Isopropanol	22	100	100	95
Water/glycol 50/50	87	50	5	5
98% RH	40	85	70	70
95% RH	65	95	85	85

Lap Shear Strength, ISO 4587:

Polycarbonate

Environment	°C	% of initial strength		
		100 h	500 h	1000 h
98% RH	40	100	90	80

Lap Shear Strength, ISO 4587:
Aluminum

Environment	°C	% of initial strength		
		100 h	300 h	500 h
95% RH	65	100	95	85

GENERAL INFORMATION

This product is not recommended for use in pure oxygen and/or oxygen rich systems and should not be selected as a sealant for chlorine or other strong oxidizing materials.

For safe handling information on this product, consult the Safety Data Sheet (SDS).

Where aqueous washing systems are used to clean the surfaces before bonding, it is important to check for compatibility of the washing solution with the adhesive. In some cases these aqueous washes can affect the cure and performance of the adhesive.

Directions for use:

- Bond areas should be clean and free from grease. Clean all surfaces with a Loctite® cleaning solvent and allow to dry.
- To use, Part A and Part B must be blended. Product can be applied directly from dual cartridge by dispensing through the mixer head supplied.
- 60g Dual Cartridge:** Stand dual cartridge upright for 1 minute. Keeping the cartridge in an upright position, insert it into the application gun, remove cap and expel a small amount of adhesive to be sure both sides are flowing evenly and freely. Attach the mixing nozzle.
- 400g Dual Cartridge:** Stand dual cartridge upright for 1 minute. Remove the cartridge cap and locking ring, attach the mixing nozzle and secure with the locking ring. Load cartridge into the application gun so that the yellow label on cartridge is visible above the nozzle. Holding the application gun at a 45° angle, with the nozzle tip pointing upwards, begin dispensing the adhesive until the product reaches the nozzle tip.

NOTE: A pneumatic application gun is required to apply the product from the 400g dual cartridge at a maximum dispense pressure of 2 bar.

- Dispense and discard a bead as long and as wide as the mixing nozzle, to ensure sufficient mixing.
- Apply the mixed adhesive to one of the bond surfaces to be joined. Parts should be assembled immediately after the mixed adhesive has been applied.
- Bonds should be held fixed or clamped until adhesive has fixtured.
- Keep assembled parts from moving during cure. The bond should be allowed to develop full strength before subjecting to any service load.

Loctite Material Specification™

LMS dated May 27, 2013 (Part A) and LMS dated June 10, 2013 (Part B). Test reports for each batch are available for the indicated properties. LMS test reports include selected GC test parameters considered appropriate to specifications for customer use. Additionally, comprehensive controls are in place to assure product quality and consistency. Special customer specification requirements may be coordinated through Henkel Loctite Quality.

Storage

Store product in the unopened container in a dry location. Storage information may be indicated on the product container labeling.

Optimal Storage: 2°C to 21°C. Storage below 2°C or greater than 21°C can adversely affect product properties. Material removed from containers may be contaminated during use. Do not return product to the original container. Henkel Corporation cannot assume responsibility for product which has been contaminated or stored under conditions other than those previously indicated. If additional information is required, please contact your local Technical Service Center or Customer Service Representative.

Conversions

(°C x 1.8) + 32 = °F
kV/mm x 25.4 = V/mil
mm / 25.4 = inches
µm / 25.4 = mil
N x 0.225 = lb
N/mm x 5.71 = lb/in
N/mm² x 145 = psi
MPa x 145 = psi
N-m x 8.851 = lb-in
N-m x 0.738 = lb-ft
N-mm x 0.142 = oz-in
MPa-s = cP

Note:

The information provided in this Technical Data Sheet (TDS) including the recommendations for use and application of the product are based on our knowledge and experience of the product as at the date of this TDS. The product can have a variety of different applications as well as differing application and working conditions in your environment that are beyond our control. Henkel is, therefore, not liable for the suitability of our product for the production processes and conditions in respect of which you use them, as well as the intended applications and results. We strongly recommend that you carry out your own prior trials to confirm such suitability of our product. Any liability in respect of the information in the Technical Data Sheet or any other written or oral recommendation(s) regarding the concerned product is excluded, except if otherwise explicitly agreed and except in relation to death or personal injury caused by our negligence and any liability under any applicable mandatory product liability law.

In case products are delivered by Henkel Belgium NV, Henkel Electronic Materials NV, Henkel Nederland BV, Henkel Technologies France SAS and Henkel France SA please additionally note the following:
In case Henkel would be nevertheless held liable, on whatever legal ground, Henkel's liability will in no event exceed the amount of the concerned delivery.

In case products are delivered by Henkel Colombiana, S.A.S. the following disclaimer is applicable:

The information provided in this Technical Data Sheet (TDS) including the recommendations for use and application of the product are based on our knowledge and experience of the product as at the date of this TDS. Henkel is, therefore, not liable for the suitability of our product for the production processes and conditions in respect of which you use them, as well as the intended

Henkel Americas
+860.571.5100

Henkel Europe
+49.89.320800.1800

Henkel Asia Pacific
+85.21.2891.8859

For the most direct access to local sales and technical support visit: www.henkel.com/industrial

applications and results. We strongly recommend that you carry out your own prior trials to confirm such suitability of our product.

Any liability in respect of the information in the Technical Data Sheet or any other written or oral recommendation(s) regarding the concerned product is excluded, except if otherwise explicitly agreed and except in relation to death or personal injury caused by our negligence and any liability under any applicable mandatory product liability law.

In case products are delivered by Henkel Corporation, Resin Technology Group, Inc., or Henkel Canada Corporation, the following disclaimer is applicable:

The data contained herein are furnished for information only and are believed to be reliable. We cannot assume responsibility for the results obtained by others over whose methods we have no control. It is the user's responsibility to determine suitability for the user's purpose of any production methods mentioned herein and to adopt such precautions as may be advisable for the protection of property and of persons against any hazards that may be involved in the handling and use thereof. In light of the foregoing, Henkel Corporation specifically disclaims all warranties expressed or implied, including warranties of merchantability or fitness for a particular purpose, arising from sale or use of Henkel Corporation's products. Henkel Corporation specifically disclaims any liability for consequential or incidental damages of any kind, including lost profits. The discussion herein of various processes or compositions is not to be interpreted as representation that they are free from domination of patents owned by others or as a license under any Henkel Corporation patents that may cover such processes or compositions. We recommend that each prospective user test his proposed application before repetitive use, using this data as a guide. This product may be covered by one or more United States or foreign patents or patent applications.

Trademark usage: [Except as otherwise noted] All trademarks in this document are trademarks and/or registered trademarks of Henkel and its affiliates in the U.S. and elsewhere.

Reference **N/A**