UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO

EXTRAÇÃO E ANÁLISE DE CARACTERÍSTICAS VIBRATÓRIAS PARA O DIAGNÓSTICO DE QUALIDADE NA SOLDAGEM CDFW

DANIEL SOARES DE ALCANTARA

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO

DANIEL SOARES DE ALCANTARA

EXTRAÇÃO E ANÁLISE DE CARACTERÍSTICAS VIBRATÓRIAS PARA O DIAGNÓSTICO DE QUALIDADE NA SOLDAGEM CDFW

Tese submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção como parte dos requisitos para obtenção do Título de **Doutor em Ciências em Engenharia de Produção**.

Área de Concentração: Engenharia de Produção

Orientador: Prof. Dr. Pedro Paulo Balestrassi

Setembro de 2024

Itajubá – MG

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus por guiar meus passos até aqui e pelo dom da vida, dando a ela sentido e propósito.

A realização de um doutorado é uma jornada desafiadora que envolve a colaboração de diversas pessoas. Durante este período, fui abençoado com o apoio direto e indireto de muitos indivíduos, e expresso meus sinceros agradecimentos a todos que, de alguma forma, contribuíram para a concretização deste trabalho.

Quero estender minha gratidão aos respeitados professores do programa de doutorado da Engenharia de Produção da UNIFEI, em especial ao Prof. Dr. Pedro Paulo Balestrassi, pela orientação dedicada, paciência e valiosos insights que foram fundamentais para o desenvolvimento desta pesquisa.

Agradeço a todos os colegas do CEFET-MG que compartilharam seus conhecimentos, experiências e apoio ao longo deste percurso acadêmico. Este trabalho não teria sido possível sem a colaboração e orientação generosa daqueles que estiveram ao meu lado. Que esses agradecimentos expressem a profundidade da minha gratidão a cada um de vocês.

EPÍGRAFE

"Na busca pela excelência, cada solda é uma expressão da precisão e do compromisso, onde a fusão de conhecimento e habilidade molda não apenas o metal, mas também o caminho para a inovação e qualidade"

Autor desconhecido.

RESUMO

Atualmente, diversas técnicas de soldagem unem materiais metálicos, destacando-se as de estado sólido, como a soldagem por fricção rotativa (Rotary Friction Welding - RFW). Esse método gera calor e deformação plástica pela rotação de peças sob compressão, criando uma ligação em temperaturas inferiores ao ponto de fusão, resultando em menores distorções e tensões residuais. Entre as variantes do RFW, destacam-se o Inertia Friction Welding (IFW) e o Continuous Drive Friction Welding (CDFW), que se diferenciam pelo modo de geração de energia. Embora o CDFW seja um processo comprovado, apresenta desafios como aquecimento desigual e baixa difusão de materiais na zona afetada pelo calor (HAZ), impactando a rugosidade e o coeficiente de atrito. Os métodos tradicionais de controle de qualidade do RFW utilizam ensaios destrutivos, que não permitem testes em tempo real. Como alternativa, o monitoramento dos sinais de vibração durante o processo oferece informações sobre as deformações e fenômenos térmicos e metalúrgicos ocorridos. Apesar de estudos já terem explorado o uso de sinais de vibração para diagnóstico de qualidade, ainda não há uma abordagem específica aplicada ao controle de qualidade no CDFW. Este trabalho visa preencher essa lacuna ao utilizar sinais de vibração para monitorar a qualidade do CDFW em peças cilíndricas de aço carbono A36. Para isso, foi adotado o Design of Experiments (DOE), com experimentos baseados em uma matriz fatorial. Os sinais de vibração, adquiridos por um acelerômetro, foram normalizados e filtrados, e posteriormente analisados por meio da transformada rápida de Fourier (FFT) e da transformada de Fourier de curto prazo (STFT). Essas técnicas permitiram identificar as características tempo-frequência-energia dos sinais. Além disso, foi proposto um método de segmentação e decomposição dos sinais brutos utilizando a decomposição do modo empírico (EMD), com análise estatística das funções de modo intrínseco (IMFs) resultantes. A Análise de Variância (ANOVA) de dois fatores correlacionou os dados dos sinais com parâmetros de qualidade do processo, como simetria do flash, encurtamento axial, largura da zona termomecanicamente afetada (TMAZ) e o diâmetro médio dos grãos da TMAZ. Os resultados confirmaram que as mudanças nos parâmetros processo afetam significativamente os sinais de vibração, permitindo sua utilização para caracterizar a qualidade da solda. Essa abordagem inovadora não apenas possibilita uma verificação rápida da qualidade, mas também contribui para a automação e monitoramento avançado da Indústria 4.0.

Palavras chave: Soldagem por Fricção com Movimento Contínuo, Análise de Sinais de Vibração, Controle de Qualidade, Decomposição de Modo Empírico, Características Tempo Frequência.

ABSTRACT

Currently, several welding techniques join metallic materials, with solid-state welding, such as Rotary Friction Welding (RFW), standing out. This method generates heat and plastic deformation through the rotation of parts under compression, creating a bond at temperatures below the melting point, resulting in reduced distortions and residual stresses. Among the RFW variants, Inertia Friction Welding (IFW) and Continuous Drive Friction Welding (CDFW) stand out, differing in the method of generating frictional energy. Although CDFW is a proven process, it presents challenges such as uneven heating and low material diffusion in the heat-affected zone (HAZ), affecting roughness and the coefficient of friction. Traditional RFW quality control methods use destructive testing, which does not allow for real-time testing. As an alternative, monitoring vibration signals during the process provides information about the thermal, metallurgical, and deformation phenomena occurring. Although studies have already explored the use of vibration signals for quality diagnostics, there is still no specific approach applied to quality control in CDFW. This work aims to fill this gap by using vibration signals to monitor the quality of CDFW in cylindrical A36 carbon steel parts. For this, the Design of Experiments (DOE) was adopted, with experiments based on a factorial matrix. The vibration signals, acquired by an accelerometer, were normalized and filtered, and later analyzed using the Fast Fourier Transform (FFT) and Short-Time Fourier Transform (STFT). These techniques allowed the identification of the time-frequency-energy characteristics of the signals. In addition, a method of segmentation and decomposition of raw signals was proposed using Empirical Mode Decomposition (EMD), with statistical analysis of the resulting intrinsic mode functions (IMFs). A two-factor Analysis of Variance (ANOVA) correlated the signal data with process quality parameters, such as flash symmetry, axial shortening, thermomechanically affected zone (TMAZ) width, and the average grain diameter of the TMAZ. The results confirmed that changes in process parameters significantly affect vibration signals, allowing their use to characterize weld quality. This innovative approach not only enables rapid quality verification but also contributes to automation and advanced monitoring in Industry 4.0.

Keywords: Continuous Drive Friction Welding, Vibration Signal Analysis, Quality Control; Empirical Mode Decomposition, Time Frequency Characteristics

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 - Marcos históricos do processo FW	14
Figura 2.2 - Variação esquemática dos parâmetros de pressão, velocidade de rotação e burn off	16
Figura 2.3 - Visão externa do corpo de prova sodado por CDFW	17
Figura 2.4 - Estágios do processo CDFW e variação esquemática dos parâmetros	18
Figura 2.5 - Parâmetros mais estudados em FW	24
Figura 2.6 - Propriedades do processo mais analisadas	25
Figura 2.7 - Diagrama esquemático das zonas de reação no componente soldado por CDFW	27
Figura 2.8 - Microestrutura da junta CDFW de metal ASTM A36	28
Figura 2.9 - Ilustração esquemática da distribuição de temperatura soldagem CDFW	31
Figura 2.10 - Ferramentas científicas utilizadas no estudo de transferência de calor	32
Figura 2.11 - Aparência da junta de soldagem	34
Figura 2.12 - Defeito devido ao calor a devido insuficiente de calor	35
Figura 2.13 - Macroestruturas das juntas soldadas em várias velocidades de rotação	37
Figura 2.14 - Configuração experimental para soldagem CDFW	38
Figura 2.15 - Equipamentos utilizados no processo CDFW	40
Figura 3.1 - Sinal de vibração CDFW	50
Figura 3.2 - Sinal de tempo sobreposto da vibração com e sem a carga de atrito CDFW	51
Figura 3.3 - Sinal de vibração CDFW do primeiro estágio dependente do tempo	52
Figura 4.1 - Sinal original temporal de vibração CDFW (a) sem filtro, (b) com filtro mediano	56
Figura 4.2 – Espectrograma STFT do sinal original CDFW	57
Figura 4.3 - Decomposição em modo empírico.	60
Figura 6.1 - Diagrama esquemático do equipamento utilizado no processo CDFW	69
Figura 6.2 - Ilustração do pré processamento dos sinais de vibração	76
Figura 6.3 – Árvore de decisão para recursos selecionados.	78
Figura 6.4 – Medição do burn-off e flash	79
Figura 6.5 – Caracterização micros e macroestruturas da junção CDFW	80
Figura 7.1 - Diagrama esquemático das velocidades lineares na superfície da peca	81

Figura 7.2 - Diagrama temporal e de espectro do sinal bruto de vibração no estágio completo	85
Figura 7.3 - Diagrama tempo–frequência do sinal bruto	89
Figura 7.4 - Diagrama tempo-frequência do sinal bruto da peça 4 (ampliado)	90
Figura 7.5 - Sinal temporal e diagrama tempo-frequência do estágio estacionário	93
Figura 7.6 - Figura 7.6 - Sinal decomposto pelo IMF	96
Figura 7.7 -Teste DF no sinal temporal original do 1º estágio	98
Figura 7.8 – (a) Valor médio do burn-off, (b) valor do flash no processo	102
Figura 7.9 – Gráfico de Pareto (a) burn-off, (b) energia, (c) variância	104
Figura 7.10 – Correlação entre (a) burn-off e En, (b) burn-off e var	104
Figura 7.11 – Efeitos principais de cada parâmetro sobre burn-off, energia e variância	106
Figura 7.12 – Gráfico de Pareto (a) flash, (b) valor de pico	107
Figura 7.13 – Correlação entre (a) flash e En, (b) flash e var, (c) flash e Pk	108
Figura 7.14 – Efeitos principais dos parâmetros no flash, energia, variância e pico	109
Figura 7.15 – (a) Valor médio TMAZ, (b) valor médio área de grão	110
Figura 7.16 – Gráfico de Pareto (a) macroestrutura, (b) microestrutura	111
Figura 7.17 – Efeitos principais dos parâmetros do processo na micro estrutura, macroestrutura	113

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 - Aplicação das várias técnicas FW	. 13
Tabela 2.2 - Influência dos parâmetros de entrada no processo	20
Tabela 2.3 - Influência dos parâmetros de entrada no processo	. 25
Tabela 4.1 - Recursos estatísticos no domínio do tempo	. 64
Tabela 5.1 - Recursos estatísticos no domínio da frequência	65
Tabela 6.1 - Composição química típica para o aço ASTM A-36	71
Tabela 6.2 - Parâmetros experimentais do processo CDFW	.72
Tabela 6.3 - Arranjo experimental do planejamento fatorial completo 2 ³ para o processo CDFW	.73
Tabela 7.1 – Matriz de correlação entre os recursos estatísticos da IMF1 de cada experimento	99
Tabela 7.2 - Recursos estatísticos classificados.	99
Tabela 7.3 - Classificação da significância dos recursos estatísticos com base na ANOVA	100
Tabela 8.1 - Matriz de confusão das análises dos sinais sintéticos	.114

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

A/D Analógico/digital

AISI American Iron and Steel Institute

AM Amplitude Modulada ANOVA Análise de variância

A-PFFSR Active Passive Filling Friction Stir Repairing
ASTM American Society for Testing and Materials

BM Metal base BOL Burn – off length

BPF Filtro passa-banda (BPF)

CDFW Continuous Drive Friction Welding CFD Dinâmica dos Fluidos Computacional

Cgf Centro de gravidade espectral
CIFW Current Inertia Friction Welding
CNC Controle Numérico Computadorizado
CSM Mecânica dos Sólidos Computacionais

Cv Coeficiente de variação D/A Digital/analógico

DAQ Sistema de aquisição de dados

DC Corrente continua DDFWDirect Drive Friction Welding

DFT Transformada de Discreta de Fourier

DOE Planejamento experimental

DZ Zona deformada DZ Zona deformada DZ Zona deformada

EMD Modo de Decomposição Empírica

En Energia Enp Entropia

EUA Estados unidos da américa

Fc Fator de crista

FCW Friction Crush Welding
FFSW Filling Friction Stir Welding
FFT Transformada rápida de Fourier
FHPP Friction Hydro Pilar Processing

Fi Fator de impulso FM Frequência Modulada

FPDZ Zona totalmente deformada e recristalizada

FS Friction Surfacing

FSBR Friction Stir Blind Riveting
FSBW Friction Stir Butt Welding
FSLW Friction Stir Lap Welding
FSP Processamento por Fricção
FSpW Friction Spot Welding
FSSW Friction Stir Spot Welding
FSVW Friction Stir Vibration Welding

FSW Friction Stir Welding

FTPW Friction Taper Plug Welding. FTSW Friction Taper Stud Welding

FW Friction Welding

FWTPET Friction Welding of Tube to Tube Plate

GA Algoritmo genético
HAZ Zona afetada pelo calor
HFW Hybrid Friction Welding
HHSA Análise espectral Holo-Hilbert
HHT Transformada de Hilbert-Huang

HNO₃ Ácido Nítrico HPF Filtro passa-alta

HT Transformada de Hilbert

HVD Decomposição de vibração de Hilbert

Hz Hertz

IFW Inertia Friction Welding IMF Funções de modo intrínseco

ISO Organização Internacional de Normalização

Kf Curtose espectral

Kv Curtose

LAFSW Laser Assisted Friction Stir Welding

LED Diodo emissor de luz LFP Filtro passa-baixa LFW Solda por fricção linear Mi Fator de margem

Mm Milímetro Mpa Maga Pascal

N Velocidade de rotaçãoNI National InstrumentsOFW Orbital Friction Welding

PAPR Relação potência/potência média PDZ Zona parcialmente deformada PDZ Zona parcialmente deformada PF Pressão de forjamento PF

PIC Peripherical Interface Controller

Pk Valor máximo PS Pressão de fricção

PSD Densidade espectral de potência

Pse Entropia espectral

PWM Modulação por Largura de Pulso

RF Radial Friction

RFSSW Refil Friction Stir Spot Welding. RFSW Resistance Friction Stir Welding

RFW Rotary Friction Welding RMS Raiz média quadrada RMS Raiz média quadrática

RMSf Raiz média quadrada espectral

RPM Rotação por minuto RZ Zona recristalizada

S Segundo Sf Fator de forma Sk Assimetria

SMAW Soldagem por Arco Metálico Blindado

SNR Relação sinal

SRFSW Self-Refilling Friction Stir Welding

SSFSW Stationary Shoulder Friction Stir Welding STFT Transformada de Fourier de curta duração STFT Transformada de Fourier de curto prazo

TDA Análise direta no tempo TF Tempo de forjamento

Ti Titânio

TMAZ Zona termomecanicamente afetada

TS Tempo de fricção TS TWI The Welding Institute

URSS União das Republicas Socialistas Soviéticas

UVeFSW Ultrasonic Vibration enhanced Friction Stir Welding

UWFSW Under Water Friction Stir Welding

UZ Zona não deformada

Var Variância

Vf Variância espectral

VMD Decomposição de modo variacional

WT Transformada de Wavelet

μ Valor médio
 μs Micro segundo
 σ Desvio padrão

SUMÁRIO

1. INTRODUÇAO	1
1.1. Considerações iniciais	1
1.2. Objetivos	7
1.3. Justificativa	7
1.4. Contribuições	7
1.5. Delimitações e oportunidades	8
2. REVISÃO DA LITERATURA	9
2.1. Revisão da história do processo FW	9
2.2. O Processo CDFW	15
2.2.1. Parâmetros CDFW	17
2.2.2. A microestrutura	26
2.2.3. A transferência de calor no processo CDFW	30
2.2.4. Os defeitos típicos	34
2.2.5. Equipamento CDFW	38
3. VIBRAÇÃO	42
3.1. Conceito e aplicação	42
3.2. Vibrações em CDFW	46
3.3. Sinais de vibração	49
4. TÉCNICAS DE PROCESSAMENTO DE SINAIS	53
4.1. Filtragem	55
4.2. Transformada de Fourier de curto prazo (STFT)	56
4.3. Decomposição de modo empírico	58
5. RECURSOS ESTATISTICOS	62
5.1. Extração de recursos estatísticos no domínio do tempo	
5.2. Extração de recursos estatísticos no domínio da frequência	65
6. MATERIAIS E MÉTODOS	67
6.1. Equipamento para soldagem CDFW	67
6.1.1 Estratégia de desenvolvimento do equipamento	67
6.1.2 Modificações na estrutura e controle eletrônico	67
6.1.3 Implementação do sistema de pressão	68
6.1.4 Coleta de dados e monitoramento	69
6.1.4.1. Microcontrolador e interface	69
6.1.4.1.1. Dispositivos de exibição	69
6.1.4.1.2. Dispositivo de entrada	70
6.1.4.1.3. Microcontrolador Arduino	70

6.1.4.1.4. Implementação do software	70
6.2. Materiais utilizados	71
6.2.1. Caracterização do material base	71
6.2.2. Preparação das amostras	71
6.3. Processo de soldagem	71
6. 3.1. Parâmetros (Variáveis de Entrada)	72
6.3.2. Procedimento de soldagem	74
6.4. Aquisição dos sinais	74
6.5. Preparação das amostras após a Soldagem	76
6.6. Extração de recursos estatísticos	77
6.7. Caracterização do burn-off e flash	79
6.8. Caracterização da macro e microestrutura	80
7. RESULTADOS E DISCUSSÃO	81
7. 1. Experimento inicial: Reconhecimento dos sinais de vibração em CDFW	81
7.2. Análise de Frequência do Sinal Bruto	82
7.3. Análise tempo-frequência do sinal bruto	86
7.5. Decomposição EMD	94
7.6. Seleção e extração de recursos estatísticos	96
7.6.1. Classificação de estacionariedade	97
7.6.2. Extração de recursos estatísticos no domínio do tempo e frequência	98
7.7 Caracterização dos parâmetros de entrada e fatores de qualidade	100
7.7.1 Caracterização do burn off e flash	101
7.7.2 Caracterização macro e micro estrutural	110
8. Validação dos resultados com sinal simulado	114
9. CONCLUSÃO	116
10. REFERÊNCIAS	118
APENDICE A	138
APENDICE B	144
APENDICE C	147
APENDICE D	153
APENDICE E	193
APENDICE F	211
APENDICE G	213
APENDICE H	215
APENDICE I	216
APENDICE J	220
APENDICE K	221

1. INTRODUÇÃO

1.1. Considerações iniciais

Atualmente, existem diversas técnicas que possibilitam a união de materiais metálicos utilizando a soldagem e, dentre os vários processos existentes, a soldagem por fricção, conhecida como *Friction Welding* (FW), tem sido objeto de uma quantidade considerável de publicações. Nos últimos anos, vários artigos foram publicados comprovando a eficiência do processo de *Friction Welding* (FW), uma tecnologia que vem obtendo destaque., uma vez que apresenta diversas vantagens em relação às técnicas convencionais de soldagem (ROVERE, CARLOS ALBERTO DELLA *et al.*, 2016) (LEE *et al.*, 2004a). De acordo com (XIONG *et al.*, 2013) o processo apresenta crescente interesse da indústria, por ser experimentalmente comprovado como rápido e confiável. Apesar do interesse mencionado a investigação nesse campo ainda encontra muitos desafios a serem superados para que o processo seja melhor explorado, principalmente em relação ao controle e a avaliação da qualidade.

Estudos conduzidos por (AKBARIMOUSAVI; GOHARIKIA, 2011) destacam a alta repetitividade e reprodutibilidade do processo de FW. (FAUZI et al., 2010) (BALASUBRAMANIAN, VIKRAM et al., 1999) apontam vantagens econômicas, como a redução dos custos de produção e o potencial para automação. Além disso, (SAHIN, MÜMIN, 2005) (MARTINSEN; HU; CARLSON, 2015), explicam que FW é capaz de unir materiais similares e dissimilares, sendo uma alternativa viável para substituir processos convencionais. O método é amplamente aceito em diversas indústrias, como a automobilística, sendo utilizado na fabricação de peças como eixos de direção e válvulas de motor (KALSI; SHARMA, 2011) (LEE et al., 2004b) A demanda por estruturas mais leves e resistentes também impulsionou o desenvolvimento desse processo (DELIJAICOV et al., 2017).

Dentre as variantes do FW, o *Rotary Friction Welding* (RFW) é a mais popular (LI, WENYA *et al.*, 2016). Existem duas principais variações do RFW: *Inertia Friction Welding* (IFW) e *Continuous Drive Friction Welding* (CDFW), que se distinguem pelo modo de geração de energia por atrito entre as superfícies a serem unidas (SCHMICKER; NAUMENKO; STRACKELJAN, 2013). Estudos anteriores têm demonstrado as excelentes propriedades mecânicas do RFW, além de sua vantagem ambiental por não gerar emissão de gases tóxicos e não requerer consumíveis (ANANTHAPADMANABAN *et al.*, 2009) (MA *et al.*, 2015) (UDAY *et al.*, 2010) e (LI, WENYA; WANG, 2011). Apesar dos benefícios, o *Rotary Friction Welding* (RFW) apresenta algumas limitações. Por exemplo, não é aplicável em componentes com seções transversais não circulares, e soldas não lineares não podem ser realizadas (MAALEKIAN, 2007) (ARULARASU, 2012). Além disso, a taxa de geração de calor não é uniforme sobre a superfície de união,

o que dificulta a soldagem de peças com grandes áreas de seção transversal (LI, WENYA et al., 2016). Outra questão é a necessidade de alta força de forjamento axial, especialmente para materiais de alta resistência (AMINI, SAEID; NAZARI; REZAEI, 2016). O alinhamento axial preciso das peças cilíndricas a serem soldadas e a remoção do flash também representam desafios (BOUARROUDJ et al., 2017). Além disso, o alto custo de capital do equipamento é uma desvantagem significativa dos processos de soldagem por frição (BHAMJI, IMRAN et al., 2010). Para tornar o RFW mais competitivo, é essencial investir em inovação e tecnologia. Isso não apenas confere uma vantagem competitiva, mas também torna o processo mais ágil e dinâmico, permitindo um controle e monitoramento mais eficazes da qualidade do produto final (TITILAYO; MAKUNDWANEYI; AKINWALE, 2012). Esforços devem ser direcionados para aprimorar os equipamentos existentes ou desenvolver novas alternativas flexíveis, de fácil operação e capazes de lidar com diversos tipos de materiais e suas combinações. Além disso, é crucial implementar soluções de controle e monitoramento da qualidade, permitindo a execução de testes não destrutivos em tempo real. Tal alternativa também deverá permitir que os parâmetros fundamentais possam ser ajustados dentro de uma larga faixa e ainda garantir que novos recursos sejam incorporados com a instalação de novos controles, sensores e atuadores para facilitar a programabilidade e a comunicação de múltiplos elementos heterogêneos. Neste contexto, apesar de apresentar características não estacionárias com múltiplos componentes de frequência e amplitude (LI, XIN; MEI; CHEN, 2010), a análise dos sinais de vibração é uma possível solução a ser implementada. Embora as pesquisas em RFW sejam limitadas, é bem conhecido que o sinal de vibração contém informações cruciais (DE BACKER et al., 2012). Informações que podem ser extraídas no domínio do tempo, domínio da frequência e domínio do tempo-frequência (MAO; ZHANG, 2018).

Atualmente, esta técnica é uma das melhores opções de ensaios não destrutivos, vem ganhando popularidade devido ao seu potencial para diagnósticos de falhas em sinais no domínio do tempo e da frequência, além de garantir, soluções livres do contato físico (BALACHANDAR; JEGADEESHWARAN, 2021a). Em diversos processos de fabricação o controle de qualidade sempre recebeu muita atenção dos pesquisadores, e vários estudos com a finalidade de monitorar esses processos foram publicados. (PEJRYD; LARSSON; OLSSON, 2017a) para controlar a qualidade, conseguiu detectar falhas e defeitos em processo de trefilação em fios de aço carbono utilizando o monitoramento de vibração. A aplicação de sinais de vibração para detectar falhas em correia de transmissão, foi proposto por (POLLAK *et al.*, 2021). Em outra pesquisa (LI, PENG *et al.*, 2015b), analisou a amplitude de sinais de vibração para supervisão de ferramenta de fresamento multiponto. Defeitos estruturais em turbinas eólicas foram identificados por (YUE *et al.*, 2021), analisando sinais de vibração. O sinal de vibração também foi utilizado em um estudo experimental proposto por (LIU, CHENYU *et al.*, 2022), para avaliar o desgaste da ferramenta em processo de usinagem

CNC. O monitoramento de sinais de vibração induzidos por atrito de rolamentos deslizantes também foram objeto de estudo, (XING *et al.*, 2020). Além disso, com o uso crescente de robôs, (HONG, LI; HUANG; HUANG, 2020), instalou sensor de aceleração na estrutura do robô e propôs uma varredura nas articulações, afim de explorar e analisar as exigências mecânicas, utilizando os sinais de vibração. Em outro trabalho semelhante, (KIM *et al.*, 2020) usou recursos estatísticos aplicados aos sinais de vibração para diagnóstico de falhas em robôs.

Em processos de soldagem por fusão, (ISLAM et al., 2020) analisando a soldagem por arco metálico blindado (SMAW), propõe técnicas de monitoramento em tempo real avaliando sinais de vibração para controlar a qualidade do processo. Na soldagem utilizando a fricção, (RABI; BALUSAMY; RAJ JAWAHAR, 2019d) utilizou o sinal de vibração no domínio do tempo para identificar e localizar defeitos em FSW. Características estatísticas foram extraídas dos sinais brutos de vibração para monitorar o desgaste ferramenta em FSW (BALACHANDAR; JEGADEESHWARAN, 2021b). Um sistema de monitoramento foi proposto por (KUMAR, RAJEEV; SINGH; SHARMA; LI; KRÓLCZYK; WOJCIECHOWSKI, 2022), para detectar desgaste do processamento fricção-agitação (FSP) e melhorar as propriedades mecânicas de compósitos metálicos. Além disso, alguns pesquisadores levaram em consideração o domínio do sinal e propuseram soluções, estudos revelaram que existem mais informações no domínio da frequência do que nos sinais temporais (PEJRYD; LARSSON; OLSSON, 2017b). Embora existam muitos métodos para trabalhar no domínio da frequência, é bem conhecido entre os pesquisadores que ferramentas tradicionais de avaliação como a transformada de Fourier (FFT) é o principal método de processamento de sinais de vibração devido a sua robustez e simplicidade (SOUZA et al., 2021). No entanto, existem algumas restrições, sua aplicação é mais indicada para análise de sinais estacionários, no entanto, tem sido amplamente utilizada no processamento de sinais não estacionários. Aplicada para converter um sinal no domínio do tempo para o domínio da frequência e vice-versa, é uma ferramenta poderosa para separar as frequências, identificar amplitudes e as energias de um sinal.

Houve várias abordagens anteriores para extração de informações de sinais de vibração aplicando FFT. Para verificar a viabilidade de aplicar operações de janelamento, para detecção de defeitos em soldagem a arco manual, (BALASUBRAMANIAN, VIKRAM *et al.*, 1999) propôs Transformada de Discreta de Fourier (DFT). [4] explorou o potencial para detectar frequência instantânea da Transformada de Fourier de Curto Prazo (STFT), para monitorar desgaste de ferramenta de uma fresadora. Considerando a boa capacidade da transformada rápida de Fourier (FFT) em separar coeficientes de alta e baixa frequência, foi aplicada para estudar o desgaste do processamento por fricção (FSP). Apesar de inadequadas para caracterizar sinais transitórios, essas abordagens demonstraram potencial razoável para decompor sinais em bandas de frequências e energias, com o inconveniente de incluir componentes harmônicos e um forte ruído

de fundo. Para superar as deficiências da FFT, outras abordagens como, a transformada de Hilbert-Huang (HHT) (DAS; PAL; BAG, 2016b), adequada identificar eventos transitórios, a transformada Wavelet, usada para decompor um sinal não estacionário, fornecendo características nos domínios do tempo e da frequência, decomposição de vibração de Hilbert (HVD) (FELDMAN, 2014), usada para decompor um sinal não estacionária de banda larga, transformada de Hilbert (HT) (FELDMAN, 2014), determina a amplitude instantânea e a frequência instantânea de um sinal e a decomposição de modo variacional (VMD) (FELDMAN, 2014) decompõe o sinal temporal em várias bandas temporais e espectrais. A análise espectral Holo-Hilbert (HHSA) (ZHENG et al., 2023), e usada para identificar as modulações de amplitude e frequência (AM e FM, respectivamente) dos sinais de vibração. Para análise de sinais com características não lineares e não estacionários, uma outra técnica, têm ganhado mais atenção, o Modo de Decomposição Empírica (EMD), originalmente proposto por (HUANG, NORDEN E. et al., 1998a), é ideal para identificar oscilações. É um método que decompõe um sinal no domínio do tempo em um número finito de diferentes funções de modo intrínseco (IMFs). A decomposição é um processo repetitivo e continua até que o número de extremos seja menor ou igual a dois. Cada IMF representa sequencialmente intervalos de frequência, em vários níveis extraídos do sinal original, permitindo identificar os principais componentes de diferentes características de frequência temporal. EMD foi utilizado recentemente para monitorar a ocorrência de defeitos em FSW e solda por fricção linear (LFW) (LI, WENYA et al., 2016), provaram ser úteis nessas aplicações.

Com a tecnologia atual, entretanto, é praticamente impossível verificar experimentalmente em tempo real a evolução dinâmica decorrentes do comportamento do fluxo de material na interface das peças soldadas por RFW. Se fosse possível, teoricamente, poderíamos gerar um registro mais completo das alterações na junção da solda. Por isso, não existe métodos para avaliar a qualidade da solda durante processo, o desenvolvimento de um método é desejado para fornecer informações na prevenção de falhas e monitorar a influência dos parâmetros do processo na qualidade da junção de solda. Em RFW, devido à ação do atrito, altos níveis de ruído e vibração são gerados durante o processo, assim, a utilização dos sinais de vibração é uma técnica promissora, apesar das dificuldades que tem sido discutida por muitos pesquisadores: a separação do sinal de atrito medido do ruido gerado por outros componentes de força (JIN; LI; LIU; *et al.*, 2019)(YU *et al.*, 2021)(LI, PENG; LI; DONG, 2017). Neste sentido, para superar os problemas citados, uma nova abordagem é proposta para avaliar a qualidade da soldagem de uma barra circular de aço carbono ASTM36, utilizando sinais de vibração. Este aço foi escolhido devido à sua alta versatilidade e emprego em uma gama de aplicações em diversas industrias, especialmente nos setores de da metalmecânica, automotiva e no ramo petrolífero.

Os sinais de vibração foram adquiridos no eixo x da peça estacionaria, utilizando um acelerômetro instalado o mais próximo possível do encurtamento axial (bur off), onde os sinais de atrito estão ativos. Neste trabalho, devido as características específicas de RFW, e para obter uma compreensão mais exata da formação do acoplamento entre as interfaces, o estudo tem uma proposta, de analisar especificamente a evolução do processo durante o primeiro estágio, que é definido como estágio de aquecimento ou estágio de formação (ou seja, ligação corona), nesta etapa a área de contato entre as superfícies se expande e começa a deformação plástica do material (ZHANG et al., 2022). Igualmente (JIN; LI; DU; et al., 2019), relatou que o primeiro estágio é caracterizado pela formação da ligação corona que plastifica o material iniciando a formação da junção das interfaces das peças. Este mesmo autor, constatou que a primeira etapa também é responsável por toda formação macro e microestrutural da junção RFW. Por isso, encontrar falhas e defeitos internos no estágio inicial é fundamental para garantir a qualidade da solda (KUMAR, M. GIRISH et al., 2014). Em outras palavras, a primeira etapa é fundamental para a formação do estágio de aderência entre as peças. Para realização dos experimentos para o primeiro estágio foi considerado um tempo de 12 segundos, pois o tempo de soldagem total varia de 1,8 a 29 segundos. Inicialmente, um planejamento fatorial completo foi gerado utilizando o software Minitab, foi aplicado, para avaliar os efeitos de cada parâmetro selecionado na formação do *flash*, do *burn off* e das três áreas macroestruturais. Em seguida, usando o software *LabVIEW* e módulos da National Instruments (NI), um sistema de aquisição de dados (DAQ) foi programado para aquisição dos sinais. Em seguida, uma abordagem técnica para extração de recursos para reduzir as interferências ruidosas que afetam a precisão e a exatidão dos sinais portadores e tornar as informações mais confiáveis, foi desenvolvida no software Matlab.

Neste trabalho, para superar as características de não-linearidade e não estacionária dos sinais, propomos um novo método de filtragem para a separação do sinal desejado de ruídos causados por interferência. O método proposto baseado na aplicação de filtragem mediana que realiza a suavização do sinal e remove ruídos de fundo. Além disso, a técnica de separação de frequência temporal EMD é aplicada para dividir o sinal bruto em características de amplitude e largura de banda modulada em frequência. Em seguida os sinais foram analisados em três domínios. Estes incluem o domínio do tempo, que é usado para determinar a amplitude do pico; o domínio da frequência por FFT, que é usado para obter as frequências dominantes; e o domínio tempo-frequência pelo STFT, que é usado para revelar o conteúdo de frequência em função do tempo. Para estabelecer a correlação com a qualidade da solda dezesseis recursos estatísticos no domínio do tempo e cinco no domínio da frequência foram propostos e testados para ajudar na interpretação. Em seguida, Análise de variância (ANOVA) de dois fatores foi realizada para determinar a contribuição de cada parâmetro do processo nos recursos estatísticos e nos fatores de qualidade do processo, simetria do *flash*, encurtamento axial (*burn-off*), largura da zona termo mecanicamente afetada (TMAZ) e o

diâmetro médio dos grãos da TMAZ. Parece haver uma falta de conhecimento sobre os sinais de vibração em RFW, é crucial ter uma compreensão abrangente de como os recursos estatísticos se comportam sob diferentes condições experimentais. Para preencher esse vazio esta pesquisa enfoca predominantemente todos os recursos estatísticos e todas as IMFs selecionadas para a análise de variância. Objetivo da ANOVA é distinguir quais recursos estatísticos ou suas interações devem ser a base para uma análise temporal ou espectral posterior. Verificou-se que entre os recursos extraídos dos sinais, a energia, variância e valor de pico foram os mais significativamente afetados pelos sinais de vibração, e podem ser considerados eficazes para a detecção das características de qualidade do processo burn-off e flash e podem ser utilizados como uma ferramenta para avaliar a qualidade do processo. Por outro lado, as componentes de baixa frequência, derivadas da decomposição revelaram a estrutura inerente dos transientes relacionados a possíveis falhas na junção da solda. Também ficou bem claro que RFW é um processo caracterizado por baixa frequência possuindo natureza estacionária e não estacionária. Portanto, foi demonstrado que os sinais de vibração podem ser utilizados para apoiar o desenvolvimento de sistemas de reconhecimento da qualidade em RFW. Este estudo dá os primeiros passos no sentido de fornecer uma análise do sinal de vibração em RFW e detectar alterações e identificar a qualidade na macro e na microestrutura.

O restante deste trabalho está organizado da seguinte forma, capitulo 2 apresentamos a revisão das literaturas publicadas sobre o tema apresentado no trabalho. O capitulo 3 apresenta os conceitos de vibração. O método proposto de filtragem e a decomposição dos sinais com EMD é apresentado na Seção 4. O capitulo 5 descreve as características estatísticas extraídas de cada domínio. O capitulo 6 a metodologia aplicada nos experimentos e para análise dos sinais de vibração. O capitulo 7 apresenta conjuntos de dados obtidos, resultados e discussões. No capitulo 8 apresenta os resultados da simulação obtidos para a confirmação dos resultados. Finalmente, uma conclusão é apresentada no capitulo 9 e no capitulo 10 as referências bibliográficas.

1.2. Objetivos

Considerando a temática apresentada anteriormente, na busca de novas alternativas para analisar a qualidade soldagem RFW do aço ASTM A36, o presente trabalho tem como objetivo principal oferecer uma abordagem para investigar a qualidade da junção de solda RFW utilizando sinais de vibração no domínio tempo-frequência adquiridos durante o processo. A partir do objetivo principal, surgem os seguintes objetivos secundários:

- Identificar as bandas de frequência dos sinais de vibração característicos do processo RFW;
- Identificar a interação dos recursos estatisticos e fatores de qualidade com os parâmetros de entrada do processo;
- Desenvolver um equipamento flexivel e microprocessado de baixo custo para execução das junções;
- Proposição de uma nova metodologia para o desenvolvimento de uma nova metodologia para avaliação não destrutiva da qualidade em RFW.

1.3. Justificativa

Processos que possibilitam a redução de custo da soldagem e a melhoria da qualidade são de grande interesse. Nas últimas décadas, muitos avanços ocorreram no processo RFW e a tecnologia tem sido cada vez mais inserida na prática. Muitos recursos foram incorporados e têm mostrado resultados promissores. No entanto, ainda existe uma escassez de estudos disponíveis para avaliação da qualidade de maneira não destrutiva. Este trabalho pretende estabelecer as bases para a análise da qualidade do processo através da análise de vibrações. Espera-se que os resultados aprofundem o entendimento dos sinais de vibração no processo, de modo a fornecer uma referência técnica para o controle de qualidade e seja o ponto de partida para ampliar o uso de análise de vibração para o controle de qualidade em FW.

1.4. Contribuições

Se os objetivos propostos forem alcançados, e com os conhecimentos gerados, este trabalho poderá contibuir como uma nova alternativa para minimizar algumas limitações na análise de qualidade do processo, as principais contribuições desta pesquisa são enumeradas a seguir:

- 1) Propomos utilizar os recursos estatísticos temporais e espectrais;
- 2) Para extrair as informações mais significativas, segmentação e decomposição do sinal é proposta;
- 3) Identificamos as características do sinal de vibração empregando o conceito de janela móvel;

- 4) Empregamos recursos que poderão auxiliar no desenvolvimento de classificadores de índices de qualidade e incrementar a pesquisa aplicando inteligência artificial e internet das coisas;
- 5) Os sinais de vibração de atrito podem ser adquiridos on-line e em tempo real sem afetar a operação normal do processo.
- 6) As IMFs são aplicados de forma inovadora para construir os recursos estatísticos das bandas de frequências

1.5. Delimitações e oportunidades

Apesar dos fatores positivos, o processo RFW ainda não está completamente estudado, como fatores limitadores que inibem uma melhor compreensão desse fenômeno, podemos citar:

- E o fato de a interface das peças de trabalho não poder ser observado durante a soldagem;
- Por ser um sinal não linear típico, a extração de características de vibração de fricção sempre foi uma dificuldade em pesquisa;
- A utilização de um único material para confecção das junções (ASTM A36).

2. REVISÃO DA LITERATURA

2.1. Revisão da história do processo FW

Como ponto de partida para esta seção, faz-se necessário apresentar um pouco da história do FW, as primeiras contribuições de vários pesquisadores pioneiros. Assim, é importante destacar alguns fatos que impulsionaram o desenvolvimento do processo. Esta revisão da literatura revela a evolução e o desenvolvimento do processo. Considera-se, portanto, este estudo como um instrumento de verificação, a partir de uma abordagem histórica, que resgata a trajetória dos avanços do processo ao longo do tempo. A revisão mostra ainda que, nos anos iniciais, os esforços para o desenvolvimento foram isolados e sem qualquer avaliação da viabilidade técnica do processo.

A ideia de usar o calor obtido por fricção na soldagem não é recente. Historicamente, como descrito por (THOMAS, W.M.; THREADGILL; NICHOLAS, 1999) e (CROSSLAND, 1971), a primeira iniciativa surgiu há mais de um século, com a patente de (BEVINGTON, 1891) nos EUA, que foi aplicada na soldagem de tubos de metal. O objetivo era aproveitar o aquecimento gerado mecanicamente por meio do emprego da rotação de uma peça em relação à outra. Este processo não obteve muita aceitação, mas sua contribuição, segundo (OBERLE; LOYD; CALTON, 1967) foi o marco inicial que resultou no desenvolvimento do atual RFW. Algumas décadas depois, de acordo com (BHAMJI, I et al., 2011) e (BUFFA et al., 2015), em 1929 na Alemanha, (RICHTER, 1929), obteve uma patente, com o processo Linear Friction Welding (LFW), em que o movimento rotativo é substituído por um movimento linear. A descrição do processo foi, contudo, vaga e novamente houve dificuldade para se colocar essa proposta em prática e nenhuma aplicação real ou atividade de pesquisa foi desenvolvida. (LI, WENYA et al., 2016) citam que a empresa Caterpillar Tractor Company (Peoria, IL, EUA) produziu em 1969 uma máquina para LFW.

O desenvolvimento seguinte foi em 1941, como descrito por (THOMAS, W.M.; THREADGILL; NICHOLAS, 1999), (BATCHELOR *et al.*, 1996) e (FUKAKUSA, 1996) e onde o processo de revestimentos de superficie conhecido por *Friction Surfacing* (FS) foi patenteado por (KLOPSTOCK; NEELANDS, 1941). Apenas a partir da década de 1950, identifica-se uma atuação mais sistemática e consistente de pesquisa, no sentido de melhorar a compreensão do processo. (GANDRA *et al.*, 2014), em sua revisão sobre o processo FS, e também (NICHOLAS, 2003), apontam que relatórios de (BISHOP, 1960), indicavam que o processo também foi desenvolvido durante os anos 50 na antiga URSS. Nesse mesmo período, (BATCHELOR *et al.*, 1996) descrevem em seu artigo que (TYAGAR, 1959) e (ZAKSON; TURUKIN, 1965) publicaram relatórios sobre o desenvolvimento do processo *Friction Surfacing* (FS). Mais uma vez, o processo não encontrou ampla aceitação e o reconhecimento. Vale ressaltar que esta aceitação,

somente aconteceu a partir da década de 1990, quando se demonstrou a possibilidade da exploração comercial.

Em seu artigo, (IRACHETA; BENNETT; SUN, 2015) também apontam que os primeiros estudos científicos sobre soldagem por fricção foram liberados durante o final de 1950 pela URSS. Os mesmos autores citam que a primeira solução analítica para caracterizar os fenômenos térmicos, foi publicada por (RYKALIN; PUGIN; VASIL'EVA, 1959) e (VILL, V. I., 1959), em seu trabalho procurou caracterizar o processo em três fases de fricção. Especificamente no processo RFW, (MAALEKIAN, 2007) descreve que, desde a introdução da soldagem por fricção rotativa durante a Segunda Guerra Mundial, tal técnica passou a ser o mais popular de todos processos FW. Tal protagonismo se deve à relevância do processo e ao fato de que o mesmo revela aspectos para complementação dos conhecimentos técnicos e físicos presentes nas demais variantes FW.

A partir desse ponto, um estágio de desenvolvimento foi alcançado ao final da década de 1950, quando o interesse em processos de estado sólido aumentou e uma série de pesquisas sugeriu a viabilidade da técnica. E, segundo (WANG, K. K.; LIN, 1974) e (GANDRA *et al.*, 2014), utilizando um torno mecânico modificado para unir peças cilíndricas, (CHUDIKOV, 1956) obteve uma patente que resultou em uma variante RFW que, posteriormente, foi então denominada CDFW, também conhecido por *Direct Drive Friction Welding* (DDFW), que utiliza um motor para fornecimento contínuo de rotação.

É importante ressaltar que neste período, como descrito por (VILL, VADIM IVANOVICH, 1962), tentativas de soldagem de hastes de metal em torno mecânico já eram conhecidas, no entanto, estas tentativas não contribuíram com nenhum significado para a evolução do processo. Apesar disso, demonstrou-se em diversas pesquisas que foi dada continuidade à metodologia de trabalho já utilizada anteriormente. Desse modo, de acordo com (MAALEKIAN, 2007), em 1965 nos EUA foi desenvolvida uma alternativa ao processo CDFW, o *Inertia Friction Welding* (IFW), assim chamado porque foi acoplado ao eixo do motor um volante para aproveitamento da energia cinética. Em seguida, ao final dos anos 60, uma quantidade expressiva de artigos sobre o tema contribuiu como um importante impulso no sentido de apresentar propostas, metodologias e algumas definições no sentido de viabilizar o processo. No início dos anos 1970, de acordo com (UDAY *et al.*, 2012) e (MAALEKIAN, 2007), outra variante, o *Orbital Friction Welding* (OFW), que é uma combinação entre LFW e RFW foi desenvolvida.

Depois de mais de uma década, (NICHOLAS, 1983) teria proposto pela primeira vez o *Radial Friction* (RF), como descrito nos trabalhos de (LUO, JIAN *et al.*, 2012) e (ROVERE, C.A. DELLA *et al.*, 2014). Porém, foi nos anos 90 que se iniciou uma sequência de experimentos que possibilitou uma contribuição importantíssima, como se pode destacar, o desenvolvimento do processo *Friction Stir Welding*

(FSW). Em seus artigos, (COLLIGAN, 1999), (NANDAN; DEBROY; BHADESHIA, 2008) e (RASHIDI; MOSTAFAPOUR, 2014) relatam a patente obtida por (THOMAS, W.M. et al., 1991), do The Welding Institute (TWI). Isto motivou ainda mais as pesquisas e proporcionou o surgimento de novas variantes. Para (FROLOV et al., 2010), o conceito deste método de soldagem não era completamente novo porque, em 1967, o certificado de autor nº 195846 foi emitido na URSS para um método de solda por frição semelhante ao FSW, no entanto, o novo método não obteve muita aceitação e ficou esquecido. Friction Stir Lap Welding (FSLW) e Friction Stir Butt Welding (FSBW) são as duas principais configurações deste método de soldagem, em FSLW a junta de solda é formada devido à mistura do material entre duas peças sobrepostas, em FSBW a junta de solda é formada devido a mistura do material entre duas peças paralelas. De acordo com (CUI et al., 2014), em 1992 foi apresentado pelo TWI um novo processo de soldagem de estado sólido, denominado de Friction Taper Plug Welding (FTPW). Tal evolução propiciou no mesmo ano em 1992, de acordo com (THOMAS, W.; NICHOLAS, 1992), (AMBROZIAK; GUL, 2007) e (YIN et al., 2015), o desenvolvimento de outro processo, o Friction Hydro Pilar Processing (FHPP), também desenvolvido pelo TWI. Na mesma linha, logo em seguida, foi apresentado, de acordo com (HATTINGH, DG; ZYL, 2012), o Friction Taper Stud Welding (FTSW), desenvolvido como uma resposta aos problemas e às limitações do FHPP.

O novo milênio veio acompanhado de várias pesquisas, (BILICI; YÜKLER, 2012) e (BOZZI et al., 2010) relatam que em 2001, foi introduzido o conceito Friction Stir Spot Welding (FSSW), como uma alternativa tecnológica para substituir a soldagem de ponto RSW na indústria automotiva. A maioria dos trabalhos estudados sugere o que foi descrito por (SHEN et al., 2014). Para estes autores, o FSSW possui três variações, o FSSW desenvolvido por (IWASHITA, 2003), que obteve a patente em 2003, Friction Spot Welding (FSpW) patenteada por (SCHILLING; SANTOS, 2004), e a variante desenvolvida por (SAKANO et al., 2001a). Por outro lado, (WANG, D. A.; CHEN, 2009), (YUAN et al., 2011) e (FANELLI; VIVIO; VULLO, 2012) citam que o FSSW foi desenvolvido pelas empresas Mazda Motor Corporation e Kawasaki Heavy, sendo o processo patenteado, respectivamente, por (IWASHITA, 2003) e (SAKANO et al., 2001b). Entretanto, há também outra citação de (BOZZI et al., 2010), destacando que o processo FSpW foi desenvolvido pela fábrica alemã GKSS em 2002.

Um aspecto impulsionador dessa tecnologia que merece ênfase é o da busca incessante por novas variantes, uma contribuição, no sentido de ampliar as possibilidades e melhorar cada vez mais o processo. Neste sentido (LUO, J; WANG; WANG, 2009) descrevem *Resistance Friction Stir Welding* (RFSW), como uma nova tecnologia de soldagem desenvolvida em 1998, que é um processo híbrido que utiliza as vantagens da soldagem por resistência e FW. Em outra contribuição, (KOHN *et al.*, 2002) apresentaram o *Laser Assisted Friction Stir Welding* (LAFSW) que utiliza energia do raio laser para aquecer a peça de trabalho na

aplicação do processo FSW. Em 2002 (SAKURADA; KATOH; TOKISUE, 2002), apresentou *Under Water Friction Stir Welding* (UWFSW), uma proposta de submersão da junção por fricção em água. UWFSW é uma ligeira modificação do processo FSW em que a água como refrigerante é empregada para normalizar os perfis de temperatura existentes na junta soldada (WAHID; KHAN; SIDDIQUEE, 2018). No final de 2004 e início de 2005, a TWI desenvolveu uma nova abordagem para o FSW de ligas de titânio. A técnica inovadora desenvolvida neste caso foi chamada de *Stationary Shoulder Friction Stir Welding* (SSFSW) (RUSSELL *et al.*, 2008).

Um progresso posterior aconteceu em 2006, de acordo com (RAJAN; SENTHIL KUMARAN; KUMARASWAMIDHAS, 2016) e (PRASHOB; SENTHIL KUMARAN; KANNAN, 2015) onde o *Friction Welding of Tube to Tube Plate* (FWTPET) foi desenvolvido e uma patente foi concedida no ano 2008 ao pesquisador S. Muthukumaran. Logo após, (GAO *et al.*, 2009) propuseram o *Friction Stir Blind Riveting* (FSBR), um processo de junção por rebitagem unilateral. Outro processo que merece atenção é o *Friction Crush Welding* (FCW), descrito por (BESLER *et al.*, 2016), que se refere a um método para unir peças com a aplicação sobre a superfície de soldagem de um elemento rotativo não consumível.

No estágio atual de desenvolvimento, visando ajustar e a encontrar uma condição de operação satisfatória, estão sendo agregadas novas variantes, dentre as quais podemos citar, segundo (HUANG, Y X et al., 2011), uma nova técnica chamada de Filling Friction Stir Welding (FFSW), com base no princípio básico de FTPW / FHPP. (DAVARI et al., 2011), citam o Hybrid Friction Welding (HFW), utilizado para soldagem de hastes de cobre, que é uma variante do processo CDFW. A principal diferença entre o HFW e o CDFW é a eliminação do sistema de freios. Já (LUO, JIAN et al., 2014) desenvolveram um novo método, o Current Inertia Friction Welding (CIFW), que é um processo híbrido com aplicação de corrente elétrica simultânea ao processo IFW. (REIMANN et al., 2016) apresentaram em seu artigo o processo proposto por (ZHOU et al., 2012), o Self-Refilling Friction Stir Welding (SRFSW), uma variante do FSW. Os mesmos autores descrevem o processo Refill Friction Stir Spot Welding (RFSSW). Do mesmo modo, (LIU, X. C.; WU; PADHY, 2015), propõe o Ultrasonic Vibration enhanced Friction Stir Welding (UVeFSW), uma nova variante da soldagem por friçção FSW. Em um trabalho recente, (RAHMI; ABBASI, 2016) apresenta em seu artigo o Friction Stir Vibration Welding (FSVW), em que em um processo FSW é aplicada uma vibração na linha de soldagem. (JI, SHUDE et al., 2016), propõe também_uma nova variante, o Active Passive Filling Friction Stir Repairing (A-PFFSR), proposto para eliminar as desvantagens FSW.

Uma variedade de combinações de metais, polímeros e cerâmicas são soldadas com os processos FW. Muitas já sendo utilizadas em aplicações industriais, principalmente na indústria automotiva, aeronáutica e naval. A Tabela 2.1 lista algumas das principais aplicações encontradas por esta revisão, no setor automobilístico, de óleo e gás e de fabricação e recuperação de peças.

Tabela 2.1 – Aplicação das várias técnicas FW

SIGLA	PROCESSO	TIPOS DE UNIÃO	POTENCIAL PARA APLICAÇÃO	REFERÊNCIA
A-PFFSR	Active Passive Filling Friction Stir	União de chapas	Fabricação veículos ferroviários	(JI, SHUDE et al., 2016)
CDFW	Continuous Drive Friction Welding	União de hastes Indústria aeroespacial		(PALANIVEL;
FCW	Friction Crush Welding	União de chapas	União de chapas Fabricação de equipamentos industriais	
FFSW	Filling Friction Stir Welding	Reparar defeitos de soldagem	Indústria aeroespacial	(JI, SHUDE et al., 2016)
FHPP	Friction Hydro Pilar Processing	União e reparos em chapas	Reparos em turbinas a vapor	(KANAN et al., 2018)
FS	Friction Surfacing	Revestimento de chapas	Indústria petróleo e gás	(HANKE et al., 2018)
FSBR	Friction Stir Blind Riveting	Rebitagem por atrito	Indústria automotiva	(MIN et al., 2014)
FSpW	Friction Spot Welding	União de chapas	Indústria automotiva e aeronáutica	(LAKSHMINARAYANAN;
FSSW	Friction Stir Spot Welding	União de chapas	Indústria automotiva	(LAKSHMINARAYANAN;
FSVW	Friction Stir Vibration Welding	União de chapas	Indústria automotiva	(RAHMI; ABBASI, 2016)
FSW	Friction Stir Welding	União de chapas	Indústria aeroespacial, automotiva, ferroviária e	(GIBSON et al., 2014)
FSBW	Friction Stir Butt Welding	União de chapas	Indústria aeroespacial, automotiva, ferroviária e	(YAZDIPOUR;
FSLW	Friction Stir Lap Welding	União de chapas	União de chapas Indústria aeroespacial, automotiva, ferroviária e	
FTPW	Friction Taper Plug Welding	Reparos em chapas/tubos Reparação de estruturas metálicas submarinas		(CUI et al., 2014)
FTSW	Friction Taper Stud Welding	União de chapas. Reparação tubos de vapor		(HATTINGH, DANIE G.
FWTPET	Friction Welding of Tube to Tube Plate	União de tubo a placa	Indústria automotiva, aeronáutica e naval	(KANNAN; SENTHIL
IFW	Inertia Friction Welding	União de hastes	Indústria aeroespacial	(ATTALLAH; PREUSS,
LAFSW	Laser Assisted Friction Stir Welding	Welding União de chapas Indústria automotiva		(MERKLEIN; GIERA,
LFW	Linear Friction Welding	riction Welding União de chapas Indústria de motores de aeronaves		(LI, WENYA et al.,
OFW	Orbital Friction Welding	União de chapas Fabricação de discos de titânio		(RAAB et al., 2016)
RF	Radial Friction	União de tubos	Indústria petróleo e gás	(ROVERE, C. A. DELLA
RFSSW	Refill Friction Stir Spot Welding	União de chapas	Ligas de alumínio	(MONTAG et al., 2014)
SRFSW	Self-Refilling Friction Stir Welding	Reparar defeitos de soldagem	Estruturas industriais	(ZHOU et al., 2015)
SSFSW	Stationary Shoulder Friction Stir Welding	União de chapas	Indústria aeroespacial, automotiva, ferroviária e	(LIU, ZHENLEI et al.,
UWFSW	Under Water Friction Stir Welding	União de chapas	Áreas marítimas e offshore	(WAHID; KHAN;

A revisão mostra que várias soluções foram desenvolvidas, como variantes do FSW, demonstrando o potencial desse processo. De acordo com (PADHY; WU; GAO, 2017), o FSW tem sido continuamente melhorado e revisado. Dessa forma (HUANG, YONGXIAN *et al.*, 2016) desenvolveu o *Self-Riveting Friction Stir Lap Welding* (SRFSLW), um processo que fornece ligação mecânica utilizando rebites fixados por fricção. A aplicação em termoplásticos também foi pesquisada. (REIMANN *et al.*, 2016), desenvolveu o *Friction Spot Joining* (FSpJ), uma variante do FSpW. A Figura 2.1 apresenta um breve resumo da história de FW, o início e os principais marcos de seu desenvolvimento ao longo do tempo.

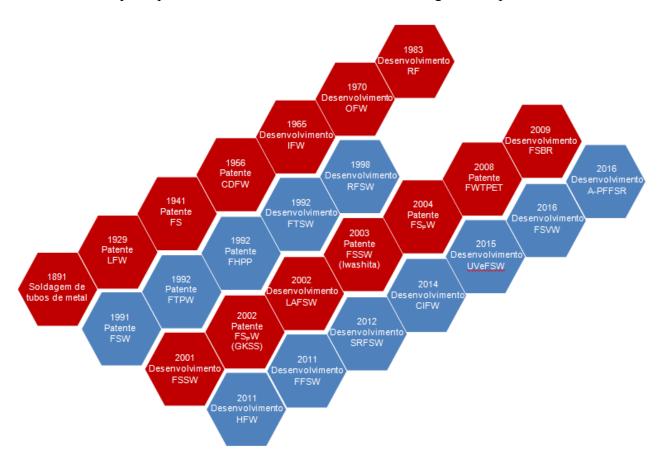


Figura 2.1 – Marcos históricos do processo FW

Como podemos observar nos estágios iniciais o progresso foi lento, mas apontou caminhos importantes que impulsionaram o desenvolvimento futuro. Um marco foi alcançado na década de 1950, com a patente do CDFW, o processo começou receber atenção como uma opção de soldagem e uma técnica inovadora. Essa contribuição influenciou fortemente as pesquisas científicas e abriram caminho gerar contribuições significativas. Um período de progresso técnico incremental, que permitiu a comparação e replicação de pesquisas proporcionando um forte impulso para o desenvolvimento da tecnologia, com o objetivo de oferecer alternativas cada vez mais atraentes.

2.2. O Processo CDFW

Os processos de soldagem podem ser divididos em duas categorias: soldagem em estado sólido e soldagem por fusão. Aplicação de soldagem por fusão para alguns materiais e ligas é difícil ou mesmo impossível devido à geração de fases intermetálicas e frágeis na interface de soldagem partes (MAALEKIAN, 2007). Entre vários tipos de processos de soldagem em estado sólido, a soldagem por fricção rotativa (RFW) é amplamente aplicada por várias indústrias.

A soldagem por fricção RFW é um processo de estado sólido caracterizado pela combinação do movimento de rotação e de pressão axial de uma peça em relação a outra. O calor é gerado mecanicamente pelo atrito entre as peças a serem soldadas, ou seja, por meio da conversão direta de energia mecânica para energia térmica. Uma das peças é colocada em rotação e a outra é mantida estacionário. A peça giratória é colocada em contato com a peça estacionária e quando calor suficiente é gerado, ocorre a deformação plástica em ambas as peças. Simultaneamente e aplica uma força axial, até queuma ligação de estado sólido na interface é formada. RFW é classificado como estado sólido, porque a temperatura não é suficiente para fundir o metal, ou seja, a coalescência é realizada com temperaturas abaixo do ponto de fusão dos materiais que estão sendo unidos (SCHMICKER; NAUMENKO; STRACKELJAN, 2013). Existem dois tipos básicos de soldagem por fricção rotativa, classificados de acordo pela qual a energia rotacional é convertida em calor friccional: Soldagem por fricção por acionamento contínuo (CDFW) e Solda de fricção de inércia (IFW)

Em CDFW no mecanismo de rotação possui um controle de partida, de operação e de parada, a energia rotacional pode ser fornecida de forma infinita. Em IFW o mecanismo de rotação possui apenas controle de partida, a energia rotacional para completar o processo é fornecida pela própria cinética de armazenada em um volante rotativo. CDFW comparado com o processo IFW, é mais fácil de controlar, os parametros de tempo de fricção e de forjamento. IFW continua sendo mais usado nos EUA até hoje, enquanto o CDFW é usado principalmente na Europa e no Japão (ATTALLAH; PREUSS, 2012).

Considerando todos esses aspectos, CDFW envolve muitas variáveis que possuem interações entre si, em síntese como define, (BENNETT, 2015) é um processo muito complexo e envolve uma série de fenômenos térmicos, mecânicos e metalúrgicos. De maneira simples, estes fenômenos se traduzem na forma de ações envolvendo:

- Desgaste mecânico entre as superfícies a serem soldadas;
- Geração de calor;
- Deformação plástica;
- Conformação a frio;
- Processos de difusão;
- Penetração macroscópica de partículas de material.

As principais diferenças entre os sistemas IFW e CDFW são apresentadas na Figura 2.2 (ATTALLAH; PREUSS, 2012).

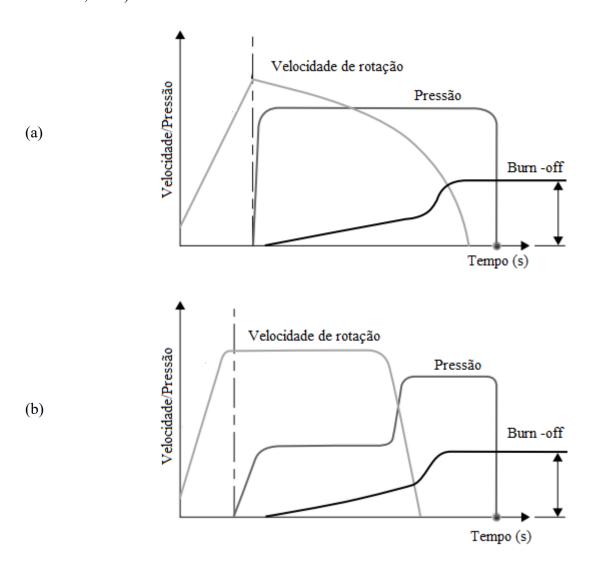


Figura 2.2 – Variação esquemática dos parâmetros de pressão, velocidade de rotação e *burn off* do processo RFW, (a) IFW e (b) RFW

A primeira fase refere-se à aceleração inicial da peça em um curto período de tempo, as peças ainda não estão em contato, portanto não há aplicação de pressão axial. Na fase seguinte, após o equipamento alcançar uma velocidade preestabelecida, a pressão axial é aplicada para iniciar o contato entre as superfícies da peça rotativa e da peça estacionária. Nessa a fase a pressão axial é aplicada por um tempo definido, até que a velocidade de rotação seja interrompida. Na próxima fase, sem a aplicação da velocidade de rotação, a pressão axial continua sendo aplicada para concluir a etapa de forjamento, durante um tempo também pré estabelecido. Todas as fases contribuíram para a evolução da temperatura e da deformação plástica das juntas, esses fenômenos afetarão a ligação interfacial e as propriedades das articulações, estes podem alterar a microestrutura na zona afectada pelo calor e afetar significativamente a qualidade da articulação.

Durante o processo de fricção e de forjamento ocorre a ejeção de material plastificado em forma de flash, devido a formação do *flash*, o RFW pode ser descrito como processo de soldagem autolimpante, há a eliminação de qualquer contaminação de superfície ou óxidos, tornando desnecessário usar gás de proteção durante a soldagem (ATTALLAH; PREUSS, 2012). A Figura 2.3 mostra uma imagem de uma barra cilíndrica de ASTM A35 soldados por CDFW, a união revela a formação de *flash* de ambos os lados da junta que é uma característica típica da soldagem por fricção.



Figura 2.3 - Visão externa do corpo de prova soldado por CDFW Fonte: Autoria própria (2022)

2.2.1. Parâmetros CDFW

Os parâmetros são os fatores que podem ser ajustados para controlar um processo, por isso é necessário conhecer o efeito de cada variável sobre as diversas propriedades do processo, bem como a influência sobre a qualidade e os custos da solda. Portanto, para alcançar uma boa qualidade na junção da solda, é essencial compreender a influência e determinar as melhores configurações dos parâmetros. Os parâmetros do processo CDFW e do IFW são essencialmente os mesmos, com exceção do modo de fornecimento de energia, uma vez que, no caso do CDFW, a entrada de energia depende do motor de acionamento, dessa forma, possui um controle de parâmetros executados com mais facilidade. Em um estudo detalhado, (OZDE-MIR; SARSILMAZ; HASÇALIK, 2007) e (SAHIN, MUMIN, 2007) indicaram que os parâmetros mais importantes são o tempo de fricção, a pressão de fricção, o tempo de forjamento, a pressão de forjamento e a velocidade de rotação.

Por sua vez, esses parâmetros juntamente com as propriedades do material base, tais como diâmetro, acabamento das superfícies, resistência à deformação, ponto de fusão, ductilidade e dureza do metal base, influenciam o fluxo de material na camada interfacial (KALSI; SHARMA, 2011). Em algumas publicações o tempo de forjamento é substituído pelo *burn-off*, que descreve a quantidade de material plastificado e é

usualmente uma medida de deslocamento axial ou encurtamento da peça de trabalho (ADALARASAN; SHANMUGA SUNDARAM, 2015), (LI, XUN et al., 2016) e (CHAMANFAR; JAHAZI; CORMIER, 2015), argumentou que a quantidade de encurtamento axial pode ser considerada métrica conveniente e precisa para avaliação da integridade da solda. Vale ressaltar que em CDFW, o calor é gerado pelo atrito causado pelo movimento relativo entre uma peça estacionária e uma peça rotativa, considerando a complexidade da deformação viscosa dos materiais o processo é composto por diferentes estágios.

Devido à natureza rápida do processo, uma definição comum é que o processo é composto por dois estágios: a fase de fricção e a fase de forjamento (LI, WENYA *et al.*, 2016) (MAALEKIAN, 2007). No entanto, essa definição não é necessariamente verdadeira, para alguns pesquisadores os estágios podem ser divididos em três estágios: estágio de pré aquecimento, o *quasi-steady-state* e o estágio de forjamentos (LI, PENG *et al.*, 2015a) (JIN *et al.*, 2018). Ou em até cinco etapas, o primeiro estágio é o "estágio de fricção", o segundo estágio começa depois que o pico de torque inicial é atingido e continua até o estágio de equilíbrio, o terceiro estágio é o "estágio de equilíbrio", o quarto o "estágio de frenagem" e por último o "estágio de forjamento" (BALTA; ARICI; YILMAZ, 2016). Na Figura 2.4 é apresentada a definição de quatro estágios (JI, SHU DE *et al.*, 2012) (SELI *et al.*, 2010) e os principais parâmetros do processo envolvidos em cada um dos estágios: Pressão de fricção PS [MPa]; Tempo de fricção TS [s]; Velocidade de rotação n [rpm]; Pressão de forjamento PF [MPa]; Tempo de forjamento TF [s] e *Burn – off* (mm)

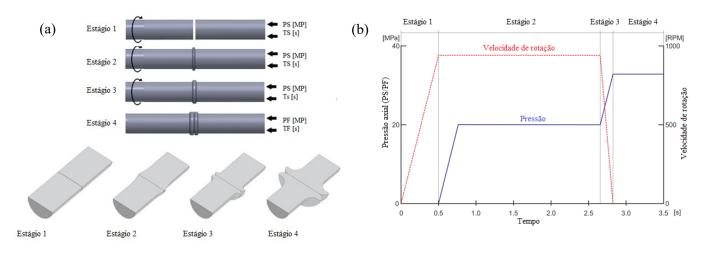


Figura 2.4 – (a) Estágios do processo CDFW e (b) variação esquemática dos parâmetros de pressão e velocidade de rotação (JI, SHU DE *et al.*, 2012) e (SELI *et al.*, 2010)

Como mostrado na Figura 2.4, o primeiro estágio CDFW é o "estágio inicial de fricção", quando as duas partes ainda sem contato, a velocidade de rotação da peça aumenta linearmente até um valor máximo

adequado para iniciar o contato e desenvolver a energia térmica, a pressão de fricção axial inicial está em zero.

Em seguida, no segundo "estágio de fricção", quando duas partes estão em contato, a velocidade de rotação é mantida constante, a pressão de fricção axial, aumenta até um valor máximo e em seguida é mantida constante. Nesse estágio a energia térmica e a deformação plástica são geradas devido ao atrito. Devido ao amolecimento gradual, o material amaciado flui radialmente para fora para formar o *flash*, inicia-se o *burn-off* (BALTA; ARICI; YILMAZ, 2016).

O próximo estágio o "estágio de parada", a velocidade de rotação começa a diminuir até atingir o valor zero, a pressão de fricção é mantida em seu valor máximo.

O último estágio o "estágio de forjamento", o movimento relativo entre as peças cessa, a pressão de fricção é substituída pela pressão de forjamento durante um tempo predeterminado ou até a redução no comprimento (*burn-off*) seja completada. Nesse estágio o calor é produzido principalmente devido a deformação viscosa dos materiais (DEY *et al.*, 2009), nesta fase também ocorre a inter difusão química (MEISNAR *et al.*, 2017a) e o material plastificado continua a ser expelido para fora.

Acredita-se que a formação da articulação CDFW depende principalmente do estágio de fricção e do estágio de forjamento (LI, PENG *et al.*, 2015a). Várias pesquisas foram realizadas para determinar o efeito desses parâmetros nas propriedades de juntas soldadas por fricção em materiais similares e dissimilares, técnicas de otimização e modelagem numérica foram aplicadas.

A Tabela 2.2, lista alguns dos principais estudos em CDFW encontrados por esta revisão, com a descrição dos materiais base, os diâmetros da peça e as variáveis de entrada e saída utilizadas no processo.

Tabela 2.2 – Influência dos parâmetros de entrada no processo

	Material Base		Parâmetros		
Referência -	Material de trabalho	Diâmetro	Constantes	Variáveis	- Foco da pesquisa
(SAHIN, MÜMIN, 2005)	HSS-S 6-5-2 / AISI 1040	10 mm	PF [MP]; TF [s]; n [rpm]	PS [MP]; TS [s]	Resistência à tração
(CELIK; ERSOZLU, 2009)	AISI 4140 / AISI 1050	10 mm	PF [MP]; TF [s]; n [rpm]	PS [MP]; TS [s]	Resistência à tração
(OZDEMIR; SARSILMAZ; HASCALIK, 2007)	AISI 304L / AISI 4340	12 mm	PS [MP]; TS [s]; PF [MP]; TF [s]	n [rpm]	Resistência à tração
(ADALARASAN; SHANMUGA SUNDARAM, 2015)	Al / SiC / Al2O3	16 mm	TS [s]	PS [MP]; PF [MP]; TF [s]; n [rpm]	Micro dureza, Resistência à tração
(LI, XUN et al., 2016)	TC4 titanium / SUS321	25 mm	PS [MP]; TS [s]; PF [MP]; TF [s]	n [rpm]	Micro dureza, Resistência à tração
(JI, SHU DE et al., 2012)	45# steel	50/80 mm	PF [MP]; TF [s]	PS [MP]; TS [s]; n [rpm]	Comportamento do fluxo
(DEY et al., 2009).	Ti / 304L	18 mm/14 mm	TS [s]; PF [MP]; n [rpm]	PS [MP]; TF [s]	Resistência à tração
(MERCAN; AYDIN; ÖZDEMIR, 2015)	AISI 2205 / AISI 1020	12 mm		PS [MP]; TS [s]; PF [MP]; TF [s]; n [rpm]	Teste de tensão, fadiga
(RAFI et al., 2010).	AA7075	13 mm		PS [MP]; TS [s]; PF [MP]; TF [s]; n [rpm]	Resistência à tração
(HASSAN et al., 2017).	AISI 316	12 mm	TS [s]; PF [MP]; TF [s]	PS [MP]; n [rpm]	Micro dureza
(AZIZIEH et al., 2015).	ST37 / CK60	15 mm	PS [MP]; TS [s]; PF [MP]; TF [s]	n [rpm]	Micro dureza, Resistência à tração
(WINICZENKO, 2016)	AISI 1020 / ASTM A536	20 mm	TF [s]; n [rpm]	PS [MP]; TS [s]; PF [MP]	Micro dureza, Resistência à tração
(AJITH; BARIK; et al., 2015)	UNS S32205	15 mm	TS [s]	PS [MP]; PF [MP]; n [rpm]; TF [s]	Micro dureza, Resistência à tração
(ATES; TURKER; KURT, 2007)	MA956	9 mm	PF [MP]; TF [s]; n [rpm]; PF [MP]	PS [MP]	Micro dureza, Resistência à tração
(KURT; UYGUR; PAYLASAN, 2011)	AISI 1010-ASTM B22	20 mm	TS [s]; n [rpm]	PS [MP]; PF [MP]; TF [s]	Micro dureza, Resistência à tração
(RATKOVIĆ et al., 2016)	HS 6-5-2-5 / C60	15 mm	n [rpm]	PS [MP]; TS [s]; PF [MP]; TF [s	Microestrutura
(HANDA; CHAWLA, 2015)	AISI 304 / AISI 1021	20 mm	PF [MP]; TF [s]; n [rpm]; PF [MP]	PS [MP]	Micro dureza, Resistência à tração,
(MA et al., 2016)	AISI 1045 / AISI 304	10 mm	n [rpm]	PS [MP]; TS [s]; PF [MP]; TF [s	Resistência à tração
(SHANJEEVI; SATISH KUMAR; SATHIYA, 2016)	AISI 304L / Copper	24 mm	TS [s]	PS [MP]; PF [MP]; TF [s]; n [rpm]	Resistência à tração
(SELVAMANI; PALANIKUMAR, 2014)	AISI1035	12 mm		PS [MP]; TS [s]; PF [MP]; TF [s]; n [rpm]	Resistência à tração
(CHANDER; REDDY; RAO, 2012)	AISI 304 / AISI 4140		PS [MP]; TS [s]; PF [MP]; TF [s]	n [rpm]	Resistência à tração e ao impacto
(CALIGULU et al., 2015)	AISI 1010 / Cu	12 mm	PF [MP]; TF [s]	PS [MP]; TS [s]; n [rpm]	Microdureza, testes de tração
(HASÇALIK; ÜNAL; ÖZDEMIR, 2006)	AISI 4340 / AISI 304	10 mm	PS [MP]; TS [s]; PF [MP]; TF [s]	n [rpm]	Resistência à tração
(ADALARASAN; SUNDARAM, 2015)	Al6061	18 mm	PS [MP]; TS [s]; PF [MP]; n rpm]	TF [s]	resistência, alongamento e microdureza

Todos esses parâmetros afetam as propriedades da solda, alguns efeitos adversos podem ser produzidos em termos da microestrutura e propriedades mecânicas, neste sentido é vital para manter a boa qualidade do processo o conhecimento das variáveis do processo que possuem maior influência sobre as propriedades de saída desejada. (HASSAN et al., 2017) estudaram a evolução das propriedades mecânicas do aço AISI 316 e concluíram que a soldagem CDFW depende essencialmente do fluxo de calor, que por sua vez depende de dois parâmetros, velocidade de rotação e pressão de fricção. Uma investigação experimental relacionada à otimização de parâmetros realizada por (BALASUBRAMANIAN, V. et al., 1999), mostrou que uma alta pressão de forjamento aumenta o aquecimento da interface. Isso ilustra o fato de que a fase de forjamento desempenha um papel igualmente importante na determinação da qualidade da solda.

Estudando a junção entre titânio (Ti) e o aço inoxidável 304L (SS), (DEY et al., 2009) relatou que, o aumento do tempo de fricção, aumenta a geração de temperatura / calor na interface e promove a formação de fases frágeis na interface. Da mesma forma, o aumento da pressão de fricção leva a um aumento na geração de calor / temperatura. Esta combinação provoca a diminuição da resistência da junta, devido à formação de fases frágeis na interface. Já para (WINICZENKO, 2016), aplicando metodologia de superfície de resposta híbrida (RSM) e uma técnica baseada em algoritmo genético (GA), estudou efeito dos parâmetros de soldagem por fricção na resistência à tração de diferentes juntas AISI 1020-ASTM A536. Eles relataram que a pressão de fricção e o tempo de fricção têm um efeito positivo na resistência a tração. À medida que a pressão de fricção e o tempo de fricção aumentam a resistência à tração também aumenta.

De acordo com (OZDEMIR; SARSILMAZ; HASÇALIK, 2007), a alta velocidade de rotação faz com que o aquecimento local na interface atinja alta temperatura em curto espaço de tempo. Os mesmos autores, buscando contribuir para o aprimoramento da técnica, verificaram que, com o aumento da velocidade, a resistência à tração em juntas de aço 4340 melhorou significativamente. Ao passo que (MERCAN; AYDIN; ÖZDEMIR, 2015), estudaram as propriedades mecânicas da solda dissimilar entre o aço inoxidável duplex AISI 2205 e o aço AISI 1020, eles observaram que alta rotação e alta pressão de fricção podem diminuir à resistência à tração. Explicaram que decréscimo na resistência da ligação seja causado pelo aumento do calor temporário da superfície e pela remoção do material plastificado.

Ao passo que, (RAFI et al., 2010) na soldagem da liga de alumínio AA7075, demonstraram que, além da velocidade e da pressão de fricção, o encurtamento axial (burn off) também é um parâmetro significativo, os resultados da pesquisa mostraram que uma combinação de maior pressão de fricção, velocidade e burn off produz uma articulação mais forte. Eles relataram que a razão para isso é que o aumento pressão de fricção e maior velocidade de rotação garantem altas temperaturas na interface de solda, de modo que uma deformação plástica adequada ocorre. O aumento do burn-off, está relacionado a um maior tempo

de forjamento, que por sua vez ajuda a manter a temperatura da interface, estabelecendo um equilíbrio dinâmico entre geração e a condução de calor.

Um aumento na resistência à tração tambem foi observado em outra combinação entre pressão e tempo de fricção por (MA *et al.*, 2015), durante a soldagem entre o aço 1045 e o aço inoxidável 304, com o aumento da pressão e do tempo de fricção. Eles relataram que a razão para isso é que quando a pressão e o tempo de fricção são baixos, o aço carbono e o aço inoxidável não conseguem realizar a ligação metalúrgica, isso porque a temperatura do processo é baixa e a deformação plástica formada é insuficiente.

Da mesma forma (AJITH; HUSAIN; et al., 2015), utilizando a metodologia da superfície de resposta para determinação dos parâmetros ótimos de FW do aço inoxidável duplex (DSS) UNS S32205, concluiu que a pressão de fricção foi o parâmetro mais significativo na mudança de resistência à tração, seguido pela pressão de forjamento e velocidade de rotação. Eles relataram que a razão para isso é que o efeito do aumento da pressão de fricção foi um aumento na resistência à tração. Por causa da maior pressão de fricção, mais calor foi gerado. Também foi verificado que em consequência da aplicação da pressão de forjamento, mais material plástico foi formado como *flashes* e menos material plástico ficou retido na zona de soldagem e grãos finos foram formados na região de solda e na HAZ.

No entanto, com relação à pressão de forjamento, (HAZRA; RAO; REDDY, 2014) estudaram este parâmetro, concluindo que estes não têm efeito sobre a resistência à tração das soldas. (SHANJEEVI; SATISH KUMAR; SATHIYA, 2016) relatou efeitos negativos da pressao de friccao e da velocidade de rotação analisando a resistencia em juntas de aço inoxidável austenítico (AISI 304L) e cobre. O estudo revelou que para alcançar alta resistencia, a pressao de friccao, a velocidade de rotação deve ser mantida tão baixa quanto possível e a pressao e o tempo de forjamento deve ser o mais alto possível. Uma possível explicação para esta observação seria a diferença na condução térmica dos materiais, o que pode alterar a dinâmica do fluxo de material plástico. Com relação ao *flash*, (AZIZIEH *et al.*, 2015) constataram um aumento do *flash* com um aumento na velocidade de rotação, o que provocou a diminuição da taxa de resfriamento, e consequentemente, provocando o crescimento de grãos e a difusão de carbono.(CELIK; ERSOZLU, 2009), demonstrou que a quantidade de *flash* aumenta com o aumento de tempo de fricção, pressao de fricção e pressão de forjamento na soldagem entre AISI 4140 e AISI 1050.

No estudo da dureza, (CHANDER; REDDY; RAO, 2012), investigaram os efeitos dos parâmetros de soldagem na dureza unindo aço inoxidável austenítico (AISI 304) e aço de baixa liga (AISI 4140), foi encontrado que a dureza aumenta com a diminuição da velocidade de rotação. Dessa forma, há a necessidade de se entender o conceito primordial de cada um dos parâmetros, sua relação com a qualidade e o benefício que este trará para o processo. (ATES; TURKER; KURT, 2007) analisaram o efeito da pressão de fricção e

demonstraram sua influência na largura da zona termicamente afetada (HAZ) e na resistência à tração. Do mesmo modo (KURT; UYGUR; PAYLASAN, 2011) perceberam um aumento na resistência à tração. (RATKOVIĆ et al., 2016) destacam em seu artigo as mesmas conclusões obtidas por (HANDA; CHAWLA; ROAD, 2013) de que a pressão axial tem um efeito significativo sobre HAZ e nas propriedades mecânicas da junta de soldagem. Neste contexto, é importante considerar a argumentação de (GRANT et al., 2009) de que o aumento da pressão de fricção reduz a largura da HAZ. Já o tempo de fricção é definido como o período a partir do contato inicial entre as peças até o momento em que a rotação é bloqueada. Este parâmetro que determina as condições de temperatura do processo é significativamente influenciado pela força axial e pela velocidade rotacional. No dizer de (BASHEER et al., 2013), o efeito do tempo de fricção tem uma importância significativa, pois não só define a microestrutura na interface, mas também afeta a profundidade de aquecimento e, portanto, a largura da HAZ.

Por fim, o *burn-off* que descreve a quantidade de material plastificado e é usualmente uma medida de deslocamento axial ou encurtamento da peça de trabalho, controla, desse modo, o ciclo de soldagem e influencia as suas propriedades. (LI, WENYA; WANG, 2011) realizou experimento utilizando CDFW em aço macio e analisou as influências da pressão axial e da velocidade de rotação no *burn off*. Os resultados mostraram que com o aumento da pressão axial, o *burn off* será maior. Achados semelhantes foram observados com o aumento da velocidade de rotação. Além disso, com o aumento do tempo de atrito, o *burn off* aumenta linearmente com o tempo. Um problema recorrente é relatado por (SCHMICKER; NAUMENKO; STRACKELJAN, 2013), por razões de acabamento das peças trabalhadas, um encurtamento axial final mínimo deve ser alcançado. Além disso, estes desajustes podem trazer perdas não somente para a qualidade, mas também no custo do processo.

Segundo (FAUZI et al., 2010), a qualidade e a resistência da solda dependem da escolha destes parâmetros, que afetam diretamente a geração de calor na interface de atrito das duas peças e a temperatura máxima durante o processo de soldagem. O artigo de (UDAY et al., 2010) enriquece este conceito ao afirmar que o aquecimento excessivo limita a produtividade e desperdiça material, tempo insuficiente pode resultar em aquecimento desigual, bem como óxidos retidos e causar falhas na interface de união. Como pode ser verificado, o principal problema que ocorre em CDFW é a correta combinação dos parâmetros de entrada, uma vez que a natureza das interações é dependente uma da outra. Este fato exerce influência direta na escolha dos parâmetros a serem empregados, pois a combinação destes nem sempre estabelecerá a combinação adequada, sendo às vezes necessário sacrificar a qualidade ou o fator custo. Por sua vez, (HANDA; CHAWLA, 2014), indica que a velocidade de rotação e a pressão axial têm um efeito significativo sobre as propriedades mecânicas, especialmente a resistência à torção, resistência ao impacto e a micro dureza. (CHEN, HAI-YAN et al., 2015) analisaram o Ti-6Al - 4V e, concluíram que com a

variação do tempo de fricção, velocidade de rotação e a pressão de fricção constantes, o volume de *flash* aumentou, provocando também a diminuição da resistência à tração no centro da peça e uma redução na largura da HAZ. Também foi observado que, com o aumento da velocidade de rotação, a resistência à tração aumentou. (SATHIYA; ARAVINDAN; HAQ, 2005), com o objetivo de investigar as propriedades mecânicas do AISI 304 verificou que, com um aumento do tempo de fricção, os resultados do ensaio de tração indicaram que a resistência da articulação é diminuída. Um maior tempo de aquecimento permite a propagação de energia térmica ao longo da direção axial, assim, um maior volume de material é aquecido. Por sua vez, a pressão de fricção controla o gradiente de temperatura na zona de solda e sua intensidade deve ser suficientemente alta para superar o atrito e manter as superfícies em contato. Uma força axial maior resulta num maior encurtamento do material e maior rapidez do processo. Diversas combinações entre os parâmetros de soldagem foram apresentadas na literatura, cada uma das quais apresentando seus efeitos nas propriedades mecânicas da soldagem de diversos tipos de materiais.

No sentido de identificar quais são os parâmetros de entrada mais analisados nos processos RFW, efetuou-se uma análise na base *Web of Science*, anais de conferências e volumes editados de diferentes editores. A pesquisa foi baseada em uma combinação dos termos tendo como palavras-chave RFW, CDFW e IFW. As publicações resultantes foram verificadas (manualmente) a fim de verificar a utilização dos parâmetros de entrada utilizados nas pesquisas. Por fim, um conjunto de 150 publicações foi formado, que serve como base para a análise, que revelou quais são os parâmetros mais estudados, como mostra a Figura 2.5, a seguir:

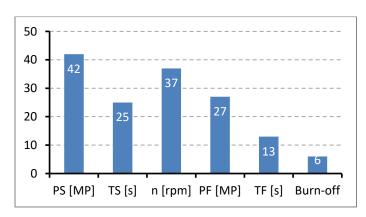


Figura 2.5 - Parâmetros mais estudados em FW

Uma rápida análise permite a identificação das variáveis de entrada mais frequentemente analisadas nos experimentos. Não houve diferenças significativas entre PS [MP] e rotação do motor de acionamento n [rpm], sendo estas as mais analisadas. Os resultados confirmam as conclusões de (OZDEMIR; SARSILMAZ; HASÇALIK, 2007), (RAFI *et al.*, 2010), (MERCAN; AYDIN; ÖZDEMIR, 2015) e (HASSAN *et al.*, 2017). Um detalhe interessante foi observado, alguns pesquisadores utilizaram o controle

do *burn off* em substituição ao TS. Não há nenhum estudo relatado até o momento sobre a seleção de variáveis de entradas relevantes para CDFW. Em geral a motivação para analisar com mais frequência PS [MP] e n [rpm], está relacionada ao fato, que muitos estudos provaram que estes parâmetros podem ser particularmente úteis para avaliar a taxa de produção de calor.

Embora isso seja bem conhecido dos pesquisadores a taxa de calor influencia a deformação e a microestrutura, que por sua vez determina as propriedades mecânicas da junção. Ainda assim, não há análise pertinente para apoiar estas declarações. Por meio da plataforma *Web of Science*, também foi possível coletar dados sobre as propriedades de saída mais analisadas, os resultados são a seguir apresentados na Figura 2.6. Observou-se, que, a característica mais avaliada foi a microestrutura, encontrada em 35 publicações, seguida da resistência a tração e micro dureza.

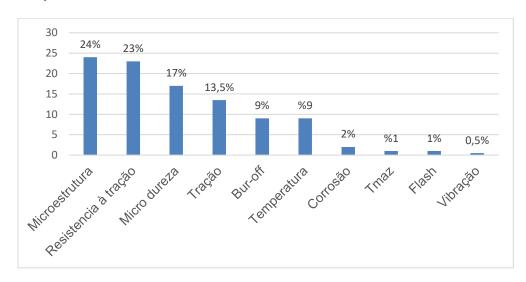


Figura 2.6 - Propriedades do processo mais analisadas

As variáveis de entrada podem apresentar diferentes graus de influência sobre os resultados. Nesse sentido este estudo investigou quais as características mecânicas e físicas são afetadas por essses parâmetros, o Quadro 2.1mostra os resultados.

Parâmetros	Burn off	Corrosão	Flash	Flexão	Impacto	Micro dureza	Microestrutura	Temperatura
Ps [MP]	Х		Х		х	Х	Х	Х
Ts [s]	х		х	х		х	x	
N[rpm]	х		х	х	Х	х	x	x
P _F [MP]		x			Х		x	x
T _F [s]								

Tabela 2.3 – Influência dos parâmetros de entrada no processo

Os resultados apontaram que PS [MP], TS [s] e N [rpm] são os parâmetros mais influentes e com constante relevância na determinação das características mecânicas e físicas do processo. Os resultados apontaram também que Tempo de forjamento TF [s] é a menos influente. Como já citado, os pesquisadores citam que as interações entre os parâmetros também apresentam grande influência no controle dessas características.

2.2.2. A microestrutura

No processo FW as propriedades mecânicas da junta de solda dependem das interações metalúrgicas formadas na região (PALANIVEL; DINAHARAN; LAUBSCHER, 2017). Este processo que afeta a microestrutura do aço carbono devido ao calor gerado para a união das peças (XU *et al.*, 2020).

Que por sua vez é afetada pelo ciclo térmico de soldagem, o processo CDFW é muito complexo, embora a temperatura de interface não ultrapasse a temperatura de fusão do material base, a temperatura de pico na interface é muito elevada, podendo ser próxima da temperatura de solidificação. Este aumento da temperatura provoca uma deformação plástica intensa ao redor da zona soldada, produz uma microestrutura complexa levando a recristalização dinâmica e, finalmente, o refinamento de grãos (RAFI *et al.*, 2010).

Diante disso, (SENKOV *et al.*, 2014) afirmam que este processo envolve gradientes térmicos íngremes, provocando alterações na microestrutura e grandes mudanças da zona de soldagem, cuja espessura depende dos parâmetros estabelecidos e das propriedades termomecânicas do material base. Este efeito, juntamente com a pressão aplicada, provoca variações significativas na microestrutura próxima à junção, esta evolução microestrutural é uma das questões chave do processo. Por conseguinte, a observação da microestrutura da junção de soldagem é baseada na formação da ligação metálica entre os metais base, tudo devido ao processo de difusão.

No entanto, o calor gerado na camada interfacial não é uniforme, o que leva a diferenças na microestrutura e nas propriedades mecânicas da junta ao longo da direção radial (CHEN, HAI-YAN *et al.*, 2015). Sabe-se também que o processo de formação do calor influencia o fluxo de material plastificado e tem um efeito significativo nas microestruturas e nas propriedades da solda (JIN *et al.*, 2018). Igualmente (WANG, GUILONG *et al.*, 2018), investigou a deformação plástica na soldagem dissimilar entre AA1100 e H59 pelo processo CDFW, esclareceu que a deformação superficial e a temperatura de interface são dois fatores importantes que controlam a formação da junção de solda. Para (UDAY *et al.*, 2015), os estudos microestruturais ajudam a compreender as alterações e os fenômenos ocorridos durante a soldagem, portanto, é muito importante entender as mudanças microestruturais na região de ligação, uma vez que essas alterações podem afetar significativamente as propriedades mecânicas.

O gradiente de temperatura e as deformações plásticas determinam mudanças microestruturais. Como a temperatura é altamente transitória e as propriedades do material são fortemente dependentes da temperatura, o processo termomecânico envolvido provoca o surgimento de regiões com diferentes microestruturas.

Algumas regiões microestruturais são comuns a todas as formas de soldagem, enquanto outras são exclusivas de outras variantes FW (NETO; NETO, 2013). A largura e a geometria dessas regiões são dependentes do tipo de material e dos parâmetros utilizados (ÖZDEMIR, N. O, 2005). A Figura 2.7 apresenta as principais regiões da evolução microestrutural (UDAY *et al.*, 2010) e (PALANIVEL *et al.*, 2017):

- (i) zona de contato,
- ii) a região totalmente plastificada,
- (iii) a região parcialmente deformada
- (iv) a região não deformada

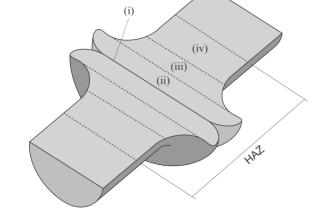


Figura 2.7 – Diagrama esquemático mostrando as principais zonas de reação dentro do componente soldado por CDFW (UDAY *et al.*, 2010)

A zona de contato é a região onde ocorre a recristalização dinâmica para produzir estrutura de grãos finos (KHODIR; SHIBAYANAGI; NAKA, 2006). Nessa região os mecanismos de ligação são a difusão e, no caso de dois materiais diferentes, a formação de fases intermetálicas (SCHMICKER; PERSSON; STRACKELJAN, 2014). A região totalmente plastificada é onde a deformação depende de uma combinação do gradiente de velocidade rotacional e das taxas de pressão axial e radial (ÖZDEMIR, NIYAZI; ORHAN, 2005). A grande deformação sofrida pelo material durante o processo geralmente resulta em uma microestrutura refinada que pode melhorar as propriedades da solda em relação ao material base (LI, WENYA et al., 2012). A largura dessa região aumenta da região central para a periférica, isso ocorre porque a taxa de geração de calor é maior na periferia comparada com o centro (DEY et al., 2009). A região parcialmente deformada é caracterizada por grãos parcialmente deformados pela pressão de ruptura que completa o processo de soldagem por fricção e o tamanho do grão é maior (DEY et al., 2009). A região não deformada é a região onde material de base não sofreu nenhuma alteração.

A evolução da microestrutura durante o FW foi estudada por vários pesquisadores, embora exista falta de conformidade em relação à formação e classificação dessas regiões, pesquisadores utilizando diferentes materiais, estudaram o tema. (OZDEMIR; SARSILMAZ; HASÇALIK, 2007), indicaram a existência de quatro regiões diferentes na interface de solda, que foram identificadas como Zona de material base (BM), Zona parcialmente deformada (PDZ), Zona deformada (DZ) e Zona totalmente deformada plastificada e recristalizada (FPDZ), em sua pesquisa utilizando o aço de liga AISI 304L a AISI 4340. Ao passo que, (FAUZI et al., 2010) e (UDAY et al., 2011), identificaram três diferentes regiões na interface de solda com alumínio 6061, ou seja, Zona não deformada (UZ), Zona deformada (DZ) e Zona totalmente deformada e recristalizada (FPDZ). (ETESAMI et al., 2015), também estudaram ligas de alumínio, os resultados experimentais registraram três regiões, Zona recristalizada (RZ), Zona deformada (DZ) e Zona parcialmente deformada (PDZ).

Por outro lado, é sempre bom lembrar que em metais similares, uma microestrutura homogênea com uma distribuição relativamente uniforme é formada de ambos os lados da peça, variando ligeiramente entre a parte fixa e a rotativa. Na soldagem de metal dissimilar, a extensão da deformação dos dois metais difere (DEY *et al.*, 2009). A Figura 2.8 mostra a macroestrutura de uma solda produzida por uma combinação de parâmetros, deve-se notar que as linhas de fronteira entre as regiões são lineares e estão muito bem definidas. É visível a mudança microestrutural nas regiões que foram influenciadas termomecanicamente em ambos os lados da superfície de soldagem. Esta visibilidade indica uma seleção ideal de parâmetros, que gerou o calor suficiente para provocar as deformações, e consequentemente, a formação da junção sem defeitos. Verifica se também a formação de um *flash* simetricamente uniforme formado em torno da peça.

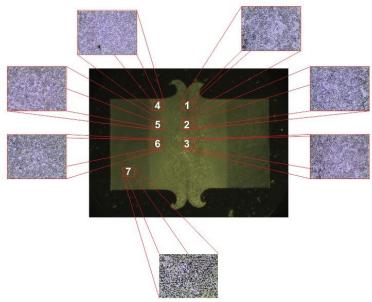


Figura 2.8 – Microestrutura da junta CDFW de metal ASTM A36 produzida a 700 rpm e 60 mm / min: visão geral da seção transversal e da definição da zona, (1, 2, 3, 4, 5, 6 e 7) e a visualizações ampliadas das regiões marcadas em (1), (2), (3), (4), (5), (6) e (7).

A influência na microestrutura devido à ação termomecânica é mostrada na Figura 2.8, nas micrografias das diferentes regiões da junta processada por CDFW, '1', '2' e '3' mostra a região totalmente plastificada, '4', '5' e '6' a região parcialmente deformada e '7' a região não deformada. Os grãos originais são deformados e reorientados durante o processo, pode-se verificar que, as microestruturas nas regiões próxima a junção de solda são relativamente mais finas que o metal base. Isso é provocado pela entrada de calor resultante das diferentes velocidades na superfície de atrito. Por outro lado, as diferenças das taxas de resfriamento no sentido radial e axial contribuem com esta transformação.

Recentemente, grandes esforços foram feitos para analisar a microestrutura em CDFW, (MEISNAR et al., 2017b) investigou os efeitos dos parâmetros pressão de atrito e pressão de forjamento na microestrutura das juntas soldadas por fricção rotativa de AA6082 e Ti-6Al-4V. As técnicas ultrassônicas são amplamente utilizadas na inspeção não destrutiva de diversos materiais. Mais comumente, o ultrassom é usado para detectar defeitos internos; no entanto, existem outras aplicações como a medição de tensões mecânicas e a caracterização elástica e microestrutural de materiais (VIANA et al., 2021).

(LI, XUN *et al.*, 2016), estudou o efeito da velocidade de rotação na caracterização da microestrutura e avaliou as propriedades mecânicas de juntas TC4 / SUS321. (CHENITI *et al.*, 2019), analisou o efeito do tempo de fricção na microestrutura do inoxidável austenítico AISI 304 L. (KURT; UYGUR; P2021AYLASAN, 2011), verificou que o tempo de forjamento, o tempo de fricção e o encurtamento axial desempenham papéis importantes nas propriedades mecânicas da solda.

(WANG, GUILONG *et al.*, 2018), analisou a evolução microestrutural do aço inoxidável AISI 304, verificando que os grãos crescem gradualmente com o processo de soldagem. Portanto, o tamanho do grão é o efeito resultante do calor de atrito, da taxa de deformação e do resfriamento. Como o tamanho do grão é reduzido pelas altas taxas de deformação durante o processo, a resistência e a tenacidade são melhoradas em comparação aos processos de soldagem por fusão (NU; LOC; MINH, 2021).

Em geral, estes estudos apontam que a formação da microestrutura é altamente influenciada pelos parâmetros de entrada (PS [MP]; TS [s]; n [rpm]; PF [MP]; TF [s]), por este motivo, a seleção apropriada de parâmetros é importante. A formação da microestrutura, bem como os métodos para a sua investigação, são bem conhecidos, mas existe uma lacuna, entender melhor a sua formação em materiais dissimilares e seu impacto na formação da junção, ainda há falta de informação para a caracterização da microestrutura e relacionar as observações com os parâmetros de soldagem. Esta analise pode indicar roteiros para uma completa identificação dos constituintes microestruturais e o desenvolvimento futuro de novas combinações de materiais a serem utilizados em FW.

2.2.3. A transferência de calor no processo CDFW

A natureza rápida do processo e o fato de a interface das peças de trabalho não poderem ser observados durante a soldadura não permitem uma melhor compreensão do processo de transferência de calor. A soldagem CDFW é muito eficiente em termos energéticos, dessa forma, a transferência de calor é um dos aspectos mais importantes deste processo.

Por sua vez, mais de 90% da energia consumida na deformação plástica é transformada em calor, embora uma pequena fração da energia seja armazenada no material como energia de deformação (KAPOOR; NEMAT-NASSER, 1998). É um processo complexo devido aos fenômenos que se desenvolvem na superfície, a geração de calor por fricção na interface, a geração de calor por deformação plástica e a perda de calor para o meio ambiente. Deve-se chamar a atenção também para o fato de que, embora a geração de calor na soldagem por atrito seja diferente do processo de fusão convencionalmente disponível, existe uma espécie de similaridade na distribuição de temperatura da soldagem ao material base, esta observação é confirmada na pesquisa realizada por (FAUZI *et al.*, 2010). Está bem estabelecido de acordo com (TRANCOSSI; DUMAS, 2010) que a fase de aquecimento envolve quatro características físicas: Força axial; Velocidade de rotação; Torque; Tempo.

Outro fator importante é descrito no trabalho de (LI, WENYA *et al.*, 2016), em que o tipo de material tem pouco efeito sobre a temperatura da interface normalizada, com exceção das ligas de Titânio.

Estudando as distribuições de temperatura, (BU *et al.*, 2011) concluíram que a distribuição de temperatura na direção radial da solda é desigual, a temperatura aumenta gradualmente com o aumento da distância do centro. O atrito é mais intenso em direção à superfície externa, comparado à parte central, aumentando radialmente do centro da peça para a periferia. Já na direção axial, quanto mais curta for a distância da superfície, maior será a taxa de aumento de temperatura e maior será a temperatura de pico (SINGH, SHAILESH K. *et al.*, 2014).

Esta variação de temperatura é devido ao efeito de resfriamento por convecção e a diferentes valores de coeficiente de transferência de calor nas peças do lado rotativo e fixo, o que resulta na distribuição de temperatura não uniforme ao longo a direção axial (LI, XUN *et al.*, 2018). Isso resultará em uma deformação severa e a formação de regiões não homogêneas na articulação (LI, PENG *et al.*, 2018).

Um diagrama esquemático foi proposto para interpretar o efeito da geração de calor e as distribuições de temperatura típicas. A distribuição do fluxo de calor gerado em materiais similares e dissimilares no processo de soldagem CDFW, são mostradas na Figura 2.9.

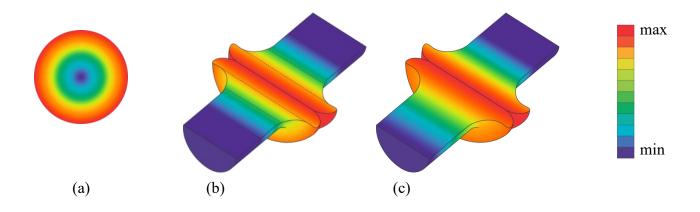


Figura 2.9 – Ilustração esquemática da distribuição de temperatura soldagem CDFW:

- (a) Distribuição de temperatura no sentido radial (NU et al., 2019);
- (b) Distribuição de temperatura no sentido longitudinal material similar (SCHMICKER; NAUMENKO; STRACKELJAN, 2013);
- (c) Distribuição de temperatura no sentido longitudinal material dissimilar (THIEN et al., 2016).

É sempre bom lembrar que a distribuição de temperatura em peças similares é semelhante de ambos os lados, variando ligeiramente entre a parte fixa e a rotativa. Na soldagem de metal dissimilar, a extensão da distribuição de temperatura é diferente entre os lados. (SONG *et al.*, 2008), concluíram que entrada excessiva de calor inevitavelmente reduz a área de união efetiva e a força de adesão nas áreas centrais é obviamente maior do que nas áreas periféricas. Já (LIANG, 2011), encontrou que a velocidade afeta o campo de temperatura. Similarmente, (CHENG, 1962) estudou a distribuição de calor no componente estacionário e confirmou que o coeficiente de atrito não permanece constante ao longo do ciclo, variando em função da velocidade, pressão e condições superficiais. Por conseguinte, (DAVÉ; COLA; HUSSEN, 2001) afirmam que a temperatura próxima à região de soldagem possui um impacto significativo na formação do *flash*, na HAZ e na resistência das juntas.

No entanto, (UDAY *et al.*, 2015) relacionaram a diferença de velocidade entre o centro e a extremidade da peça, como causa de uma possível produção de calor não uniforme na superficie da peça, uma vez que a velocidade de rotação da região interior é menor do que a região exterior e, assim, o calor gerado na região interior é menor do que a região exterior. De forma semelhante, (KAHVECI; CAN; CIHAN, 2005), analisando a transferência de calor em hastes cilíndricas similares e dissimilares de diferentes diâmetros, constataram que o calor gerado é proporcional ao raio da interface e, por consequência, a temperatura aumenta do centro para a superfície, caindo ligeiramente em direção à periferia devido ao efeito de convecção.

Em síntese, esta variação de temperatura deve-se ao gradiente de velocidade por meio da propagação de calor e de outros parâmetros, como a pressão e o atrito. Dessa forma, a distribuição de temperatura

aumenta do centro para a superfície externa. Por outro lado, uma vez que as superfícies exteriores das peças estão em contato com o ar externo, a temperatura desses locais não atingirá o valor máximo.

Portanto a evolução da temperatura durante o processo é uma questão a ser estudada, a validação experimental é difícil devido à intensa deformação na interface. Também devemos considerar as difículdades na utilização de instrumentos de medição direta ou indireta de temperatura. Por isso, modelos e simulações são costumeiramente utilizados como ferramentas científicas para responder a alguma questão específica do processo. A Figura 2.10 ilustra a porcentagem das ferramentas científicas utilizadas nos artigos analisados.

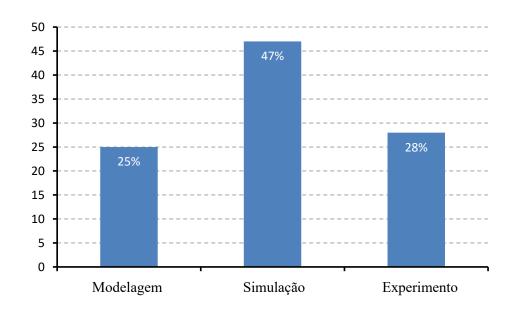


Figura 2.10 – Ferramentas científicas utilizadas no estudo de transferência de calor

Devido à complexidade do processo a modelagem e simulação são utilizadas pelos pesquisadores devido à facilidade e rapidez. Estas podem fornecer evidências convincentes e confiáveis, impossíveis para se fazer de maneira experimental. E é sem dúvida, a maneira mais eficaz de estudar a transferência de calor em CDFW.

Em comparação com estudos experimentais a aplicação da modelagem em CDFW, pode ser utilizada para reduzir os custos, fornecem uma boa maneira de qualificar e quantificar os efeitos diretos e a interação dos parâmetros do processo nas respostas, além de facilitar a compreensão dos fenômenos físicos do processo (SCHMICKER; PERSSON; STRACKELJAN, 2014). Muitos estudos numéricos têm sido conduzidos para investigar os fenômenos em CDFW, a maioria dos modelos numéricos são baseados em Mecânica dos Sólidos Computacionais (CSM), Dinâmica dos Fluidos Computacional (CFD), que foram estabelecidos para simular o fluxo de material. Por outro lado, simulações computacionais são amplamente utilizadas para avaliar a dinâmica CDFW e para investigar os efeitos de mudanças nos parâmetros, estimar

a geometria da zona afetada pelo calor, o volume do *flash* e principalmente avaliar as variações de temperatura em regiões de difícil leitura por instrumentos de termometria. Os autores dos artigos fazem referência à aplicação da modelagem como solução integrada à simulação e em alguns trabalhos aos experimentos como forma de validação e resolução de problemas.

Por outro lado, os experimentos foram utilizados em 28% dos artigos pesquisados, no entanto, sofrem de várias limitações, tais como dificuldades em testar a temperatura da zona de agitação e dados limitados do campo de temperatura (XIAO *et al.*, 2017).

Na pratica alguns detalhes precisam ser resolvidos, para possibilitar a correta coleta e o processamento de informações: falta de precisão e repetitividade; fragilidade de sensores na medição direta; interferências externas na medição indireta e alto custo de instrumentação.

Portanto, é importante que esses detalhes sejam resolvidos para que os dados possam ser usados para melhorar a qualidade do processo.

2.2.4. Os defeitos típicos

Como já descrito, CDFW não apresenta apenas vantagens em relação aos processos convencionais, também apresenta limitações, as mais importantes são variações na qualidade e os defeitos. Apesar de toda a atenção dada pelos pesquisadores, falhas na junção de soldagem permanecem até hoje, como uma característica indesejável do processo FW. Isso é especialmente verdadeiro quando se trata de RFW, as falhas na sua maioria são causadas pela distribuição irregular de temperatura, nas regiões axial e radial. Ainda não existe uma definição global para definir a qualidade no processo CDFW, algumas pesquisas foram realizadas para definir a qualidade e métodos de avaliação estão sendo estabelecidos.

Por sua vez, a utilização de condições de soldagem, que não são ideais pode levar à produção de defeitos, em geral, há uma certa gama de combinações dos parâmetros de entrada do processo, que resultam em uma boa qualidade da solda. Uma taxa inadequada de aquecimento pode resultar na formação de defeitos como a falta de penetração, a falta de fusão, túneis, vazios, sulcos de superficie, *flash* não simétrico, *burn off* elevado e alterações na macro e microestrutura. O *flash* não é, em todos os casos, indesejável e é frequentemente usado como um indicador visual da qualidade da junção. A formação do *flash* é o primeiro indicador da qualidade da junção (JI, SHU DE *et al.*, 2012). A Figura 2.11 mostra a aparência da peça de ASTM A36, soldada e usinada.

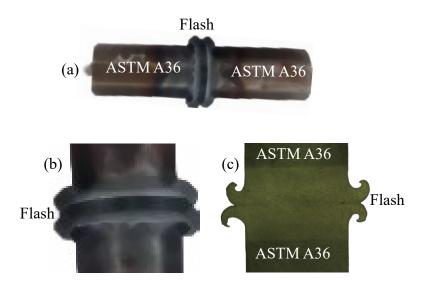


Figura 2.11. (a) Aparência da junta de soldagem, (b) rebarba ampliada e (c) seção transversal. Fonte: Autoria própria (2022)

Uma ocorrência típica de *flash* deformados e falhas na junção devido ao calor insuficiente é mostrada respectivamente nas Figura 2.12(a) (b).

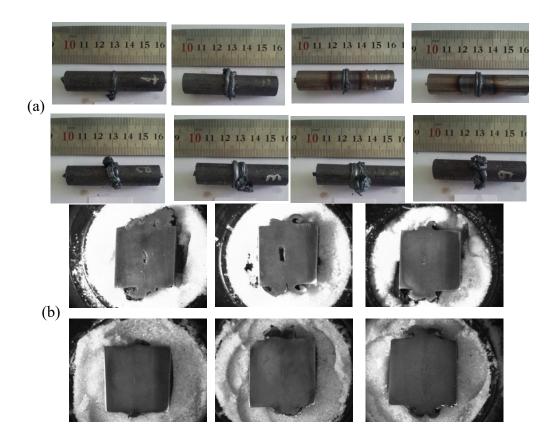


Figura 2.12 - Defeito devido ao calor a devido insuficiente de calor (a) visão externa do corpo de prova sodado por CDFW, (b) visão interna do corpo de prova sodado por CDFW

Fonte: Autoria própria (2022)

Juntas de boa qualidade apresentam *flash* uniformes e simétricos, indicando que o calor de fricção foi suficiente para plastificar o material (MAHAJAN *et al.*, 2023).

Danos externos ocasionalmente podem ser visíveis, e podem provocar nas superfícies internas falhas muito mais severas. Neste contexto, o conhecimento dos diferentes defeitos e falhas, permite ao pesquisador acompanhar a evolução e seu impacto sobre a integridade da solda. A deformação da superfície de contato, proporcional ao comprimento de queima (*burn off*), desempenha um papel importante na determinação da qualidade da união (LIU, HUIHONG; FUJII, 2021), ou seja, uma baixa pressão de atrito não provoca uma deformação superficial dificultando a ligação atômica, que deterioraram significativamente a qualidade da junta. Um valor de burn-off alto pode indicar uma boa ligação atômica entre as superfícies, garantindo uma boa qualidade. A qualidade da junção de solda RFW pode ser descrita em termos de características microestruturais e mudança no comprimento da peça de trabalho, muitas vezes chamada *burn off*

(RAIMONDI *et al.*, 2021). O *burn-off* esta diretamente correlacionado com o *flash*, uma aumento do *burn-off* significa um *flash* com alto valor.

Na Figura 2.12 (a), os defeitos são formados na menor velocidade de rotação, o que provoca uma entrada de calor insuficiente, é possível verificar na imagem uma grande massa de *flash* que foi ejectada para o exterior devido ao amolecimento do metal e pela entrada de calor insuficiente na região da HAZ.

Na Figura 2.12 (b), o defeito está localizado na parte interna, o desenvolvimento irregular do calor, combinado com o resfriamento provocado pela convecção entre a peça e o meio ambiente podem induzir estresse residual (DONG *et al.*, 2014) O centro de interface de solda apresenta morfologias com rachaduras/vazios visíveis, enquanto a periferia mostra morfologias significativamente diferentes devido a diferentes condições experimentais. Por outro lado, as diferentes temperaturas no centro e na periferia são significativamente visíveis, a falhas estão concentradas no centro e reduzidas na periferia. O centro geralmente mostra uma qualidade mais alta do que a periferia na junção de solda.

A prática de usar uma alta velocidade de rotação pode melhorar a qualidade da solda, mas depende da interação entre os demais parametros. O efeito combinado desses parametros tambem pode aumentar o burn – off, que em alguns processo é indesejavel (NIE et al., 2014). Além disso, (SAHIN, MUMIN; ÇIL; MISIRLI, 2013), concluiu que diferentes metais têm diferentes durezas e diferentes pontos de fusão, em consequencia forma fases frágeis intermetálicas ou eutécticas com baixo ponto de fusão na superficie de união. De acordo com (YILBAŞ et al., 1995), a redução da limpeza da superficie em termos de contaminantes, especialmente graxa, reduz a qualidade da junta soldada, de acordo com o resultado do trabalho pode gerar defeitos. A natureza rápida do processo e o fato de a interface das peças de trabalho não poderem ser observados durante a soldadura inibe uma melhor compreenção desse fenomeno.

A Figura 2.13 ilustra uma geometria de solda típica de uma junta de solda obtida a uma velocidade de rotação de 1250 rpm e pressão de fricção de 300 Mpa e 2500 rpm e pressão de fricção de 805 Mpa, com o tempo de fricção de 11 e 19 segundos. A geometria de solda é um aspecto significativo que demonstra a qualidade da junta soldada. É possivel verificar diferentes formas e larguras das zonas de soldagem, junta mais larga indica que a velocidade de rotação e tempo foi elevado, consequentemente maior produção de calor e de material plastificado. Em baixa rotação a largura será mais estreita, isso pode ser devido ao fato de baixa geração de calor, consequentemente menor produção de calor e de material plastificado. De acordo com, (LIU, H. J.; LI; DUAN, 2013) um TMAZ estreito é benéfico para as propriedades mecânicas.

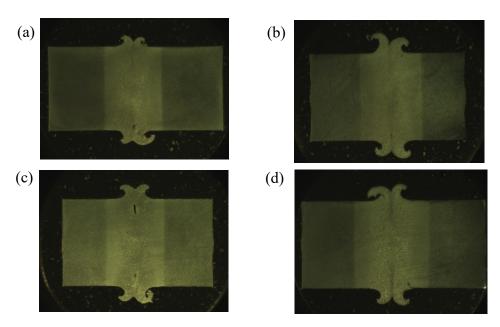


Figura 2.13 - Macroestruturas das juntas soldadas em várias velocidades de rotação: (a) 1250 rpm, 300 MPa (b) 2500 rpm, 300 MPa, (c) 1250 rpm, 805 Mpa, (d) 2500 rpm, 805 Mpa (lado rotativo e o lado estacionário).

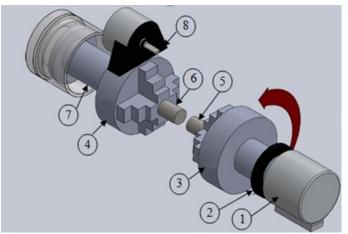
Fonte: Autoria própria (2022)

O calor gerado na interface de soldagem resulta em transformações no material base, criando zonas de material com diferentes grãos, a macroestrutura e a microestrutura desenvolvida durante o processo também pode caracterizar a qualidade da junção A distribuição e o tamanho das partículas afetam as propriedades mecânicas. Partículas pequenas e uniformemente dispersas por todo o metal de solda, pode resultar em uma peça de trabalho com boas propriedades mecânicas (CHAINARONG; MEENGAM; TEHYO, 2017). De acordo com (NU; LOC; MINH, 2021), uma alta pressão de forjamento, produz estruturas de grãos finos, o que garante uma alta resistência à tração e microdureza.

2.2.5. Equipamento CDFW

Com a crescente competitividade industrial, um dos pontos chave para o desenvolvimento e a difusão do processo é o investimento em máquinas e projetos e, consequentemente, a busca de alternativas mais eficazes em substituição às técnicas tradicionais existentes. Na prática, (UDAY et al., 2010) explicam que este processo emprega uma máquina que é concebida para converter energia mecânica em calor na junta de soldagem, utilizando o movimento rotativo entre as peças de trabalho, sem a utilização de energia elétrica ou de outra fonte de calor. Em geral, no processo CDFW, verifica-se que pesquisadores procuram adequar equipamentos existentes às suas necessidades de trabalho. Dessa forma, diferentes sistemas são utilizados, dentre os quais podemos citar o torno mecânico, o torno CNC e a fresa. Embora sejam soluções extremamente providenciais, há uma carência de equipamentos mais adequados. Um dos motivos para isso, segundo (ARULARASU; JOTHILINGAM, 2012), reside na necessidade de um alto investimento para a obtenção dos equipamentos específicos disponíveis comercialmente que, em sua maioria, é voltado à indústria, dificultando estudos científicos que necessitam de equipamentos com flexibilidade de operação e controle.

A busca pela melhoria do processo leva à necessidade de equipamentos e sistemas de medição de desempenho rigorosamente definidos. Para realização de um experimento o equipamento precisa de alguns componentes, uma configuração experimental do equipamento é mostrada na Figura 2.14. Muitos fatores chave, como torque do motor, controle de velocidade, etc., desempenham um papel importante.



- 1– Motor
- 2 Freio
- 3 Mandril rotativo
- 4 Mandril fixo
- 5 Peça de trabalho rotativa
- 6 Peça de trabalho fixa
- 7 Atuador elétrico
- 8 Gerador de vibração

Figura 2.14 – Configuração experimental para soldagem CDFW

A princípio, devem-se levar em consideração as particularidades no sistema de controle, como o controle de velocidade e de força de soldagem, estas restrições podem comprometer o resultado do processo,

isso porque, de acordo com (DONATI et al., 2015), essas grandezas afetam diretamente a propriedades da junção.

Por outro lado, a eficiência do equipamento dependerá de uma série de fatores que, por sua vez, dependem do nível de automação implantado na modificação e deve permitir intervir de tal forma que parâmetros possam ser amplamente alterados durante o processo, uma vez que a confiabilidade dos resultados dos ensaios está associada à comprovação da competência técnica do equipamento que os realiza.

Considerando essa realidade, esforços devem ser realizados no sentido de aprimorar os equipamentos existentes ou, ainda, como relata (TITILAYO; MAKUNDWANEYI; AKINWALE, 2012), desenvolver novas alternativas, com estrutura flexível, aberta, de fácil operação e adaptação aos diversos tipos de materiais submetidos ao processo de junção e suas possíveis combinações. O equipamento também deve permitir que os parâmetros fundamentais possam ser ajustados dentro de uma larga faixa, mas também garantir que novos recursos sejam incorporados com a instalação de novos controles, sensores e atuadores.

(MENDES et al., 2016b), em seu trabalho, propuseram algumas características técnicas essenciais para um equipamento FSW, que deve ser escolhido de acordo com a força, rigidez, precisão, detecção, tomada de decisão e flexibilidade. Existem inúmeras publicações sobre o tema, mas por outro lado, poucas publicações sobre equipamentos, dentre os poucos artigos apresentados (SAHIN, MÜMIN, 2004) projetou e construiu uma configuração experimental automatizada e com unidade hidráulica para aplicação da força axial para realização de seus experimentos. O avanço dos microcontroladores de baixo custo tornou possível o desenvolvimento de novos equipamentos, em seu trabalho de pesquisa (BAYINDIR; ATES, 2007b) propõe um equipamento que possibilite a programação e a realização de soldas de forma automatizada, o sistema inclui a unidade hidráulica para aplicação da força axial e um sistema de controle baseado no microcontrolador Microchip do tipo PIC (Peripherical Interface Controller) 16F877. Segundo o autor, este componente foi escolhido por atender às premissas de baixo custo de desenvolvimento, baixo custo de instalação, flexibilidade, facilidade de operação e com baixa taxa de erro. Desde então, a construção desses equipamentos utilizando microcontrolador tem se tornado uma alternativa muito interessante para laboratórios de pesquisa que estejam interessados no desenvolvimento de equipamentos. Seguindo esta tendência, (CELIK; ERSOZLU, 2009) desenvolveu um equipamento utilizando um microcontrolador PIC16F84, mantendo em sua implementação os mesmos conceitos e principalmente os mesmos componentes mecânicos, eletrônicos e hidráulicos propostos por (BAYINDIR; ATES, 2007a). Em outro trabalho (HYNES; SUJANA; NAGARAJ, 2013) utilizaram, juntamente com um microcontrolador PIC16F877, um circuito pneumático para geração força axial. No entanto, nenhum desses estudos foi aproveitado para uso industrial, os principais problemas enfrentados pelos pesquisadores são a falta de informações para o projeto de um mecanismo mais robusto. Podemos observar na Figura 2.15 a porcentagem dos principais equipamentos utilizados no estudo de CDFW.

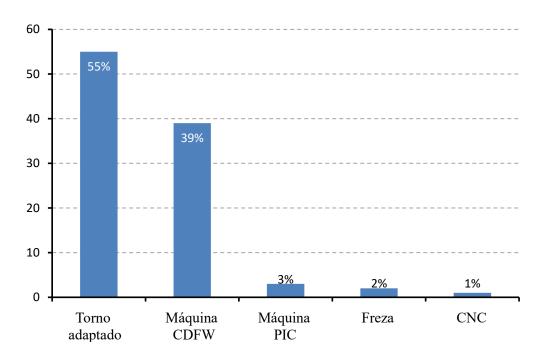


Figura 2.15 – Equipamentos utilizados no processo CDFW

O torno adaptado é sem dúvida o equipamento mais utilizado, seguido de máquinas comerciais desenvolvidas exclusivamente para aplicação em CDFW. Entretanto, apesar de sua comprovada funcionalidade, as plataformas em questão podem apresentar diversas dificuldades para a obtenção de respostas precisas. Para trabalhos futuros, a principal preocupação é a integração de mais parâmetros de processo como entradas e o aprimoramento da capacidade de automação. No entanto, apesar do desenvolvimento, um sistema de controle totalmente automatizado ainda está para se materializar.

A automação de soldagem é focada principalmente na redução do custo total das operações de soldagem, substituindo algumas ou todas as intervenções manuais por sistemas automatizados. Aa introdução da automação tem várias vantagens entre elas a redução de custos trabalhistas, o controle de qualidade e aumento da produção. Um dos motivos para isto, como definem (ARULARASU; JOTHILINGAM, 2012), é a necessidade de um alto investimento para a obtenção dos equipamentos específicos disponíveis comercialmente que, em sua maioria, é voltado à indústria, dificultando estudos científicos que necessitam de equipamentos com flexibilidade de operação e de controle.

Nesta revisão descobrimos que os pesquisadores em sua maioria utilizaram máquinas adaptadas, embora muitos estudos tenham obtido soldas livres de defeitos com os equipamentos atuais. Entretanto,

apesar de sua comprovada funcionalidade as plataformas em questão, empregam atuadores hidráulicos para aplicação da força axial, que podem apresentar diversas dificuldades para a obtenção de respostas precisas, podemos citar a dinâmica pouco amortecida, a não linearidade de zona morta das válvulas de controle e o atrito nas vedações dos atuadores. Esses fatos, combinados com as incertezas ambientais e perturbações externas podem afetar consideravelmente a força axial a ser aplicada (LAVAL *et al.*, 1996) e (HONG, YEH-SUN; DOH, 2004).

Contudo, estes aspectos não tornam o procedimento insatisfatório, apenas podem gerar algumas discordâncias quanto ao valor real do torque aplicado. Neste sentido, uma alternativa viável para superar estes inconvenientes é a possibilidade de utilização de atuadores elétricos, que pode ser justificada em parte pelo grande potencial, isto conduz a uma melhor precisão, uma aceleração mais elevada e uma maior velocidade na movimentação linear (NIKSEFAT; SEPEHRI, 2001).

Com estas premissas em mente, juntamente com o levantamento dos equipamentos e das tecnologias disponíveis, despertou-se o interesse em desenvolver e testar um equipamento para soldagem CDFW, na concepção do projeto será utilizado um sistema de processamento baseado no microprocessador que será responsável pelo controle das variáveis de entrada, buscando promover melhorias no desempenho, usando técnicas de eletrônica digital, tendo como referência as especificações disponíveis no mercado, alguns conceitos básicos e requisitos definidos pela norma *DIN EN ISO* 15620.

Em contrapartida, no sentido de oferecer uma nova opção, para buscar novos e alternativos métodos para melhoria da microestrutura do material, da sua soldabilidade e para tentar solucionar o problema relatado por (MAALEKIAN, 2007), que uma desvantagem do processo CDFW é que a taxa de geração de calor não é uniforme ao longo da superfície de junção das peças, neste trabalho, pretende-se além de englobar os parâmetros anteriores, envolver um novo parâmetro no processo, a vibração.

Para realização dos experimentos uma máquina de CDFW será montada exclusivamente para fins de teste, com todos os controles realizados de forma automatizada permitindo a programação e o monitoramento dos parâmetros de soldagem. O desenvolvimento deste equipamento incluiu a seleção de hardware, projeto e implementação de circuitos de controle, interface de hardware, circuitos de instrumentação, programação de software do microcontrolador, integração de sistemas e testes. Desta maneira espera-se contribuir com o desenvolvimento de novas estratégias para a melhoria do processo, fortalecendo assim a possibilidades de adquirir conhecimentos básicos ainda não disponíveis na literatura.

3. VIBRAÇÃO

3.1. Conceito e aplicação

A análise de vibrações em mecanismos rotativos é essencial para entender o comportamento dinâmico de sistemas que envolvem rotação, como máquinas de CDFW. A frequência natural do mecanismo rotativo pode ser calculada modelando o sistema como um sistema massa-mola (massa rotativa e rigidez do acoplamento). O modelo simplificado pode ser representado pela equação (1) em sua fórmula clássica de frequência natural para um sistema massa-mola:

$$wn = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{m}} \tag{1}$$

Onde:

wn = é a frequência natural,

k é a rigidez do sistema (N/m),

m é a massa do componente rotativo (kg).

Por outro lado, as vibrações podem ser classificadas em diferentes tipos de acordo com as características dos mecanismos de geração. Alguns tipos comuns incluem vibrações livres, vibrações forçadas, vibrações amortecidas e vibrações de ressonância (XING et al., 2020).

Vibrações livres ocorrem quando um mecanismo é colocado em movimento e aplicação de nenhuma força externa agindo sobre ele. Este tipo de vibração é caracterizado pela frequência natural do sistema, que é determinada pelas suas propriedades de massa e rigidez (FIGGIS; BERMUDEZ; LOPEZ GARCIA, 2023; WANG, X. C. *et al.*, 2020). Segundo Rao (2008), a determinação da vibração livre é feita usando o método de separação de variáveis, para um sistema rotativo não amortecido, a equação é dada por:

$$I\ddot{\emptyset} + k\emptyset = 0 \tag{2}$$

Onde:,

I representa o momento de inércia do componente rotativo,

k é a rigidez torcional.

 θ é o deslocamento angular.

A solução dessa equação diferencial nos dá a expressão para o deslocamento angular em função do tempo:

$$\emptyset(t) = A\cos\phi(w_n) + B\sin\phi(w_n)$$
(3)

wn = é a frequência natural,

A e *B* são constantes determinadas pelas condições iniciais do sistema.

As vibrações forçadas ocorrem quando há aplicação de força externa no mecanismo, gerando uma vibração diferente da sua frequência natural. Este tipo de vibração pode ser periódica ou não periódica (MARINO; CICIRELLO, 2022).

Quando um sistema rotativo é submetido a um torque externo harmônico $T_{(t)} = T_0 \cos(wt)$, a equação (4) é:

$$I\ddot{\emptyset} + c\dot{\emptyset} + k\emptyset = T_{(t)} \tag{4}$$

As vibrações amortecidas envolvem a presença de forças que reduz a amplitude das vibrações livres ou forçadas. A fricção, resistência do ar ou materiais que absorvem energia são fontes de amortecimento (FIGGIS; BERMUDEZ; LOPEZ GARCIA, 2023). Para um sistema rotativo amortecido, a equação (5) de é modificada para incluir o termo de amortecimento c:

$$I\ddot{\emptyset} + c\dot{\emptyset} + k\emptyset = 0 \tag{5}$$

O comportamento do sistema depende do fator de amortecimento δ

$$\delta = \frac{c}{2\sqrt{kI}} \tag{6}$$

A troca de energia cinética e energia potencial entre corpos num sistema mecânico é definida como vibração. Para efeitos praticos um corpo é dito estar vibrando, quando ele descreve um movimento de oscilação em torno de uma posição de referência. Quando ocorre o deslizamento entre dois corpos, surge o atrito ou fricção, em direção oposta ao sentido do movimento. Esta força é proporcional à força de contato entre os corpos; a constante de proporcionalidade que é chamada de coeficiente de atrito entre os corpos específicos. De acordo com (CHOWDHURY; HELALI, 2008), a presença de vibração afeta consideravelmente a força de atrito. (TEIDELT; STARCEVIC; POPOV, 2012), acrescenta que a vibração de freqüência e amplitude variável é usada em muitas áreas tecnológicas para controlar e reduzir o atrito. Dessa forma o coeficiente de fricção tem influência sobre a geração de calor por atrito, enquanto a condição

de interface tem um efeito nas características de fluxo de material Por outro lado, (FOROOZMEHR; LIN; KOVACEVIC, 2009), concluiu que a energia vibratória tende a homogeneizar a estrutura, podendo alterar a microestrutura, melhorar as propriedades mecânicas e reduzir defeitos.

Podemos identificar três tipos de energia vibratória: vibração mecânica, vibração sonora, vibração ultrassônica e vibração eletromagnética. Estudos procuram identificar a influência da vibração como uma técnica auxiliar utilizada para melhorar a qualidade dos processos de soldagem, já que a influência da vibração pode causar mudanças significativas neste processo.

Para (JURČIUS; VALIULIS; ČERNAŠEJUS, 2010), para a estrutura atômica dos materiais não há diferença entre a energia introduzida através do calor e a energia introduzida através de vibrações. A vibração transmitidas durante a soldagem pode ser usada para substituir uma parte da entrada de calor total requerida para a soldagem.

Em seu trabalho, (CARBONI; MORONI, 2011), relata que a vibração pode também ser utilizada como entrada de energia para a união direta entre materiais similares e dissimilares.

De acordo com (JOSE; KUMAR; SHARMA, 2015), a vibração mecânica e a vibração electromagnética quando transmitida aos elementos do sistema de soldagem fornecem energia extra, cuja manipulação adequada leva a um melhor desempenho do processo, ativando a difusão. Para (KRAJEWSKI, 2016), o uso hábil de vibrações pode contribuir para aumentar a zona de difusão no estado sólido entre os materiais unidos. (WEN *et al.*, 2015), destaca que a vibração, quer de baixa ou alta frequência, tem sido utilizada na melhoria da qualidade e no desenvolvimento de processos de soldagem. Para (RAO; YAP, 2011), esta energia periódica influência o material de tal forma que a estrutura do grão será refinada, aumentando as propriedades mecânicas das juntas de solda.

De acordo com (PUČKO; GLIHA, 2005), quando aplicado após a soldagem, é geralmente um método de alívio de tensões residuais e minimização da distorção em que as peças são submetidas a vibrações de baixa frequência por um período de tempo. Para o mesmo autor quando aplicada simultaneamente com o processo de soldagem pode afetar o nível de dureza das soldas. Ja para (WEN et al., 2015), a vibração tem efeito significativo sobre a microestrutura e nas propriedades do metal se for aplicada durante a solidificação da fusão. (ANKIRSKII, 1985), aplicou tratamento vibratório durante a soldagem e encontrou uma melhoria significativa nas propriedades mecânicas. A energia aplicada reorganiza a estrutura cristalina, aliviando o estresse e estabilizando a peça, sem distorção. Em geral, as vibrações de baixa freqüência e baixa amplitude são aplicadas às peças de trabalho durante a soldagem.

De acordo com (JURČIUS; VALIULIS; ČERNAŠEJUS, 2010) as vibrações de baixa freqüência, geralmente utilizados têm uma banda de 0 a 100 Hz, carregam energia de alta amplitude e são muito

eficientes na diminuição significativa do pico de tensão residual em peças metálicas e soldas.

O efeito da vibração sobre as propriedades mecânicas do material de base e da solda raramente é examinado, para (KRAJEWSKI, 2016), o impacto desses fenômenos, ainda não está suficientemente compreendido. Em outras palavras, o mesmo tipo de vibração, quando é aplicado a diferentes processos de soldagem, precisa ser estudado separadamente, suas variações e os resultados do processo são diferentes.

(TEWARI, 1994), relataram melhorias nas propriedades mecânicas, com a aplicação de vibração na soldagem SMAW. Igualmente, (MOSTAFAPOUR; GHOLIZADEH, 2014), observou melhorias nas propriedades mecânicas do AISI 304L, induzindo vibração mecânica durante a soldagem pelo processo TIG.

O FW assistido envolve o uso de uma fonte secundária de calor que auxilia o aquecimento primário do processo, resultante da fricção e da deformação plástica da peça de trabalho. Em FSW com o objetivo de melhorar a microestrutura a vibração foi aplicada como fonte de energia auxiliar (MONTAZEROLGHAEM; BADROSSAMAY; TEHRANI, 2012), (LIU, X. C.; WU; PADHY, 2015)(AMINI, S.; AMIRI, 2014).

Existem modos diferentes nos quais a vibração é aplicada à peça de trabalho, tais como vibrações longitudinais ou transversais. Numa onda longitudinal, as partículas do meio em que ela se propaga vibram na mesma direção de propagação da onda nesse meio.

3.2. Vibrações em CDFW

No processo CDFW, devido aos efeitos combinados das forças rotativas, como também pelo fato do conjunto maquina-peça apresentarem deformações especificas, desenvolve-se um sistema complexo e variável de vibrações. Dependendo dos parâmetros utilizados no processo, diferentes graus de fricção e desgaste da peça são produzidos.

Durante as interações das etapas do processo pulsos de curta duração são produzidos, esses pulsos excitam as frequências naturais, resultando em um aumento da energia vibracional, a qual, à medida que é dissipada através da máquina e da peça, excita ressonâncias e coloca uma considerável carga dinâmica adicional no sistema vibratório. As superfícies de atrito das peças a serem soldadas são dinâmicas e apresentam flutuações superfíciais como rugosidade, coeficiente de fricção e ondulações variáveis no tempo e no espaço.

A vibração corresponde a uma oscilação em torno da peça a ser soldada, naturalmente devido aos vários valores do atrito interno o sistema formado reage a forças internas e externas, gerando vibrações em várias frequências. Uma das dificuldades da modelagem do atrito em RFW é a complexidade dos fenômenos térmicos e metalúrgicos nas diferentes velocidades da superfície geradora.

Com base no estudo da literatura, não foi encontrado referencias em estudos de vibração natural, livre e forçada, isso se deve a natureza transitória do RFW. A vibração em sistemas rotativos o fator mais crítico é a velocidade (DELIBAS; KOC, 2020), que corresponde à frequência angular natural do sistema. Em RFW a frequência angular natural on é de aproximadamente 413 rad/s.

A frequência natural do sistema mecânico, que depende da tensão estática, das forças de retenção, da geometria e do momento de inércia, pode ser calculada da seguinte forma pela equação (7):

$$w_n = \sqrt{\frac{2F_S I_S + F_P I_P L}{E_{UC}}} \tag{7}$$

O contato inicial por atrito entre as peças, e a deformação plástica que ocorre durante o processo, pode impactar e causar vibração livre no sistema. O contato por atrito entre a peça e o mandril, colisões entre o *flash* gerado e o ambiente e o movimento rotacional da peça podem causar vibração forçada.

Em RFW, as vibrações livres são importantes apenas para garantir a estabilidade entre as superfícies da peça, enquanto que durante o estágio estacionário as vibrações são de natureza forçada. A energia das vibrações é distribuída de forma não uniforme ao longo do eixo axial da peça. as vibrações iniciais mostram oscilações moduladas amortecidas, enquanto que as vibrações forçadas oscilações instáveis. Devido ao rápido efeito da temperatura que causa o amolecimento (deformação plástica) do material, os componentes

de vibração livre são gradualmente amortecidos, e uma vibração forçada estável é obtida. Na vibração forçada, o aumento da pressão axial aumenta a amplitude do sinal.

Como explica, (MERCAN; AYDIN; ÖZDEMIR, 2015), os mecanismos básicos do processo são a fricção, deformação plástica, extrusão e recristalização. Nesta técnica de estado sólido, pelo menos um dos componentes realiza movimento de rotação sob aplicação de pressão. As combinações desses fatores se manifestam como mudanças nos parâmetros da vibração e contribuem para sua caracterização. O resultado dessas variações são ondas periódicas e aleatórias de vibração, que oferecem a possibilidade de monitorar alterações no equipamento e no processo.

De acordo com, (SALAWU, 1997), a presença de danos ou deterioração de uma estrutura causa alterações nas frequências naturais da estrutura. Para (KESSLER *et al.*, 2016) na etapa final do processo, na peça de trabalho ocorre oscilações de torção, devido a interrupção da rotação, isso também gera um aumento da energia vibracional, e como consequência, pode causar danos ao equipamento e a peça. Além disso, em outros estagio do processo, dependendo dos níveis de vibração, essas alterações podem provocar efeitos adversos, levar a paralisações de produção, e também interferir na junção de soldagem.

Portanto, é indispensável compreender os efeitos das vibrações no processo CDFW, isso pode ajudar na redução de possíveis danos mecânicos no equipamento, aumentando sua eficiência, reduzindo os custos e proporcionando melhorarias nas propriedades da junção. Vários estudos foram conduzidos para explicar e melhorar a qualidade da junção, porém não foi encontrada análise sistemática de vibração no processo CDFW, nas literaturas publicadas. Em síntese, muitos artigos descrevem os benefícios da vibração na junção soldada e não no processo. Em sua pesquisa, (ZAEH; POEHLER, 2011) apresentou um estudo sobre vibração em soldagem por fricção rotativa, seu trabalho é único na tentativa de estudar as vibrações, porém o foco da pesquisa foi à origem das oscilações que se acumulam no interior da peça.

Nos últimos anos, houve um número crescente de publicações, estudos sistemáticos de vibração foram realizados para medir e analisar parâmetros de soldagem por fricção, no entanto, estudos geralmente tendem a se concentrar no processo FSW. A maior parte das pesquisas concentram na aplicação simultânea da vibração em conjunto com as variáveis do processo.

(FOULADI; ABBASI, 2017), concluiu que a vibração diminui o tamanho do grão na região de solda e aumenta a homogeneidade da distribuição de partículas. Para, (MENDES *et al.*, 2016a), além disso, as máquinas de baixa rigidez tendem a causar vibrações excessivas que, por sua vez, podem levar à instabilidade do processo FSW. Resultados semelhantes foram obtidos por (AMINI, S.; AMIRI, 2014), que descreve que uma das estratégias para melhorar o desempenho do processo é a aplicação vibrações ultrassônicas. Considerando que existem poucos estudos sobre o tema, especialmente no processo CDFW,

o objetivo principal deste estudo é aplicar o método de design de experimentos para caracterizar as vibrações provenientes do processo CDFW, seu desenvolvimento e sua progressão subsequente, quantificando as proporções, correlacioná-los com os parâmetros de entrada.

3.3. Sinais de vibração

O funcionamento de qualquer máquina irá gerar alguma vibração, que é composta a partir dos componentes rotativos e até mesmo outras fontes ruidosas. A análise dos sinais de vibração é uma técnica muito poderosa e confiável para monitorar as condições de operação de uma máquina sem interferir no processo (ABBOUD *et al.*, 2017). Em RFW a vibração gerada é bastante complexa, alguns fenômenos geradores de vibração a serem considerados são o atrito, a deformação de materiais não lineares, a geometria da peça de trabalho, a dinâmica e a geometria das outras partes conectadas à junta de soldagem.

Assume-se que os sinais de vibração produzidos em soldagem por fricção é uma mistura de múltiplas fontes de sinais independentes, estas fontes consistem em sinais relacionados ao equipamento de soldagem e ao processo (RABI; BALUSAMY; RAJ JAWAHAR, 2019a). De acordo com(URBANEK; BARSZCZ; ANTONI, 2013), os sinais relacionados ao equipamento, tem influência relativamente insignificante no resultado final do processo de separação.

O sinal gerado repete-se periodicamente a uma taxa determinada pela geometria da peça, tipo de material e pelos parâmetros associados ao processo, velocidade de rotação e pressão axial. Em RFW, a rotação do fuso é a frequência de interesse, que pode ser útil para caracterização do processo. Cada frequência de vibração possui características únicas e, provavelmente, mecanismos de excitação exclusivos. Para cada parâmetro associado, RFW apresenta um sinal de vibração específico, identificado de acordo com o desenvolvimento dos estágios do processo, geralmente influenciados pelos parâmetros, variação das condições de soldagem e condições da peça de trabalho. Parâmetros do processo como força axial e torque variam dinamicamente durante a soldagem (SAHU et al., 2019). Qualquer alteração no processo pode alterar o sinal de vibração e esta condição pode diagnosticar falhas, desgastes na superfície das peças e variações de torque no equipamento. A vibração pode ser definida como três parâmetros, ou seja, amplitude, velocidade e aceleração. A magnitude da vibração é quantificada por seu deslocamento (mm), sua velocidade (m/s) ou sua aceleração (m/s²). Por conveniência, a magnitude da vibração é expressa em termos de uma medida média da aceleração, o valor RMS (m.s²). A vibração induzida por atrito é muito complexa e possui algumas características importantes como assimetria, variância de tempo, estado não estacionário e alta nãolinearidade (HAN, XINGHUI; HUA, 2012). De acordo com definição de (POULIMENOS; FASSOIS, 2006), as vibrações em RFW podem ser definidas como aleatória não-estacionária, caracterizada por propriedades dependentes do tempo (evolucionárias). Do ponto de vista físico, a vibração não estacionária é dinâmica dependente do tempo e não linear, uma vez que amplitude e a frequência do sinal é alterada com o tempo. Devido à rotação e as alterações de massa, as vibrações no eixo x e y são não estacionaria, esta não estacionar idade é evidente a partir da Figura 3.1, onde o sinal de vibração CDFW é representado.

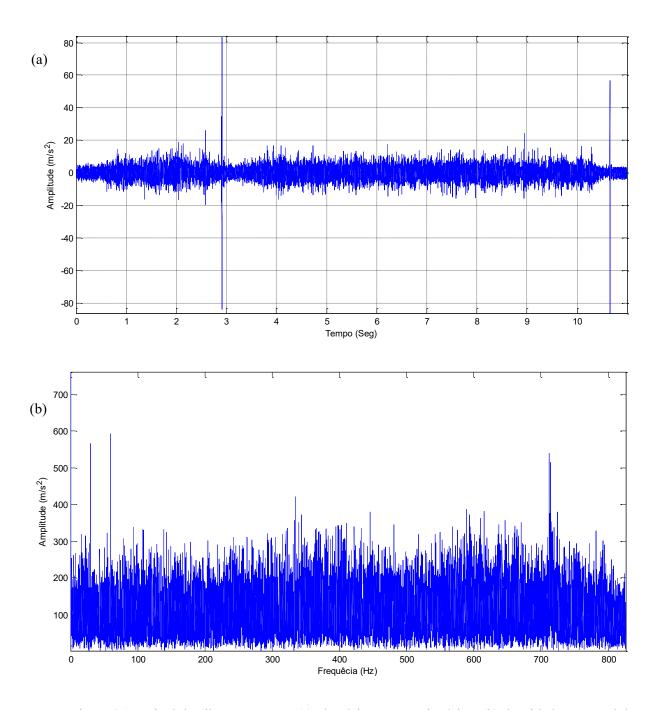


Figura 3.1 – Sinal de vibração CDFW (a) aleatória não-estacionário e (b) densidade espectral de potência dependente do tempo

A presença de não linearidades e seu comportamento não-linear é um problema que dá origem a uma série de dificuldades na análise de sinais de vibração. Torna-se bastante difícil desenvolver um modelo preciso de analise que leve em consideração os diferentes fenômenos que influenciam a dinâmica do sistema. Sabe — se que a amplitude do sinal de vibração dá uma indicação da energia gerada, enquanto que a frequência pode indicar a fonte dessa energia (PENG, Z.; KESSISSOGLOU, 2003)

Assim, a análise e visualização de dados de séries temporais de vibração é um desafio com

importância crescente para os processos de fabricação. Um aspecto fundamental a ser levado em consideração é a seleção do método apropriado para o processamento do sinal adquirido.

Quando o processo de CDFW entra em operação, a frequência natural do equipamento é excitada, resultando em um aumento de potência. Esse pulso é sobreposto, ou seja, sua amplitude é modulada, a um sinal portador proveniente da máquina rotativa. Esse pulso é sobreposto, ou seja, sua amplitude é modulada, a um sinal portador proveniente da máquina rotativa. O comportamento dos sinais no domínio do tempo é mostrado na Figura 3.2.

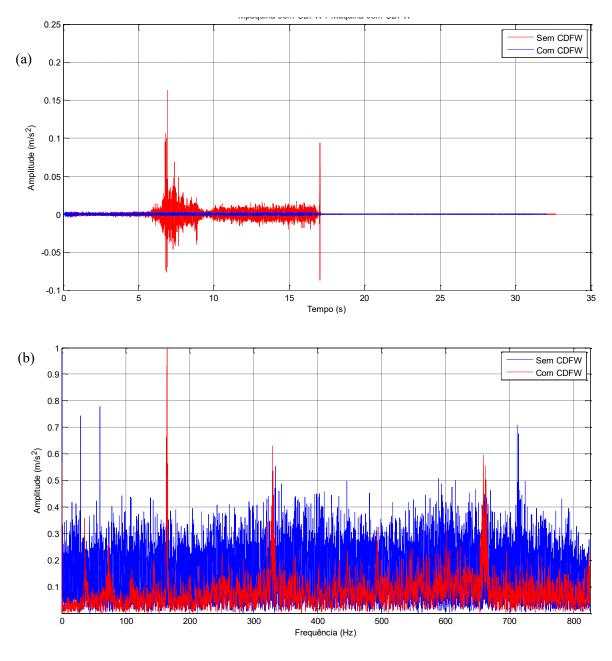


Figura 3.2 – Sinal de tempo sobreposto da vibração com e sem a carga de atrito CDFW (a) domínio do tempo, (b) domínio da frequência

Como mostrado na Figura 3.3, as formas de onda têm vários componentes de frequência que pertencem aos vários parâmetros que são partes do processo CDFW. Essas vibrações originam-se do impacto translacional e rotacional entre as peças, cujas características estatísticas são alteradas periodicamente no tempo. A fim de reduzir a dimensionalidade dos dados e determinar os estágios com maior vibração, os sinais totais foram divididos de acordo com as etapas do processo CDFW (descritas na Seção 2). Neste experimento para identificar mudanças nos sinais de vibração as janelas foram baseadas no primeiro estágio e estabelecida pelo planejamento fatorial.

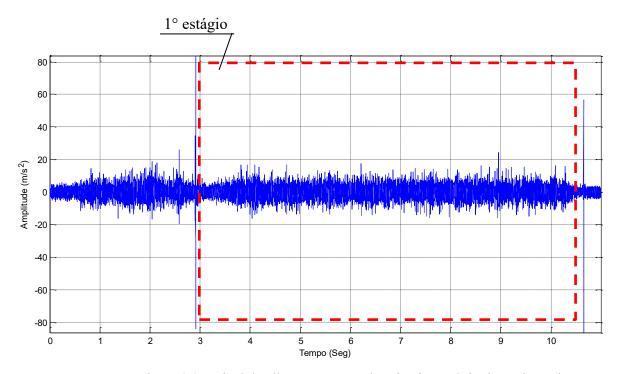


Figura 3.3 – Sinal de vibração CDFW do primeiro estágio dependente do tempo

Como mostrado na Figura 3.3 o sinal original de vibração com a janela referente ao primeiro estágio, denominado de estágio estacionário.

4. TÉCNICAS DE PROCESSAMENTO DE SINAIS

O processamento dos sinais é aplicado para explorar as informações contidas no sinal temporal, aplicando uma ferramenta especifica adequada de acordo com a natureza do sinal, estas informações muitas vezes estão ocultas no domínio do tempo.

Muitas abordagens estão disponíveis para analisar sinais processos não linearmente relacionados. As técnicas de processamento de sinais incluem modelos estatísticos de séries temporais. Para interpretação dos dados outras ferramentas são utilizadas como redes neurais artificiais, lógica Fuzzy, máquina de vetores de suporte, classificadores bayesianos.

Aqui apresentamos uma breve revisão das principais ferramentas disponíveis para o processamento de sinais, os métodos de processamento de sinais tendem a se concentrar em três linhas principais: análise no domínio do tempo, análise no domínio da frequência e análise simultânea do tempo e da frequência.

O método mais utilizado no domínio do tempo é a análise direta no tempo (TDA) devido à sua simplicidade e baixo custo analítico e computacional (HESSAINIA *et al.*, 2013). Os sinais do domínio do tempo são sinais brutos adquiridos dos sensores (acelerômetros). Na análise no domínio do tempo, o sinal é analisado pela variação de alguns índices estatísticos, como média, variância, pico, crista e assimetria ou curtose.

Estas caracterizações estatísticas de fontes determinísticas de aleatoriedade aparente, é realizada por muitos autores, contribuiu muito para analisar as complexidades do comportamento dinâmico do sinal. Esses parâmetros são bem estabelecidos, mostraram-se adequados na detecção de falhas de sistemas rotativos (HUGGETT *et al.*, 2018). (RABI; BALUSAMY; RAJ JAWAHAR, 2019b) Utilizou sinal de vibração no domínio do tempo, e aplicou os parâmetros estatísticos como média, curtose, desvio padrão e fator de crista para validar FSW. De forma similar, (DAS; PAL; BAG, 2015) Aplicou os mesmos parâmetros na análise do sinal da corrente elétrica para validar FSW.

No domínio da frequência, os métodos são a Transformada Rápida de Fourier (FFT) e o da densidade espectral de potência (PSD) (AHI *et al.*, 2017) e (HUGGETT *et al.*, 2018). A análise no domínio da frequência pode ajudar a distinguir vibrações em diferentes frequências geradas por diferentes componentes.(SHRIVASTAVA *et al.*, 2017) aplicou FFT com o objetivo de analisar as frequências dos sinais de pressão axial para detectar a ocorrência de vazios superficiais em FSW.

Na análise de tempo e frequência, os métodos mais comumente utilizados são a transformada de Fourier de curta duração (STFT) e a transformada de *Wavelet* (WT) (FAKIH *et al.*, 2018) e (KUMAR, UJJWAL *et al.*, 2015). O objetivo fundamental da análise de tempo-frequência é entender e descrever as

condições em que o conteúdo de frequência de um sinal muda com o tempo. A transformada *Wavelet* gera espectro de frequência de tempo muito eficaz para analisar o sinal de vibração não-estacionário de um sistema rotativo (RABI; BALUSAMY; RAJ JAWAHAR, 2019c). Numa tentativa de identificar a correlação entre tempo, frequência e geometria das ferramentas, (SA; FALS; JIME, 2012) e (CHEN, CHANGMING; KOVACEVIC; JANDGRIC, 2003) aplicaram a transformada *Wavelet* para caracterização nos domínios de tempo e frequência dos sinais de emissão acústica (AE) de FSW. Estudos semelhantes foram realizados por (MACÍAS *et al.*, 2015), com o objetivo de correlacionar tempo, frequência e torque da ferramenta no processo FSSW. Além disso, em uma pesquisa, (DAS; PAL; BAG, 2016a), utilizou uma combinação entre a transformada de *Wavelet* com a transformada de Hilbert-Huang para identificação de defeitos em SFW.

De modo geral, os algoritmos baseados na transformada de Fourier (como a transformada rápida de Fourier (FFT) ou a transformada discreta de Fourier (DFT)) têm sido os métodos mais amplamente utilizados para analisar os espectros de vibração. A Transformada de Fourier, no entanto, é eficiente quando o sinal que está sendo analisado é estacionário (ou seja, o valor médio, a variância e o conteúdo de frequência do sinal não mudam com o tempo). A fórmula algébrica da DFT para um sinal de entrada x[n] de comprimento N é dada por:

$$X_{[k]} = \sum_{n=0}^{N-1} x[n] e^{-j\frac{2\pi}{N}kn}$$
 (8)

Para k = 0,1,...., N-1

Onde:

X[k] é o valor da DFT no bin de frequência k

X[n] é o valor do sinal no instante n

N é o número total de pontos do sinal

J é a unidade polar

A DFT computa a transformação diretamente e é adequada para sinais de pequeno comprimento devido à sua complexidade O(N2). A FFT, por outro lado, é uma versão otimizada da DFT que reduz a complexidade computacional para O (N.log N) usando um algoritmo de divisão. A fórmula básica da FFT é matematicamente equivalente à da DFT, mas o algoritmo aproveita a simetria e periodicidade dos fatores exponenciais para computar a transformada de forma mais eficiente. Assim, enquanto a DFT é adequada para qualquer comprimento de sinal, a FFT é especialmente vantajosa para sinais de comprimento que são potências de dois, permitindo uma análise muito mais rápida em aplicações práticas.

4.1. Filtragem

A análise de sinal de vibração é um importante indicador para diagnóstico de falhas, é uma ferramenta extremamente eficaz. No entanto, esses sinais são extremamente contaminados com vários ruídos. Com o objetivo de separar as informações de interesse com confiabilidade, a remoção de ruído é uma etapa fundamental no pré processamento de sinais. Existem muitas técnicas de filtragem, incluindo, filtragem Wavelet, filtro de Kalman, decomposição de modo empírico, filtragem adaptativa, filtros IIR (Chebyshev, Bessel, Butterworth), filtro passa-baixa (LPF), filtro passa-alta (HPF), filtro passa-banda (BPF), mediana, entre outros. Por um lado, o processo RFW envolve uma infinidade de fontes geradoras de vibração que podem induzir um ruído de fundo. Por outro lado, a natureza dinâmica do CDFW dificulta a seleção de uma frequência de corte para a filtragem dos sinais. Por esse motivo, nessa pesquisa os sinais foram processados com um filtro mediano de primeira ordem para minimizar o impacto da interferência de baixa e de alta frequência. O filtro mediano substitui cada ponto do sinal de entrada pela mediana das entradas vizinhas e é expresso pela seguinte equação:

$$y_{[n]} = mediana(x_{[n-k],x_{n-k+1},....,x_{[n+k]}})$$
 (9)

Onde:

 $Y_{[n]}$ é o valor do sinal filtrado no instante de tempo n $X_{[n]}$ é o valor do sinal de entrada no instante de tempo n K é a ordem do filtro

O filtro mediano possui vantagens de simplicidade de implementação e menor complexidade computacional. É um processo não linear útil na redução de ruído aleatório presentes nos sinais de vibração. A Figura 4.1 mostra o resultado da aplicação do filtro mediano no sinal de vibração temporal original do processo RFW.

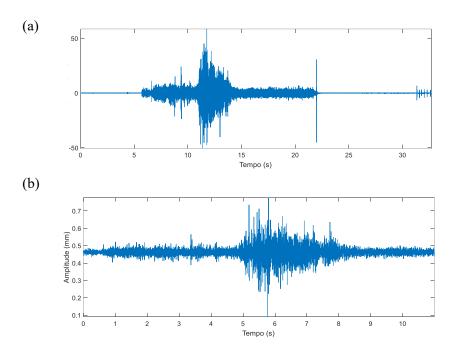


Figura 4.1 – Sinal original temporal de vibração CDFW (a) sem filtro, (b) com filtro mediano

4.2. Transformada de Fourier de curto prazo (STFT)

Pode ser difícil para os olhos humanos identificarem as principais características dos sinais de vibração no domínio do tempo ao da frequência, de forma separada. Ou seja, uma representação de série temporal ou série FT pode fornecer apenas informações de tempo ou frequência do sinal.

Com as informações no domínio do tempo e no domínio da frequência fornecidas simultaneamente, pode ajudar a identificar comportamentos com maior probabilidade de acontecer. Para obter essas informações simultaneamente, a STFT é usada para extrair informações simultâneas do domínio tempofrequência, e também pode ser usado para criar um espectrograma que representa o tempo e frequência no mesmo diagrama.

A STFT separa o sinal em domínios periódicos menores e o multiplica por uma função de janela (janela de Hann ou Gaussiana) e, em seguida, aplica a FFT do sinal da seção resultante. Uma representação esquemática da STFT é apresentada na Figura 4.1, o princípio consiste em segmentar o sinal original com uma janela Gaussiana deslizante, em seguida aplicar a FFT para gerar múltiplos espectros. Adicionalmente, são utilizadas janelas com comprimentos de 0,025 e 0,010 s, respectivamente, o segmento da janela é convertido do domínio do tempo para o domínio da frequência.

A STFT é um algoritmo que foi introduzido para produzir melhores resultados e superar a restrição de tempo da FFT, é um método utilizado por muitos pesquisadores. Uma das vantagens da utilização do espectrograma é em relação a acurácia, o sinal original apresenta acurácia média de 81 %, enquanto que os

dados da imagem do espectrograma apresentam uma acurácia média de 98 % (HONG, GEONKYO; SUH, 2023). O espectrograma ou STFT, calcula múltiplas FFTs e as exibe como frequência ao longo do tempo. É uma técnica que permite uma observação efetiva das características tempo-frequência do sinal temporal juntamente com o nível de energia.

A STFT decompõe o sinal temporal em várias janelas, executando a transformada de Fourier (FFT) em cada parcela para obter as informações de tempo, frequência e energia. Ao gerar um espectrograma o componente de frequência é expresso em função do tempo e de energia. O eixo horizontal é o tempo, o eixo vertical apresenta a frequência e a amplitude é representada por cores em ordem crescente até o amarelo, que corresponde a amplitude mais alta. Ou seja, a magnitude da vibração é mais fraca na escala azul e na escala amarela é mais significativa. A Figura 4.2 mostra o resultado da aplicação do filtro mediano no sinal de vibração temporal original do processo RFW, onde o eixo x representa o tempo em segundos e o eixo y a escala de energia.

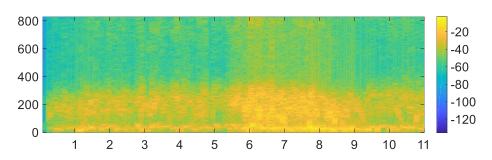


Figura 4.2 – Espectrograma STFT do sinal original CDFW

O espectrograma satisfaz a seguinte condição:

$$X_{(m,w)} = \sum_{n=0}^{\infty} x_{(n)} w_{(n-1)} e^{-jwn}$$
 (10)

Onde:

 $X_{(m,\omega)}$ é a transformada de Fourier do sinal no temporal m é na frequência w $x_{(n)}$ é o sinal no tempo discreto.

w_(n) é a função da janela de tempo discreta.

 $e^{-j\omega n}$ é o termo exponencial complexo.

m é a posição da janela no tempo discreto.

ω é a frequência discreta.

Ao gerar um espectrograma o componente de frequência é expresso em função do tempo e de energia. O eixo horizontal é o tempo, o eixo vertical apresenta a frequência e a amplitude é representada por cores em ordem crescente até o amarelo, que corresponde a amplitude mais alta. Ou seja, a magnitude da vibração é mais fraca na escala azul e na escala amarela é mais significativa. A Figura 4.2 mostra o resultado da aplicação do filtro mediano no sinal de vibração temporal original do processo RFW, onde o eixo x representa o tempo em segundos e o eixo y a escala de energia.

4.3. Decomposição de modo empírico

Os sinais de vibração no domínio do tempo carregam informações insuficientes, é necessário decompô-los e analisá-los de uma perspectiva diferente.

Usando diferentes algoritmos, os sinais de vibração no domínio do tempo podem ser decompostos, esta tese aplica a Decomposição do Modo Empírico (EMD), que é um método de decomposição de sinais não lineares com variação temporal, adequado para analisar um grande número de variações de frequência. Foi proposto inicialmente por Huang (HUANG, NORDEN E. *et al.*, 1998b), este método divide o sinal em várias funções de modo intrínseco (IMF), que são um conjunto de funções oscilatórias e estacionarias. O EMD pode ser descrito através das seguintes etapas:

- 1) Identificação de Extremos:
 - Identifique todos os máximos e mínimos locais do sinal $x_{(t)}$
- 2) Interpolação de Envelopes:
 - Use uma interpolação cúbica spline para conectar todos os máximos locais, formando o envelope superior $e_{\max(t)}$
 - Use uma interpolação cúbica spline para conectar todos os mínimos locais, formando o envelope inferior $e_{\min(t)}$
- 3) Cálculo da Média:
 - Calcule a média dos envelopes superior e inferior:

$$m_{(t)} = \frac{e_{\max(t)} + e_{\min(t)}}{2}$$
 (11)

- 4) Extração do Componente de Detalhe:
 - Subtraia a média do sinal original para obter o componente de detalhe (ou o primeiro IMF candidato):

$$h_{(t)} = x_{(t)} - m_{(t)}$$
 (12)

5) Critério de Parada:

- Verifique se $h_{(t)}$ atende aos critérios de uma IMF:
- 1. O número de extremos e o número de cruzamentos por zero devem ser iguais ou diferir no máximo por um.
- 2. Em qualquer ponto, a média das envolventes superior e inferior deve ser zero.
- Se $h_{(t)}$ não atender a esses critérios, substitua $x_{(t)}$ por $h_{(t)}$ e repita os passos 1- 4 até que os critérios sejam atendidos. Esse processo é chamado de "sifting".

6) Armazenamento do IMF:

• A primeira IMF $c1_{(t)}$ é armazenado: $c1_{(t)} = h_{(t)}$

7) Resíduo:

• Subtraia $c1_{(t)}$ do sinal original para obter o resíduo:

$$r1_{(t)} = x_{(t)} - c1_{(t)}$$
 (13)

8) Iteração:

- Repita os passos 1-7 para o resíduo r1(t) para extrair os próximos IMFs $c2_{(t)}$, $c3_{(t)}$, ..., $cn_{(t)}$ até que o resíduo final $r_{n(t)}$ seja uma função monotônica ou uma função que não permita mais extrações de IMFs significativas.
- Finalmente, o sinal original $x_{(t)}$ pode ser representado pela equação (14), como a soma de todas as IMFs extraídas e o resíduo final:

$$x_t = \sum_{i=1}^{n} c_{i(t)} + r_{n(t)}$$
 (14)

Onde:

- $c_{i(t)}$ são as IMFs
- $r_{n(t)}$ é o resíduo final

Cada IMF possui as características de frequência do sinal original, as primeiras IMFs possuem as informações de alta frequência, e as finais possuem as informações de baixa frequência. Cada IMF subsequente contém oscilações de frequência menores do que o IMF anterior, de natureza oscilatória, sua amplitude e frequência pode variar ao longo do tempo. É um método que pode reduzir o ruído presente no sinal não estacionário, muito eficiente capaz de decompor qualquer sinal complexo (RABI; BALUSAMY;

RAJ JAWAHAR, 2019a). Portanto, a decomposição dos sinais originais em IMFs individuais ajuda na análise das características e eliminando ruídos indesejáveis. Uma característica do EMD é atuar como um filtro passa-banda, removendo o ruído sem perder informações importantes do sinal original (HAN, DONGYING; ZHAO; SHI, 2019).

O EMD pode ser aplicados a qualquer tipo de sinal e têm vantagens significativas em lidar com dados não-estacionários e não-lineares (SAIDI; ALI; FNAIECH, 2014). Foi desenvolvido a partir de uma suposição de que qualquer sinal é composto de diferentes frequências. Desta forma, cada sinal pode ser decomposto em várias IMFs, a Figura 4.2 mostra a decomposição de um sinal bruto em suas respectivas IMFs, com base em escalas de tempo do sinal original. Nesse sinal o método EMD gerou dezenove IMFs e um termo residual, essa quantidade está relacionada a quantidade de energia e ruido s presentes no sinal original. Essas IMFs exibem diferentes características do sinal original e podem ser usados para representar informações específicas de interesse. O grande desafio na análise dos sinais decompostos é identificar qual IMF contém informações úteis. Há frequências diferentes para cada IMF, a primeira IMF corresponde ao maior valor, que diminui significativamente à medida que o número de decomposições aumenta. A última IMF é o elemento residual do sinal. Assim, é muito importante a análise de cada componente, a única certeza que temos é em relação ao termo residual, que representa uma tendência linear (CAO et al., 2023), que pode ser observada na Figura 4.3, uma tendencia de aumento na energia do sinal em função do tempo. Outro fator importante, a soma das energias de todos os IMFs deve ser igual à energia total do sinal original, excluindo o resíduo (HAN, DONGYING; ZHAO; SHI, 2019; HEMMATI; ORFALI; GADALA, 2016). Portanto, a energia dos diferentes IMFs mostram a energia do sinal de vibração em diferentes bandas de frequência.

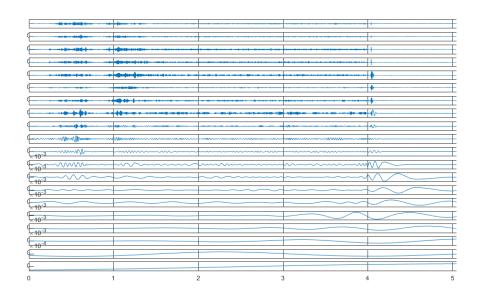


Figura 4.3 – Decomposição de modo empírico do sinal original

Os IMFs, são diferentes e mudam com a variação do sinal. indicam o modo oscilatório natural embutido no sinal e servem como funções básicas, que são determinadas pelo próprio sinal original. Além disso, a análise estatística desempenha um papel crucial na decomposição por EMD. Estatísticas como a média, variância e desvio padrão são utilizadas para caracterizar cada IMF. A média de cada IMF geralmente é zero, devido à sua natureza oscilatória.

A variância e o desvio padrão de cada IMF fornecem informações sobre a dispersão da energia ao longo do tempo, ajudando a identificar quais IMFs contêm as informações mais significativas. A análise estatística permite comparar a energia distribuída entre os diferentes IMFs e o sinal original, garantindo que as propriedades do sinal sejam preservadas durante a decomposição. Essa abordagem estatística é essencial para garantir que a decomposição por EMD seja uma ferramenta eficaz na análise de sinais de vibração complexos e não estacionários.

5. RECURSOS ESTATISTICOS

5.1. Extração de recursos estatísticos no domínio do tempo

Com o objetivo de melhorar a análise e o diagnóstico da qualidade da junção RFW, após fase de préprocessamento (filtragem e decomposição), as características estatísticas do sinal de vibração foram extraídas e analisadas. Essas características são obtidas a partir do processamento direto do conjunto de sinais pré processados e podem revelar informações úteis.

Os parâmetros característicos no domínio do tempo são sensíveis ao estado de fricção de RFW, além de apresentarem características importantes como facilidade, simplicidade de implementação e baixo tempo computacional (BEN ALI *et al.*, 2015). A desvantagem que esta analise apresenta e a omissão informações importantes de frequência e vice-versa. Para (PEETERS; ANTONI; HELSEN, 2020), vantagem de usar esses recursos é que nenhum conhecimento sobre as frequências é necessário. As características estatísticas no domínio do tempo utilizadas são descritas a seguir:

- a) Assimetria: É uma medida de simetria ou a falta de simetria do sinal ao redor da região do pico, seu valor pode ser negativo se a cauda esquerda da curva for mais longa, com a distribuição principal inclinada para o lado direito. É positivo se a cauda direita da curva for mais longa com a distribuição principal inclinada para o lado esquerdo.
- b) Coeficiente de Variação: É a razão entre o desvio padrão das forças de impacto e a média.
- c) Curtose: É identificado como o momento de quarta ordem de uma distribuição, uma medida de não gaussianidade. O valor é zero para um sinal Gaussiano e diferente de zero para sinal não gaussiano.
- d) Desvio padrão: É uma medida da energia efetiva ou conteúdo de potência do sinal de vibração e indica claramente a deterioração na superfície de contato. É uma medida da dispersão do conjunto de dados de sua média.
- e) Energia: A energia é capaz de refletir a intensidade, frequência e duração do sinal.
- f) Entropia: É uma característica para medir a complexidade das séries temporais. É uma descrição do grau de incerteza do sistema, para que possamos usá-la para medir a mudança de estado do processo rotativo.
- g) Fator de crista: É definido como a razão entre o valor de pico e o valor RMS com o componente DC removido. O sinal que tem um número menor de picos de alta amplitude pode gerar um valor de fator de crista maior à medida que o numerador aumenta.

- h) Fator de forma: É a razão entre o valor quadrático médio (RMS) do sinal e a média de seus valores absolutos. É uma função adimensional que depende da forma e do domínio do tempo. Esse recurso também pode ser usado para identificar desequilíbrios e desalinhamentos na estrutura da junta
- i) Fator de impulso: É uma indicação de sua natureza de pico e é a razão entre o valor máximo absoluto do sinal e a média de seus valores absolutos. No caso de sinais de vibração, esse recurso pode ser usado para entender a presença de níveis de pico. anormais. Pode indicar a existência de atrito incomum entre as superfícies, em seguida, refletido como um aumento na energia total da raiz quadrada média do sinal. Essa característica, portanto, funciona como um importante indicador da presença de distúrbios no sinal adquirido.
- j) Fator de Margem: É calculado dividindo o valor absoluto máximo do sinal de vibração pelo RMS do valor absoluto do sinal de vibração. Este fator flutua significativamente com mudanças no valor de pico.
- k) Raiz Quadrada Média: Os valores RMS dos sinais de vibração podem ser usados para monitorar o nível geral de vibração de rolamentos. Isso ocorre porque o nível geral de vibração normalmente aumenta à medida que o rolamento se deteriora. A sequência RMS tem outra vantagem de ser livre da influência de picos ocasionais no sinal original. Representa o parâmetro que mede o desvio entre as observações reais e previstas. Quanto maior o valor RMS, maior será o desvio dos dados. Um valor RMS mais baixo indica um sinal de melhor qualidade.
- 1) Relação sinal-ruído: É uma medida de robustez aplicada para identificar fatores de controle que reduzem a variação no processo, minimizando os efeitos de fatores incontroláveis (fatores de ruído). Em outras palavras, a relação S/R mede as características de qualidade que se desviam dos valores desejados, e uma relação S/R mais alta significa o nível ideal dos parâmetros do processo.
- m) Relação Potência/Potência Média: Determina as variações de potência ao longo do sinal.
- n) Valor médio: É a média do conjunto de dados do sinal, quanto maiores os valores, menor a contaminação por ruído.
- o) Valor máximo: Refere-se ao valor máximo do sinal.
- p) Variância: É definida como a variação ao quadrado de uma variável a partir de seu valor médio. Ele mede o quão longe um conjunto de valores aleatórios está espalhado de seu valor médio normal. Em um determinado sinal como o RFW, quanto maior a variância, maior a variação de amplitude.

A justificativa para escolha desses parâmetros estatísticos deve se ao fato de apresentarem uma resposta eficiente ao comportamento transitório dos momentos estatísticos dos sinais selecionados.

Tabela 4.1 – Recursos estatísticos no domínio do tempo

Pa	arâmetros estatísticos	Formula	Ref.	
a)	Assimetria (Skewness)	$Sk = \frac{\sum_{i=1}^{N} (x_1 - \bar{x})^3 / N}{S^3}$	(HAN, DONGYING; ZHAO; SHI, 2019)	
b)	Coefficiente de variação (Coefficient of variation)	$Cv = \frac{100\sigma}{\overline{x_i}}$	(GRIFFITHS, 1967)	
c)	Curtose (Kurtosis Value)	$Kv = \frac{\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}(x_i - \bar{x})^4}{(\sigma^2)}$	(HAN, DONGYING; ZHAO; SHI, 2019)	
d)	Desvio padrão (Standard deviation)	$\sigma = \mu^2$	(GARCÍA PLAZA; NÚÑEZ LÓPEZ; BEAMUD GONZÁLEZ, 2019)	
e)	Energia (Energy)	$En = \int_0^t x_{(i)}^2 dt$	(HUANG, DAN; CUI; LI, 2019)	
f)	Entropia (Entropy)	$Enp = -\sum_{i=1}^{N} p_{xi}log_2p_{xi}$	(KUMAR, RAJEEV; SINGH; SHARMA; LI; KRÓLCZYK; ELDIN; <i>et al.</i> , 2022)	
g)	Fator crista (Crest Factor)	$Fc = \frac{\max(x_i)}{\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{N} x_i^2}{N}}}$	(HAN, DONGYING; ZHAO; SHI, 2019)	
h)	Fator forma (Shape factor)	$Sf = \frac{\sqrt{\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N} x_i^2}}{\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N} x_i }$ $Fi = \frac{\max x_i }{\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N} x_i ^{\frac{1}{2}}}$ $Mi = \frac{\max x_i }{(\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N} x_i ^{\frac{1}{2}})^2}$	(HAN, DONGYING; ZHAO; SHI, 2019)	
i)	Fator impulso (<i>Impulse</i> Factor)	$Fi = \frac{\max_{i} x_{i} }{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^{N} x_{i} ^{\frac{1}{2}}}$	(HAN, DONGYING; ZHAO; SHI, 2019)	
j)	Fator margem (Margin indicator)	$Mi = \frac{\max x_i }{(\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N} x_i ^{\frac{1}{2}})^2}$	(HAN, DONGYING; ZHAO; SHI, 2019)	
k)	Raiz média quadrada (RMS)	$RMS = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{N} x_i^2}{N}}$	(HAN, DONGYING; ZHAO; SHI, 2019)	
1)	Relação sinal/ruído (Signal to noise ratio)	$SNR = 10log \frac{\sum_{i=1}^{N} x_{i}^{2}}{\sum_{i=1}^{N} n_{i}^{2}}$	(LU et al., 2019)	
m)	Relação potência média (PAPR)	$PAPR = \frac{{P_k}^2}{\bar{x_l}^2}$	(VARTIAINEN et al., 2020)	
n)	Valor máximo (Peak index)	$Pk = \max(x_i)$	(RIBEIRO JUNIOR; DE ALMEIDA; GOMES, 2020)	
o)	Valor médio (Mean)	$\mu = \frac{\sum_{i=1}^{N} x_i}{N}$	(RIBEIRO JUNIOR; DE ALMEIDA; GOMES, 2020)	
p)	Variância (Varience)	$Var = \sigma^2 = \frac{\sum_{i=1}^{N} (x_i - \bar{x})^2}{N}$	(HEBDA-SOBKOWICZ et al., 2020)	

5.2. Extração de recursos estatísticos no domínio da frequência

Os sinais de vibração no domínio da frequência são obtidos aplicando a FFT nos sinais temporais. O processamento de sinais medidos no domínio da frequência permite detectar e localizar eventos transitórios, analisando diferentes sinais. As características estatísticas no domínio da frequência utilizadas são descritas a seguir:

Parâmetros estatísticos (domínio da frequência)		Formula	Ref.	
a)	Entropia espectral (Spectral entropy)	$Pse = \frac{-\sum_{i=1}^{\frac{N}{2}} P_i ln(P_i + \sigma)}{ln \frac{N}{2}}$	(LI, XIAOHU et al., 2020)	
b)	Centro de gravidade espectral (Spectrum center gravity)	$Cgf = \frac{\sum_{k=1}^{N} f_N s_k}{\sum_{k=1}^{N} s_k}$	(HAN, DONGYING; ZHAO; SHI 2019)	
c)	Curtose espectral (Spectrum Kurtosis)	$Kf = \frac{\sum_{i=1}^{N} (s_k - f)^2}{k \cdot RVF}$	(MOUSMOULIS et al., 2021)	
d)	Raiz média quadrada espectral (Root mean square frequency)	$RMSf = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{N} f_N^2 s_k}{\sum_{i=1}^{N} s_k}}$	(HAN, DONGYING; ZHAO; SHI 2019)	
e)	Variância espectral (Spectral variance)	$Vf = \frac{\sum_{i=1}^{N} (s_k - \bar{f})^2}{k - 1}$	(HAN, DONGYING; ZHAO; SHI 2019)	

Tabela 5.1 – Recursos estatísticos no domínio da frequência

a) Entropia espectral: Reflete a tendência do sinal de monitoramento durante o processo de detecção de vibração

- b) Centro de gravidade espectral: Amplamente utilizado para revelar dimensão perspectiva na estampagem de componentes utilizados em instrumentos, bem como para a análise de sons de veículos e ruídos de trânsito. É considerado o fator mais confiável para julgar a dissimilaridade entre dois sons de um corpus, correspondendo a dois defeitos de gravidades diferentes.
- c) Curtose espectral: É uma indicação da característica não gaussiana da função de densidade de probabilidade; significa o nivelamento e a natureza pontiaguda da distribuição de valores de entrada em relação à distribuição gaussiana. É igual a 0 para a distribuição Gaussiana, negativo para uma distribuição mais plana com um alcance mais estreito e positivo para distribuições com um alcance mais extremo. Em termos mais claros, expressa valores baixos para frequências estacionárias e valores altos para os transientes de frequências.

- d) Raiz média quadrada espectral: É a banda principal do espectro e representa a distribuição do espectro do sinal.
- e) Variância espectral: É a variação entre esses espectros de frequência, essa quantidade resume a heterogeneidade no conteúdo de frequência.

A justificativa para escolha desses parâmetros estatísticos deve se ao fato que, ao adotar apenas sinais no domínio do tempo como característica no desenvolvimento do sistema de avaliação, pode levar a falhas na identificação da qualidade, para melhorar a robustez do estudo proposto.

6. MATERIAIS E MÉTODOS

Este capítulo detalha o desenvolvimento experimental que fundamenta a presente pesquisa. O estudo foi conduzido em duas fases distintas. Na primeira fase, foi desenvolvido um equipamento especializado para soldagem por fricção CDFW. Este equipamento foi essencial para a execução dos experimentos necessários à pesquisa. Na segunda fase, foi elaborado um projeto experimental com o objetivo de identificar os recursos estatísticos mais discriminativos, considerando os fatores de qualidade. Este projeto foi crucial para a análise e interpretação dos dados obtidos durante os experimentos, permitindo a identificação precisa das variáveis mais relevantes para a qualidade do processo de soldagem. As duas fases do desenvolvimento experimental forneceram a base metodológica sólida para a presente pesquisa, possibilitando uma análise aprofundada dos fatores de qualidade na soldagem CDFW.

6.1. Equipamento para soldagem CDFW

6.1.1 Estratégia de desenvolvimento do equipamento

Para alcançar os objetivos propostos por esta pesquisa, foi elaborada uma estratégia de desenvolvimento do equipamento necessário. Inicialmente, buscou-se atender às especificações do projeto, com diversas tentativas sendo realizadas até chegar ao modelo ideal do equipamento para soldagem CDFW para a aplicação desejada. As fases do processo CDFW são compatíveis com os processos de usinagem realizados em um torno mecânico convencional. Aproveitando esta semelhança e para facilitar a montagem, um torno mecânico convencional foi modificado e implementado exclusivamente para esta pesquisa. No entanto, o torno não é projetado para suportar as altas cargas axiais e grandes variações de velocidade de rotação exigidas pelo processo CDFW. Para atender a esses requisitos e às demais premissas do processo, foram implementadas modificações na estrutura mecânica e nos circuitos de controle e instrumentação do torno mecânico convencional. As modificações e implementações descritas garantiram que o equipamento desenvolvido atendesse aos requisitos específicos do processo CDFW, proporcionando um controle preciso e estável dos parâmetros críticos, essencial para a obtenção de resultados consistentes e de alta qualidade na soldagem.

6.1.2 Modificações na estrutura e controle eletrônico

Geralmente, em quase todos os equipamentos de usinagem, a velocidade de rotação possui alguns padrões definidos pelos fabricantes. Para utilização no processo CDFW, foi necessário alterar a capacidade rotacional do equipamento. Foram realizadas modificações no controle e na instrumentação para automatizar

o sistema e obter uma plataforma programável para variação da velocidade, aplicação da força axial e aquisição de sinais. Um novo design de controle de velocidade baseado em um inversor de frequência foi proposto, permitindo rotações variáveis de 0 a 70 Hz. O inversor de frequência utilizado possui um sistema de realimentação que garante que a velocidade de rotação, uma vez selecionada, seja mantida constante durante todo o processo de soldagem.

O conjunto de soldagem por fricção projetado e construído é composto por três subsistemas principais: a estrutura mecânica, o sistema de controle e de instrumentação do processo e o sistema de aquisição de sinais. A estrutura mecânica serve como suporte para apoiar, montar e envolver todos os componentes da máquina. Seu principal objetivo é fornecer um suporte rígido e estável a todos os componentes, garantindo a integridade e precisão do processo de soldagem.

O sistema de controle do processo é hierárquico e possui vários recursos importantes. Este sistema é responsável por gerenciar e coordenar as operações da máquina, assegurando que todos os parâmetros do processo de soldagem sejam controlados com precisão.

O sistema de aquisição de sinais é essencial para monitorar e registrar os dados gerados durante o processo de soldagem. Ele permite a coleta de informações críticas que são utilizadas para avaliar a qualidade da soldagem e ajustar os parâmetros do processo conforme necessário.

A integração desses três subsistemas no conjunto de soldagem por fricção garante um desempenho eficiente e preciso, permitindo a execução de processos de soldagem de alta qualidade.

6.1.3 Implementação do sistema de pressão

Além disso, foi implementado um sistema de pressão para fornecer a potência necessária para a aplicação da força axial (pressão de fricção/forjamento) nas peças de trabalho durante o processo CDFW. O mecanismo consiste em um cilindro metálico com capacidade de 5 toneladas, acionado eletricamente por um servo motor de corrente contínua (DC) de 0,5 CV. Para a construção do sistema de pressão, foram introduzidas modificações na estrutura e no hardware (unidade mecânica) de acionamento do carro do torno mecânico.

Um mecanismo de geração de torque, com uma caixa de engrenagem, foi acoplado ao eixo do servo motor DC, permitindo a aplicação de uma força de até 100 kN. Os servomotores são controlados por sinais PWM gerados por um microcontrolador Arduino, o que pode efetivamente reduzir a taxa de falhas e erros. Como os servomotores operam utilizando os sinais recebidos do microcontrolador, eles podem ser programados conforme os requisitos de cada experimento.

6.1.4 Coleta de dados e monitoramento

Como já descrito anteriormente, os parâmetros de pressão de fricção (Pf) e pressão de soldagem (Pf) são importantes durante o processo, e a precisão e estabilidade do controle dessas forças estão intimamente relacionadas à qualidade da soldagem.

Para coletar os dados de vibração, foram instalados dois acelerômetros, um na direção x e outro na direção y, modelo PCB 393B04, interligados a um sistema de aquisição de dados de tensão (DAQ), conforme mostrado na Figura 6.1. O sistema de aquisição de dados foi conectado a um computador e os sinais (com taxa de 50 μs) foram adquiridos usando o software *LabVIEW*.



Figura 6.1 – Diagrama esquemático do equipamento utilizado no processo CDFW

6.1.4.1. Microcontrolador e interface

Um microcontrolador Arduino foi especificado para o projeto, atuando no topo da hierarquia de controle como um circuito mestre que habilita todos os subcomponentes do sistema e possibilita a interface homem-máquina. Os periféricos interfaceados com o Arduino incluem:

6.1.4.1.1. Dispositivos de exibição

A placa inclui dois dispositivos de exibição: um display de sete segmentos e um display LCD 16x2 multiplexado. Outros recursos de exibição, como LEDs indicadores, são usados para fins de exibição ou para ilustrar o status de saída do módulo comparador. Todos os parâmetros do processo podem ser observados no display, e as fases do processo e os estágios da sequência de soldagem são controlados por um temporizador, também indicados pelo display.

6.1.4.1.2. Dispositivo de entrada

A placa inclui um dispositivo de entrada, um teclado 4x4, que é o principal dispositivo de entrada para o controle do processo. O teclado de matriz é utilizado como interface para a entrada dos parâmetros do processo, incluindo operações especiais de parada e partida. O Arduino possui um módulo de entrada analógico/digital (A/D) multiplexado com 8 canais de entrada analógica, mas não possui um módulo digital/analógico (D/A) interno. Portanto, um conversor D/A externo foi adicionado para completar o sistema de aquisição de dados. O conversor D/A se comunica com o barramento do microcontrolador utilizando a interface serial do Arduino.

6.1.4.1.3. Microcontrolador Arduino

No projeto, o controle existente do torno modificado atua como escravo do controlador mestre (Arduino) para realizar o processo de soldagem. O microcontrolador é responsável pelo controle da célula, atuando como uma interface entre o operador e os demais circuitos de operação, sendo o coração deste equipamento do ponto de vista de controle e comunicação. A unidade de controle do microcontrolador permite a inserção de parâmetros de entrada através de uma interface gráfica do usuário, onde o operador pode selecionar os parâmetros de soldagem desejados. Os dados são inseridos via teclado, classificados, registrados e exibidos antes de serem enviados para o controlador mestre. Dessa maneira, os parâmetros PS [MPa], TS [s], n [rpm], PF [MPa] e TF [s] são pré-programados para a execução do processo de soldagem.

6.1.4.1.4. Implementação do software

O controlador mestre foi implementado utilizando a plataforma Arduino e projetado para um ambiente de interface do microcontrolador Arduino. O sistema foi construído usando modulação on-off para reduzir a complexidade. Três programas de software foram escritos separadamente em diferentes ambientes de desenvolvimento. O primeiro, baseado na linguagem C++ e utilizando o Arduino IDE, foi utilizado na programação do microcontrolador. O segundo, baseado em um pacote de programação gráfica FBD (Measurement Computing, Inc), foi utilizado no controle de velocidade. O terceiro, uma programação em LabVIEW, foi utilizado na aquisição dos sinais de vibração

6.2. Materiais utilizados

6.2.1. Caracterização do material base

O metal base utilizado no experimento foi o aço ASTM A36, comercialmente disponível em barras maciças de diâmetro de 12,7 mm e comprimento de 6000 mm. Classificado como um aço carbono de média resistência mecânica. É frequentemente usado para aplicações estruturais nas indústrias: metal mecânica e de construção. A escolha do aço ASTM A36 se deu devido a sua boa soldabilidade, baixa resistência mecânica e baixa usinabilidade. Na Tabela 5 é mostrada a composição química dos materiais de base de acordo com os fabricantes.

 \mathbf{C} Si Mn Ni Mo S Cu A1 V ASTM A36 0.26 0.04 0,60 0.01 0.013 0.04 0.05 0,202 < 0,1 < 0.1

Tabela 6.1 - Composição química típica para o aço ASTM A-36. (% em peso)

6.2.2. Preparação das amostras

A barra cilíndrica de aço ASTM A36 foi cortada em várias amostras com um comprimento de 60 mm cada, utilizando uma máquina de corte. As amostras experimentais foram usinadas a partir de aço de barra cilíndrica ASTM A36, com diâmetro de 12,7 mm e comprimento de 60 mm. No total, 32 peças foram preparadas para o processo de soldagem. Essas peças foram divididas em dois conjuntos, compostos por 16 pares de amostras de peças estacionárias e 16 peças rotativas, que foram utilizadas no processo de soldagem por fricção CDFW.

Os corpos de prova foram identificados de acordo com o tipo de conjunto definido (estacionária ou rotativa). Com os pares formados, outra identificação foi realizada para a determinação do número do experimento. As superfícies das amostras, antes da soldagem, foram usinadas utilizando um torno convencional para eliminar o efeito da rugosidade superfícial. As peças obtidas foram utilizadas para produzir as juntas CDFW.

6.3. Processo de soldagem

Para implementar e conduzir sistematicamente os experimentos e oferecer soluções eficientes, foi utilizado um planejamento experimental (DOE) em 2 níveis. A ideia chave desta metodologia é identificar fatores significativos com o máximo de informações possíveis com o menor número de experimentos.

6. 3.1. Parâmetros (Variáveis de Entrada)

Os parâmetros básicos do processo CDFW na fase de atrito são:

- Pressão de fricção Pf [MPa]
- Tempo de fricção Tf [s]
- Rotação do motor de acionamento n [rpm]

Os parâmetros na fase de transformação são:

- Pressão de forjamento Pn [MPa]
- Tempo de forjamento Tn [s]

A experimentação da soldagem foi realizada utilizando o delineamento fatorial 2⁴ (ou seja, quatro fatores escolhidos, cada um com dois níveis, recebendo valores codificados: +1 para o valor máximo, -1 para o valor mínimo e 0 para o valor central). Para cada conjunto de parâmetros, foram produzidos dois corpos de prova: um para análise da macro e microestrutura e outro para reserva. Um total de 40 espécimes foram produzidos para fins de caracterização e avaliação. Todos os resultados obtidos nos experimentos foram analisados utilizando o software estatístico Minitab 17. As análises de variância estatísticas foram realizadas para entender os principais efeitos, bem como a interação entre os parâmetros do processo.

A seleção dos parâmetros para a realização dos experimentos foi baseada nas condições de soldagem CDFW definidas após várias tentativas no laboratório, com o objetivo de determinar os níveis e fatores predominantes que influenciam a operação do processo e garantir soldagens livres de falhas aparentes. Os parâmetros considerados ideais foram então selecionados e utilizados para definir a configuração do processo de soldagem, conforme descrito na Tabela 6.2.

Tabela 6.2 - Parâmetros experimentais do processo CDFW

G: 1.1 ·	Fatores Experimentais	Unidade	Nível das variáveis de		
Simbologia			-1	0	1
n	Rotação	(rpm)	1250	1600	2500
\mathbf{P}_{F}	Pressão	(MPa)	300	540	805
T_{F}	Tempo	(s)	11	15	19
T_S	Tempo	(s)	11	15	19

Após definir todas as variáveis e as faixas de avaliação, foi realizado um planejamento fatorial completo (2⁴) com quatro pontos centrais. Este planejamento foi utilizado para identificar os principais

efeitos e a interação dos fatores de entrada sobre as respostas: pressão de forjamento (PF [MPa]), tempo de fricção (TF [s]), tempo de forjamento (TN [s]) e rotação (n [rpm]).

Os quatro pontos centrais foram adicionados ao planejamento para estudar a linearidade e a repetibilidade do processo. O valor da pressão de forjamento (PN) foi mantido constante durante a execução de todas as corridas experimentais. A inclusão do ponto central teve como objetivo atenuar os erros e aumentar a precisão dos resultados.

A matriz de planejamento fatorial, incluindo os níveis das condições de soldagem, é apresentada na Tabela 6.3. Esta matriz foi fundamental para a organização e execução dos experimentos, permitindo uma análise sistemática dos efeitos individuais e das interações entre os fatores estudados.

O planejamento fatorial completo, complementado pelos pontos centrais, proporcionou uma abordagem robusta para a avaliação dos fatores de entrada no processo de soldagem. A metodologia empregada permitiu uma análise detalhada dos efeitos e interações, contribuindo significativamente para a compreensão do processo de soldagem por fricção CDFW.

Tabela 6.3 - Arranjo experimental do planejamento fatorial completo 2⁴ para o processo CDFW

Número do -	Var	W		
experimento	n Rotação (rpm)	P _F Pressão (MPa)	T _F	T _N Tempo (s)
(Peça)			Tempo (s)	
1	-1	-1	-1	-1
2	1	-1	-1	-1
3	-1	1	-1	-1
4	1	1	-1	-1
5	-1	-1	1	-1
6	1	-1	1	-1
7	-1	1	1	-1
8	1	1	1	-1
9	-1	-1	-1	1
10	1	-1	-1	1
11	-1	1	-1	1
12	1	1	-1	1
13	-1	-1	1	1
14	1	-1	1	1
15	-1	1	1	1
16	1	1	1	1
17	0	0	0	0
18	0	0	0	0
19	0	0	0	0
20	0	0	0	0

6.3.2. Procedimento de soldagem

O trabalho experimental baseou-se na soldagem por fricção CDFW, com as soldagens realizadas utilizando o equipamento especialmente adaptado para execução do processo, conforme descrito no item 2.2.5. O equipamento utilizado é microprocessado, ou seja, o operador é responsável apenas pela escolha dos parâmetros via display. Após ajustados os valores iniciais fixos e variáveis, todo o processo de soldagem é automático. Em relação à ordem de execução, optou-se por não utilizar o sistema de agrupamento de blocos em função da velocidade. A execução seguiu a mesma configuração de parâmetros descritos na Tabela 6.3.

Com a configuração experimental preparada para a execução dos experimentos e aquisição dos sinais, os pares de corpos de prova foram fixados no equipamento, respectivamente no mandril fixo e no mandril rotativo, devidamente alinhados e com as superfícies levemente em contato. Em seguida, o cilindro elétrico foi acionado manualmente para aproximar o contato entre as superfícies das peças. Após esta etapa, os parâmetros do processo relativos a cada corrida foram ajustados. Como o processo é totalmente automatizado, o start foi iniciado e a soldagem foi realizada, com os dados sendo coletados. Após a soldagem de ambas as etapas, as amostras foram preparadas para a produção de corpos de prova destinados à caracterização dos fatores de qualidade.

6.4. Aquisição dos sinais

Simultaneamente ao procedimento de soldagem, os sinais de vibração foram capturados experimentalmente pelos acelerômetros para análise no domínio do tempo e posterior análise no domínio da frequência. Além dos componentes descritos no item 6.1 (sistema de aquisição e análise de sinais), um controle *ON-OFF* serial foi projetado e instalado para ativar e desativar os acelerômetros no momento exato do processo de soldagem. Este dispositivo proporcionou muitos recursos para obter o máximo de informações sobre vibrações durante o processo. Os sinais emitidos pelos acelerômetros foram adquiridos durante o tempo de observação de acordo com cada etapa do processo e armazenados diretamente no disco rígido do PC usando o software *LabVIEW*.

Em seguida, uma abordagem de pré-processamento e análise de sinais foi proposta em oito etapas:

 Normalização dos Dados: Os sinais brutos adquiridos foram normalizados usando o método z-score, com base no valor médio e no desvio padrão.

- 2) Filtragem Mediana: Após a normalização, para remoção de ruídos e componentes de frequências indesejadas, foi aplicada a filtragem mediana off line a todos os sinais brutos utilizando o *software Matlab*.
- 3) Transformada Rápida de Fourier (FFT): Para determinar a frequência fundamental de vibração dos sinais brutos e sua amplitude, foi aplicada a FFT (item 7.2).
- 4) Transformada de Fourier de Curto Prazo (STFT): Para estimar as frequências e seus níveis de energia em função do tempo, a STFT foi aplicada aos sinais brutos (item 7.3).
- 5) Redução de Dimensionalidade: Para validar as abordagens anteriores, foi aplicada uma redução de dimensionalidade nos sinais brutos, com o objetivo de criar um novo subespaço para extrair recursos apenas do primeiro estágio do processo. Em seguida, a STFT foi aplicada para gerar espectrogramas de tempo-frequência (item 7.4).
- 6) Decomposição Empírica de Modos (EMD): O sinal criado no novo subespaço foi decomposto em IMFs pelo método EMD (item 7.5).
- 7) Classificação de IMFs: Após a geração das IMFs, um algoritmo de arvore de decisão baseado em máquina de estados finitos foi aplicado as IMFs para selecionar a natureza estacionaria ou não estacionária. Em seguida recursos estatísticos temporais e espectrais foram extraídos aas IMFs classificadas.
- 8) Classificação e Análise de Recursos Estatísticos: Após a conclusão da etapa anterior, os recursos estatísticos temporais e espectrais foram classificados e submetidos à análise estatística ANOVA.
- 9) Para finalizar estes recursos, foram correlacionados com os fatores de qualidade do processo CDFW para verificação de informações relevantes utilizando o algoritmo de máquina de estados e análise de correlação.

A abordagem sistemática de aquisição e análise de sinais permitiu a obtenção de dados detalhados sobre as vibrações durante o processo de soldagem. As etapas de pré-processamento e análise garantiram a extração de informações relevantes, que foram correlacionadas com os fatores de qualidade do processo, proporcionando uma base sólida para a interpretação dos resultados experimentais. Um diagrama de blocos ilustrativo dessas etapas é mostrado na Figura 6.2.

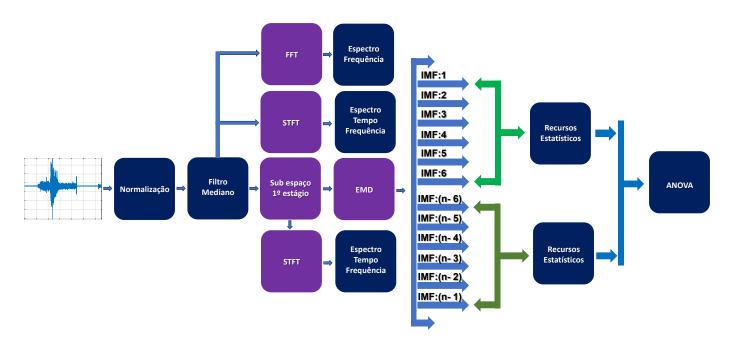


Figura 6.2- Ilustração do pré processamento dos sinais de vibração

6.5. Preparação das amostras após a Soldagem

Após a conclusão das soldas, as amostras foram numeradas sequencialmente e submetidas a um processo meticuloso de preparação e análise para avaliação da microestrutura, microdureza e propriedades mecânicas. A metodologia adotada foi projetada para garantir precisão e reprodutibilidade nos resultados obtidos.

Inicialmente, foi realizado o corte abrasivo utilizando "cut-off" no centro das faces no sentido axial. Esta técnica foi escolhida devido à sua eficiência em proporcionar seccionamento sem trabalho mecânico a frio, resultando em superfícies planas com baixa rugosidade. Durante o corte, foi mantida uma refrigeração abundante para prevenir danos térmicos na estrutura do material.

Após o corte, as amostras foram lixadas para refinamento do acabamento superficial. O processo de lixamento foi realizado sequencialmente com lixas de granulometria progressiva, incluindo 220, 400, 600 e 1200. Este procedimento garantiu uma preparação adequada das superfícies para etapas subsequentes. Após o lixamento, as amostras foram limpas meticulosamente com acetona para remover quaisquer resíduos indesejados.

O polimento das amostras foi executado em uma única etapa, utilizando alumina em suspensão com granulometria média de 0,3 µm. Este passo foi crucial para obter superfícies completamente homogêneas e livres de imperfeições, preparando-as para a análise metalográfica detalhada.

Em seguida, os corpos de prova foram submetidos a um processo de ataque químico com uma solução de ácido nítrico (HNO₃) por um período de 10 minutos. Este procedimento foi realizado para revelar

a microestrutura da região soldada de forma clara e detalhada. O ataque químico permitiu visualizar as fases e estruturas presentes, facilitando a análise posterior.

Com todas as etapas de preparação concluídas, será realizada uma avaliação detalhada da influência individual das variáveis do processo (como parâmetros de soldagem) na microestrutura, na microdureza e nas propriedades mecânicas dos corpos de prova. Para esta avaliação, serão empregados métodos e testes adequados, detalhados no próximo item deste estudo.

6.6. Extração de recursos estatísticos

O objetivo desta etapa é calcular os recursos estatísticos conforme descrito na seção 5. Foram calculados um total de 16 recursos estatísticos temporais e 5 espectrais para as IMF classificadas. Dada a quantidade significativa de recursos estatísticos, é crucial selecionar cuidadosamente aqueles mais relevantes para a pesquisa. Esta seleção é essencial para melhorar a eficiência dos classificadores e alcançar os objetivos propostos.

Para reduzir a complexidade computacional, foi realizado um teste de correlação para analisar o comportamento dos recursos no domínio do tempo. A análise univariada dos coeficientes de correlação de Pearson foi empregada para identificar e remover características correlacionadas e irrelevantes dos sinais. Esse procedimento resultou em uma redução na dimensão da matriz de recursos, diminuindo assim os requisitos computacionais.

Para automatizar e facilitar ainda mais o processo de seleção de recursos, foi implementado um classificador de árvore de decisão baseado em condições *IF-THEN* de máquina de estados finitos. Os limiares e critérios para configurar esta árvore de decisão são apresentados na Figura 6.3. Este modelo estatístico, fundamentado em análise de variância (ANOVA), foi escolhido pela sua interpretabilidade e robustez documentada. A ANOVA foi utilizada para classificar as características dos sinais medidos, selecionando os recursos mais relevantes e não redundantes para análises subsequentes.

Esta abordagem sistemática não apenas simplifica o processo de seleção de recursos, mas também assegura que apenas os atributos mais informativos sejam considerados nas etapas posteriores da pesquisa.

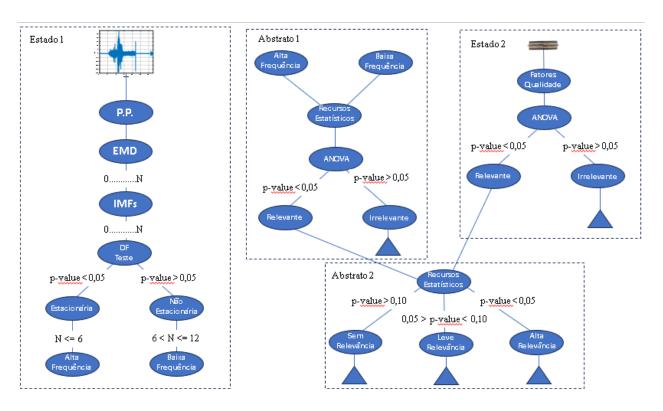


Figura 6.3 – Árvore de decisão para recursos selecionados

A máquina de estados finitos é uma ferramenta eficaz para classificação de dados e análise de controle condicional, utilizando lógica de qualidade e arquitetura de rede para minimizar problemas e resolver questões de classificação e regressão. A árvore de decisão, estruturada hierarquicamente, possibilita resultados que podem ser retroalimentados para sistemas de controle, integrando estados e decisões. Com essa estrutura, é viável monitorar em tempo real a qualidade do processo utilizando sistemas de Internet das Coisas (IoT).

Para avaliar a qualidade do processo, foram combinadas quatro análises multivariadas distintas: Estado 1, Estado 2, Abstrato 1 e Abstrato 2. Em cada estágio, variáveis significativas foram selecionadas para inclusão no modelo, enquanto as menos significativas foram eliminadas. Todos os parâmetros de entrada, fatores de qualidade e recursos estatísticos foram simultaneamente introduzidos no modelo.

Estado 1: Classificou os sinais em alta e baixa frequência.

Abstrato 1: Classificou os recursos estatísticos.

Estado 2: Classificou os fatores de qualidade.

Abstrato 2: Classificou a relevância dos recursos combinados com os fatores de qualidade.

Após verificar a natureza estacionária ou não estacionária das IMFs e realizar a redução dos recursos

estatísticos no domínio do tempo, procedeu-se à etapa de classificação da relevância dos dados. Os dados classificados como relevantes foram então correlacionados com os fatores de qualidade: *burn-off, flash*, largura da Zona Afetada Termicamente (TMAZ) e diâmetro médio dos grãos na TMAZ, considerados como variáveis de resposta.

O primeiro objetivo da análise estatística foi identificar quais variáveis de entrada causam alterações significativas nas variáveis de saída (fatores de qualidade/recursos estatísticos). O segundo objetivo foi determinar a influência das variáveis de entrada nos valores dos recursos estatísticos calculados e verificar possíveis relações com a qualidade do processo.

6.7. Caracterização do burn-off e flash

A caracterização do *burn-off* e do *flash* é crucial para avaliar a qualidade da junta de solda. O *burn off* refere-se ao comprimento da extremidade das peças que é removido durante o processo de soldagem. Este parâmetro é essencial para monitorar e controlar o processo de soldagem. O encurtamento axial (*burn off*) foi estimado medindo-se o comprimento das peças antes e depois da soldagem, utilizando um paquímetro digital com resolução de 0,001 mm. A variável de resposta, *flash*, que é o material expelido para formar a junção, foi medida utilizando o software ImageJ. Para cada experimento, a média aritmética de pelo menos três medidas da área do *flash* e do *burn-off* foi obtida e registrada para posterior análise.

Em seguida, esses dados foram submetidos a uma análise estatística ANOVA para identificar os parâmetros de entrada significativos nos sinais de vibração e nos fatores de qualidade, seus efeitos interativos e a contribuição percentual de cada parâmetro na formação do *flash* e do *burn-off*. A Figura 6.4 (a) (b) mostra respectivamente a caracterização do *burn- off* e do *flash*.



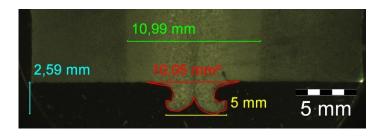


Figura 6.4 – Medição do *burn-off* e do *flash* Fonte: Autoria própria (2022)

6.8. Caracterização da macro e microestrutura

Com o propósito de caracterizar as diferentes zonas da solda e determinar o tamanho do grão, um microscópio de luz foi empregado para a análise das diversas regiões formadas durante o processo CDFW. Metalografias foram realizadas para examinar tanto a macro quanto a microestrutura da junta soldada, possibilitando a avaliação das transformações metalúrgicas ocorridas. Por meio da macrografia, investigou-se a presença de defeitos e as características geométricas das zonas deformadas plasticamente durante o processo de soldagem.

As imagens digitais das estruturas macroscópicas foram analisadas utilizando o plug-in Particle Analyzer do software ImageJ. Para esta análise, as imagens foram convertidas para 8 bits utilizando a ferramenta threshold, estabelecendo um intervalo de 8 ± 1 a 255. O método de interceptação linear média, também conhecido como interceptação de Heyn, foi aplicado para medir o tamanho aparente do grão utilizando o mesmo plug-in, conforme preconizado pelo padrão ISO 643:2012. Este procedimento permitiu que o plug-in calculasse o tamanho dos grãos, sendo a análise realizada de forma sistemática na região da Zona Afetada Termicamente (TMAZ). A Figura 6.5 mostra as micro e macroestrutura da junção da solda.

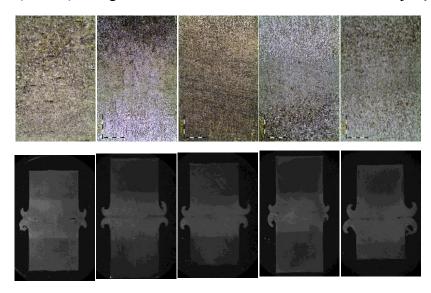


Figura 6.5 – caracterização micros e macroestruturas da junção CDFW Fonte: Autoria própria (2022)

7. RESULTADOS E DISCUSSÃO

7. 1. Experimento inicial: Reconhecimento dos sinais de vibração em CDFW

Neste estudo, a STFT foi utilizada para determinar as frequências em diferentes velocidades lineares (velocidade relativa de deslizamento) e explorar o comportamento interno de atrito entre as superfícies. A velocidade linear é um produto da multiplicação da velocidade angular pelo raio, isso significa que a velocidade de fricção é diferente na interface de soldagem. O objetivo é determinar as bandas de frequência específicas do processo relativas a variação da velocidade.

Em primeiro lugar, foi construído um modelo da superfície de atrito para determinar as diferentes velocidades lineares na peça. Esta simulação é baseada no método da integração, considerando que a superfície giratória ao longo de uma linha radial, onde R é a distância radial, W_0 a velocidade angular e as diferentes velocidades lineares (Va, Vb, Vc).

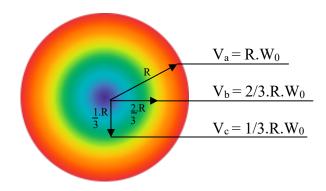


Figura 7.1 – Diagrama esquemático das velocidades lineares na superfície da peça

É conhecido que a velocidade linear diminui da extremidade para o centro da peça. Os resultados da análise mostram que a velocidade tem vários graus, estudos relevantes têm mostrado muitas ligações dessas variações na geração de calor e no coeficiente de atrito, como já relatado anteriormente. Se assumirmos uma pressão uniforme entre as peças, então teremos a mesma força de atrito exercida em todos os pontos. No entanto, o momento cinético não é o mesmo exercido por cada ponto. Pontos mais distantes do centro de rotação exercerão um momento maior do que pontos mais próximos do centro de rotação, pois terão um momento maior. Com base no modelo proposto na Figura 7.1, as frequencias de interesse possuem valores próximos 785 Hz, 523 Hz e 261 Hz, respectivamente para os valores radiais de R, 2/3R e 1/3R.

Em CDFW, como em qualquer outro processo o atrito é dependente da temperatura, conforme discutido em detalhes no item 2.2.3, podemos considerar que o atrito pesado o ocorre nas regiões próximas ao centro da peça, devido à baixa concentração de calor. E de acordo com o modelo proposto os impactos

gerados nessa região são de baixa frequência. Para chegar a esta conclusão, as seguintes suposições foram feitas, Primeiro, a geometria da peça foi considerada 12,7 mm de diâmetro, em segundo lugar, assume-se a velocidade de rotação da peça é constante, terceiro, a velocidade de fricção é estimada, e em seguida a frequência é numericamente calculada.

7.2. Análise de Frequência do Sinal Bruto

Para identificar as bandas de frequência de interesse nos sinais de vibração medidos e verificar sua confiabilidade e dinâmica, realizamos uma análise abrangente do sinal bruto ao longo de todo o processo RFW antes de proceder à análise do estágio inicial. Alguns experimentos do planejamento experimental foram escolhidos para análise, considerando o tempo máximo de duração do processo. Embora os sinais de vibração medidos com diferentes parâmetros de entrada sejam principalmente excitados por fricções, a presença de ruído é inevitável.

Conforme indicado na Figura 7.2(a), o sinal original bruto apresenta várias excitações fortes e não periódicas, representando as informações de vibração, que não são claramente identificadas devido à presença de ruído. Os sinais são muito semelhantes, exceto por algumas amplitudes que refletem os diferentes parâmetros de entrada. Os dados mostram que a amplitude do sinal nos primeiros 5 segundos foi pequena, indicando apenas as vibrações do equipamento, devido à não aplicação da pressão de fricção. Após esse período, com a aplicação da pressão de fricção, as amplitudes do sinal flutuaram até atingir o pico máximo e, em seguida, diminuíram.

O pico observado pode estar relacionado à ocorrência de forte atrito entre as superfícies da peça; nesta fase, o atrito é praticamente em estado seco. Com o início da aplicação da força de fricção, ocorre uma transição devido ao aquecimento, o material da peça torna-se plástico, diminuindo as vibrações por atrito. Esta diminuição de vibração é observada com mais detalhes a partir da Figura 7.2(c), onde a diminuição na amplitude do sinal pode ser causada pela alteração plástica do material.

Além disso, as Figuras 7.2(b), (d), (f), e (h) mostram a envoltória dos sinais no domínio da frequência, onde pode ser observado que a vibração por atrito em RFW apresenta etapas de baixa e alta frequência. Podemos deduzir que a etapa de baixa frequência, que apresenta os maiores picos, corresponde ao atrito gerado próximo ao centro da peça.

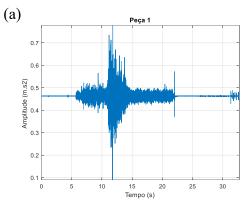
As frequências das etapas subsequentes estão relacionadas com as características de fricção na superfície externa da peça; à medida que a temperatura aumenta, o material é plastificado e o atrito é fraco.

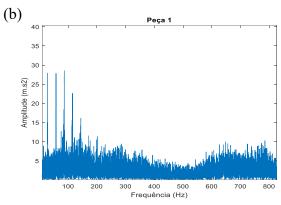
Outro detalhe importante para este reconhecimento é a distribuição de energia. Como esperado, em

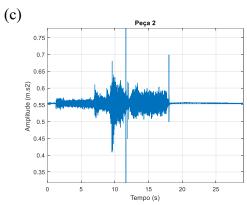
diferentes frequências há nitidamente diferentes espectros de energia, com vários picos de amplitude e uma concentração máxima de energia em baixa frequência (máximo de 200 Hz), onde o material ainda não foi plastificado. Ou seja, a baixa temperatura provoca uma deformação plástica inadequada, criando maior atrito. Esta conclusão corresponde ao relatado em [46], onde o efeito corona inicia na periferia da junta, cresce para o centro e preenche a interface para formar a interface de soldagem.

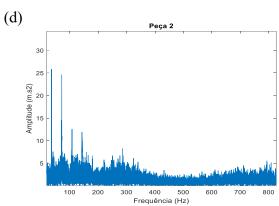
Assim, a análise de sinais de vibração provou sua utilidade no monitoramento do processo. As observações da STFT na Figura 7.3 indicam perfeitamente a caracterização do processo nos oito experimentos iniciais; os resultados dos experimentos restantes, que são similares, foram disponibilizados no Apêndice A.

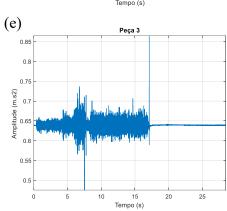
Este procedimento indica que a aquisição dos sinais de vibração durante o processo CDFW é estável e confiável. Por fim, apenas com a observação visual é possível classificar o sinal de vibração como estacionário e aleatório. No item 7.6, apresentamos uma metodologia para o teste de estacionariedade dos sinais. Esta condição de estacionariedade garante que o sinal pode ser decomposto em bandas de múltiplas frequências.

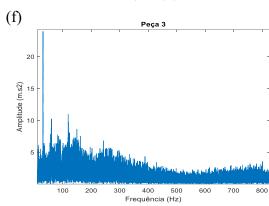


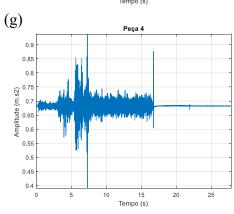


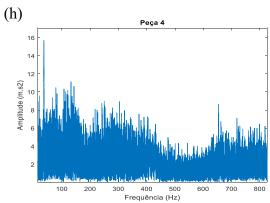












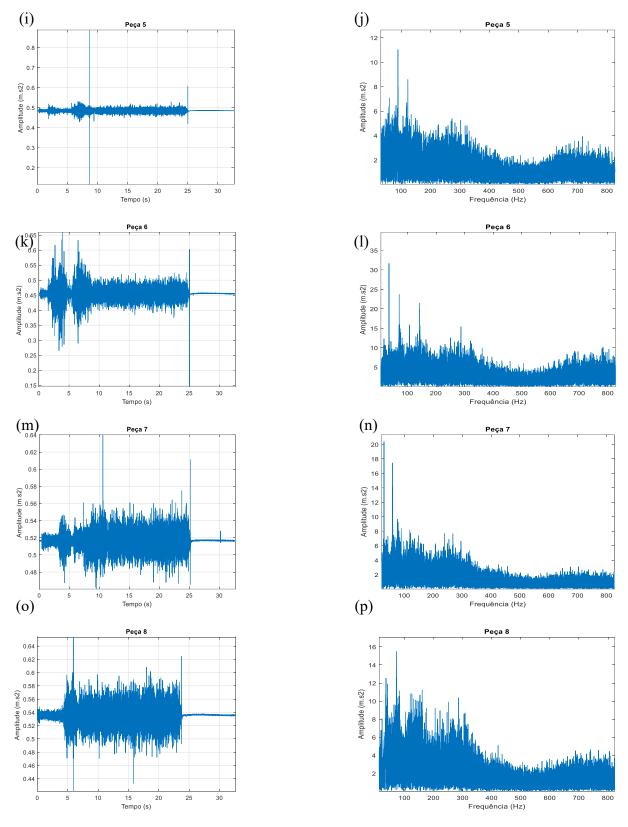


Figura 7.2 – Diagrama temporal e de espectro do sinal bruto de vibração no estágio completo do processo CDFW

Os espectros de frequência mostrados na Figura 7.2 apresentam padrões semelhantes, mas suas amplitudes variam conforme os parâmetros de entrada são alterados. Nos espectros de FFT, observa-se que

a energia é mais concentrada nas baixas frequências, enquanto a energia do sinal nas altas frequências é mais dispersa e apresenta flutuações em sua amplitude, indicando variações de fricção. Os sinais possuem fortes componentes de frequência na faixa de 0 a 400 Hz, com picos em algumas frequências e várias bandas de frequência de ressonância. Além disso, tanto no estado de baixa quanto de alta frequência, existem componentes de banda lateral no espectro, mas a borda de frequência é atenuada.

Poucas informações podem ser observadas na forma de onda no domínio do tempo e na FFT, além das já mencionadas, sendo muito dificil observar outros detalhes. A FFT não consegue fornecer informações simultâneas de tempo e frequência. Portanto, existe a necessidade de aplicar uma técnica que identifique as frequências de interesse juntamente com a variável tempo.

7.3. Análise tempo-frequência do sinal bruto

Para ilustrar com mais precisão o reconhecimento dos estágios e das frequências do sinal RFW, a análise tempo-frequência aplicando STFT (Transformada de Fourier de curto prazo) é proposta, e pode contribuir para que novas informações de frequência sejam exploradas e analisadas. A STFT é um algoritmo que foi introduzido para produzir melhores resultados e superar a restrição de tempo da FFT, é um método utilizado por muitos pesquisadores. O espectrograma ou STFT, calcula múltiplas FFTs e as exibe como frequência ao longo do tempo. É uma técnica que permite uma observação efetiva das características tempo-frequência do sinal temporal juntamente com o nível de energia.

A STFT decompõe o sinal temporal em várias janelas, executando a transformada de Fourier (FFT) em cada parcela para obter as informações de tempo, frequência e energia. Ao gerar um espectrograma o componente de frequência é expresso em função do tempo e de energia. O eixo horizontal é o tempo, o eixo vertical apresenta a frequência e a amplitude é representada por cores em ordem crescente até o amarelo, que corresponde a amplitude mais alta. Ou seja, a magnitude da vibração é mais fraca na escala azul e na escala amarela é mais significativa.

Neste estudo, a STFT foi utilizada para analisar alguns fenômenos interessantes, relacionados a frequência de vibração gerada pelo atrito, que nunca foram avaliados por outros pesquisadores. No entanto, é de conhecimento que a STFT apresenta a desvantagem de utilizar um tamanho específico de janela para todas as frequências o que pode provocar atenuações na interpretação dos valores. Para tentar minimizar este problema, inicialmente um estudo foi realizado para encontrar a janela apropriada, após vários testes a janela Hamming que tem bordas suaves foi empregada neste estudo.

Em seguida o STFT foi calculado usando o algoritmo do MATLAB, para o cálculo foram utilizados os seguintes parâmetros:

- (i) a janela Hanning, composta por 4096 pontos do sinal e $\beta = 3.6$;
- (ii) sobreposição de 75%;
- (iii) a transformada discreta de Fourier (DFFT)

A Figura 7.3 mostra as formas de onda temporais dos oito primeiros conjuntos de sinais mostrados na Figura 7.2, transformados em espectrograma tempo-frequência, com tempo entre 0 e 30s e uma frequência entre 0 e 800 Hz. Para o restante dos experimentos, como seus resultados são similares, eles foram disponibilizados no Apêndice B.

Analisando a Figura 7.3, é possível observar em primeiro lugar, que o sinal parece não estar contaminado por ruído, há componentes visíveis em várias frequências (linhas horizontais), que podem ser definidas como característica não linear do sinal. É possível verificar qualitativamente a complexidade do sinal induzido por fricção, as linhas horizontais podem ser destacadas como sub harmônicas. Além disso, os impulsos aparecem em torno de várias frequências, e que a potência muda significativamente em diferentes estados de soldagem.

Podemos verificar que espectro de frequência apresenta características óbvias de alta energia em várias gamas de frequência e tempo. Os resultados mostraram que algumas frequências são contínuas em todo o processo, são regiões que indicam fortes vibrações, além disso, outras frequências apresentam breve descontinuidade. Na Figura 7.3, o espectrograma com um pico estável se concentra em todas as faixas de frequência até o máximo de aproximadamente 800 Hz e com alta intensidade entre 10s e 15s, nesse mesmo período o possível verificar impactos em torno de 100Hz, caracterizando o estágio de fricção. Nas demais Figuras 7.3 (experimento 2 e 8), também é possível verificar a caracterização do estágio de fricção, com valores diferentes em função das características das variáveis de entrada determinadas pelo DOE.

Este comportamento pode levar a uma subestimação dos componentes de frequência durante o processo, no entanto, é visível que a evolução do processo afetou os sinais de vibração. A STFT é capaz de detectar eventos únicos e múltiplos nos espectrogramas, como pode ser visto na Figura 7.3 na peça 1, os efeitos do contato são claramente destacados, três partes óbvias de tempo de excitações de banda larga podem ser encontradas entre 6s e 23s. Na peça 2, linhas perpendiculares ao eixo do tempo periodicamente repetidos são observados na faixa de frequência de 0 a 800 Hz, nos tempos de 7 s, 8 s e 10 s. Nas outras peças o mesmo fenômeno se repete em tempos diferentes.

Na mesma figura, na peça 6 uma forte excitação entre 2 vales, também pode ser observado, isso pode caracterizar uma possível irregularidade de contato entre as superfícies. Pode-se notar uma linha de base amarela semelhante em todas as imagens, identificando características de excitação em baixa frequência e com alta concentração de energia. Essa banda estreita de baixa frequência corresponde aos micros impulsos

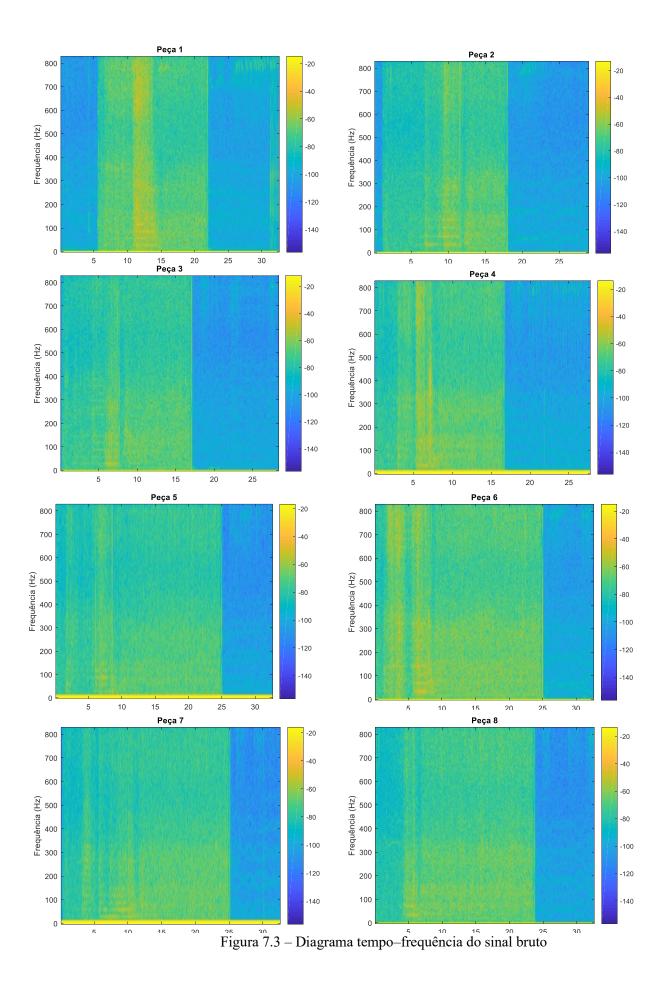
aleatórios causados por contatos diretos na superfície metálica durante todo o processo e têm maior probabilidade de excitar baixas frequências. Aqui também fica evidenciado que os sinais de vibração de RFW, possuem características de baixa frequência. Este detalhe e apresentado de forma ampliada na Figura 7.4, é uma indicação clara da faixa de frequência que corresponde ao atrito seco próximo ao centro da peça.7.4. Análise de tempo-frequência do sinal do primeiro e estágio

A STFT tem um tempo computacional elevado. Para simplificar o estudo e obter uma representação mais precisa, os sinais do primeiro estágio do processo foram normalizados e analisados. A Figura 7.5 apresenta a resposta da série temporal ao longo do primeiro estágio para as oito peças mostradas na Figura 7.3. Os resultados dos demais experimentos, por serem similares, foram disponibilizados no Apêndice C.

Como pode ser visto, o espectro obtido é bastante semelhante ao apresentado na Figura 7.3. O sinal de vibração contém informações valiosas, com a evolução de alguns componentes espectrais na faixa de até 800 Hz detectada. A concentração de energia está relacionada a uma banda de baixa frequência, representada pelas linhas horizontais contínuas em determinadas faixas de tempo, com variação de até 300 Hz. Essas energias correspondem a um aumento súbito de fricção.

As linhas horizontais podem ser confundidas com os harmônicos da frequência de rotação do eixo do motor da máquina RFW, mas os valores dos harmônicos da rotação dos motores são linhas contínuas ao longo do tempo e repetitivas ao longo da frequência. Portanto, essas linhas indicam vibração de fricção entre as superfícies das peças. Este resultado indica que as vibrações do processo RFW são moduladas por frequências diferentes da rotação do eixo da máquina.

Os impulsos aleatórios tornam-se evidentes no domínio tempo-frequência, e a energia no domínio da frequência também se concentra em torno da faixa entre 0 e 300 Hz. Pelas imagens dos espectrogramas, é evidente que a ocorrência de impulsos aleatórios no sinal de vibração leva a um aumento da energia vibratória. As assinaturas nos espectrogramas são consistentes, e os resultados dos efeitos induzidos pelo atrito nos sinais de vibração podem ser considerados um método promissor para avaliar a qualidade do processo RFW e caracterizar as características de vibração.



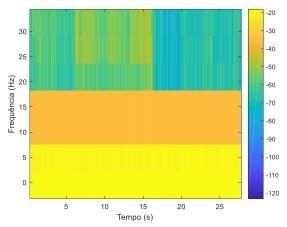
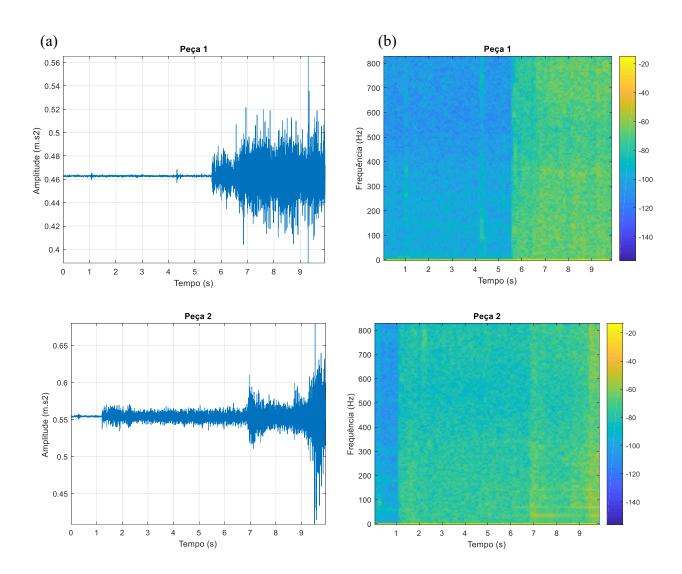
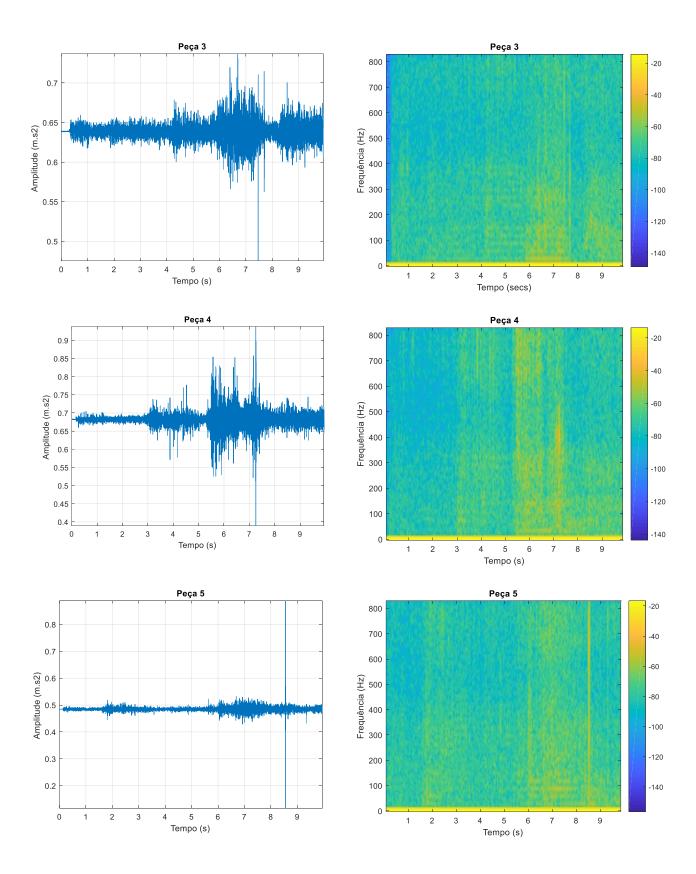
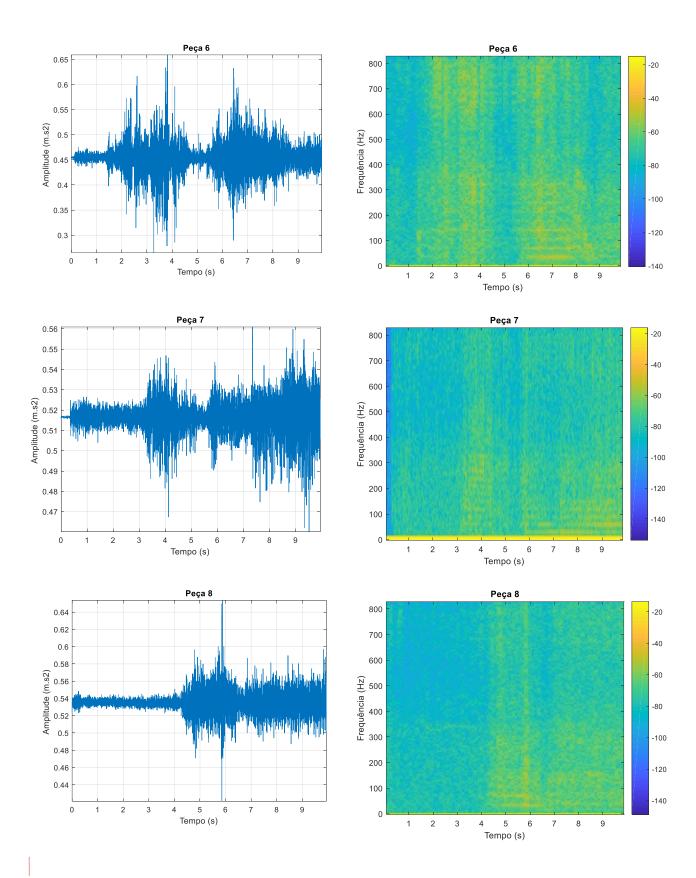
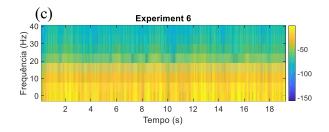


Figura 7.4 – Diagrama tempo-frequência do sinal bruto da peça 4 (ampliado)









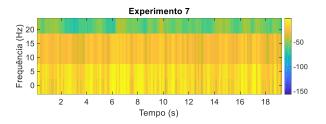


Figura 7.5 – (a) Sinal temporal do estágio estacionário, (b) Diagrama tempo–frequência do estágio estacionário, (c) Diagrama tempo–frequência do sinal bruto das peças 6 e 7 (ampliado)

A visão ampliada da faixa de baixa frequência revela transições quase contínuas com pequenos blocos e alguns gaps causados por microimpactos na extremidade da peça, indicando uma vibração periódica de amplitude constante. Notavelmente, ocorre uma mudança significativa na energia das frequências entre 9 e 11 Hz ao longo de todo o estágio estacionário. Essas frequências são consistentemente dominantes durante todo o processo CDFW, estendendo-se até 15 Hz. Este fenômeno pode ser atribuído ao intenso atrito deslizante entre as superfícies próximas à extremidade da peça, onde o material apresenta características plásticas. Essas variações são consistentes em todos os experimentos conduzidos.

Os blocos observados na faixa de baixa frequência são uma consequência da limitação do *Short-Time Fourier Transform* (STFT) em identificar frequências muito próximas, apesar de o STFT demonstrar uma resposta eficaz às variações de potência. Ao comparar os diferentes experimentos, é evidente que diferentes parâmetros de entrada influenciam nas características dos sinais de vibração. Essa análise reforça a conclusão de que o CDFW é um processo essencialmente caracterizado por sinais de vibração de baixa frequência e alta energia. Este achado é corroborado por estudos anteriores (JIN; LI; LIU; *et al.*, 2019), que indicam que o efeito corona se inicia na periferia da junta, expande em direção ao centro e preenche a interface de soldagem.

Para uma análise mais aprofundada da correlação entre os sinais de vibração e a qualidade da junção, os sinais do primeiro estágio foram decompostos em várias bandas de frequência pelo método *Empirical Mode Decomposition* (EMD), como será detalhado no próximo item.

7.5. Decomposição EMD

Os sinais do estágio estacionário foram decompostos pelo método *Empirical Mode Decomposition* (EMD), e *as Intrinsic Mode Functions* (IMFs) geradas no domínio do tempo estão apresentadas no Apêndice D. Observa-se nas figuras que as amplitudes e energias das IMFs do sinal de vibração variam significativamente com diferentes parâmetros de entrada, indicando sensibilidade dos sinais às condições operacionais.

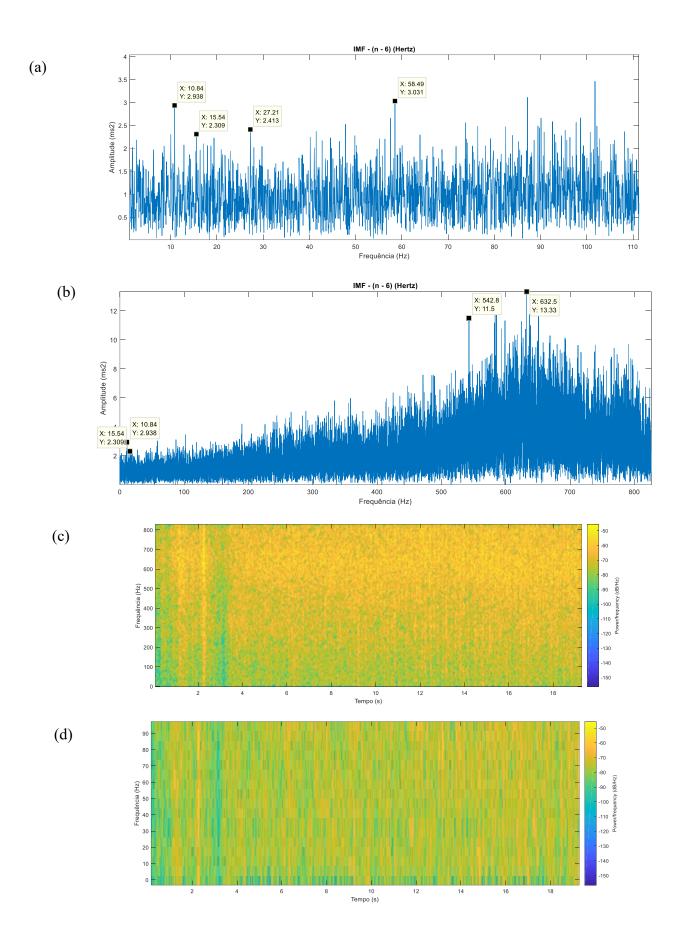
Devido às variações nos sinais de vibração do estágio estacionário, a quantidade de IMFs também varia, sendo que maior quantidade está associada a sinais com mais ruído. As IMFs obtidas contêm informações de frequência distintas, cada uma representando vibrações dinâmicas do processo. A IMF-1, a componente de alta frequência mais completa, abrange principalmente frequências entre 200 Hz e 800 Hz, refletindo modulações na velocidade intermediária de rotação. As IMFs de baixa frequência começam a partir da IMF-6 e exibem alta energia com padrões periódicos em frequências de até 30 Hz. Os padrões das IMFs variam conforme ilustrado nos gráficos, refletindo flutuações nas frequências instantâneas dos sinais devido aos impactos de fricção durante a plastificação do material interno e externo (*flash*).

Os resíduos das IMFs mostram padrões de decomposição semelhantes e aleatórios, indicando a natureza estocástica do processo. Portanto, é viável selecionar IMFs que formam bandas de diferentes frequências, considerando que as de ordem superior capturam tanto variações de linha de base quanto componentes de alta frequência, predominantemente de ruído. As frequências mais baixas são associadas à fricção próxima da periferia (atrito plástico), enquanto as mais altas são geradas mais próximas ao centro (atrito seco).

Como mencionado anteriormente, o processo CDFW é caracterizado por variações em baixas frequências. Detalhando as IMFs no domínio da frequência, conforme mostrado na Figura 7.6(a), observase a contribuição das baixas frequências, enquanto na Figura 7.6(b) destaca-se a predominância das altas frequências e sua interação com as componentes de baixa frequência.

Pode-se concluir que a energia dos sinais de vibração em altas frequências é significativamente maior do que em baixas, devido à presença intensa de ruído de alta frequência. Na Figura 7.6(c) e (d), no domínio tempo-frequência, o ruído de alta frequência sobrepõe-se a qualquer informação presente. Na figura ampliada das baixas frequências, observam-se linhas espectrais dispersas, indicando a ausência de ruído e a visibilidade das oscilações induzidas pelo movimento rotativo.

O sinal purificado obtido após a remoção de ruído é representado na Figura 7.6(e) e (f). Durante esse processo, as características periódicas dos microimpactos são preservadas, e frequências cíclicas abaixo de 20 Hz são dominantes.



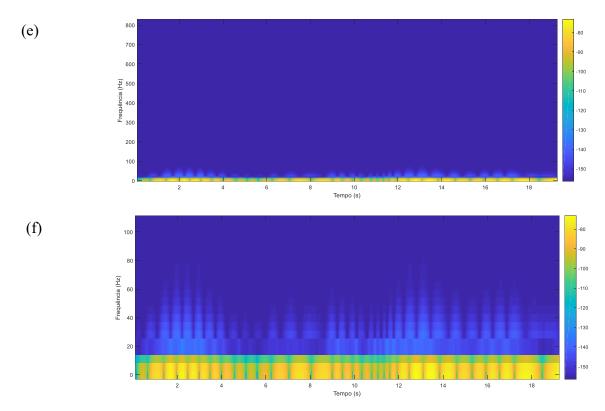


Figura 7.6 – Sinal decomposto pelo IMF (a) FFT de baixa frequência (b) FFT de alta frequência (c) STFT com ruído (d) STFT ampliada na baixa frequência (e) STFT filtrada (f) STFT filtrada e ampliada

Teoricamente, devido à presença de ruído no sinal de vibração bruto, é difícil extrair com precisão alguma característica desses sinais. Assim, EMD aumenta a capacidade de análise no domínio do tempo, possui capacidade para adquirir as características locais de vibração e separar as frequências do sinal de vibração. Além disso, de acordo com (WU; QU, 2009), pode ser útil para analisar sinais estacionários e não estacionários, características intrínsecas ao sinal de vibração CDFW. As informações extraídas até aqui não permitem uma caracterização adequada, analisar como várias condições de entrada afetam as características do sinal de vibração é necessário. É importante verificar as múltiplas frequências e seus impactos nos atributos de qualidade. Nas etapas seguintes, aplicamos um critério estatístico automatizado para decidir as IMFS mais eficazes para o diagnóstico de qualidade.

7.6. Seleção e extração de recursos estatísticos

A seleção de recursos é realizada de forma a remover características extraídas que não contribuem substancialmente para a precisão da classificação. Para selecionar os melhores recursos, aplicou-se o algoritmo de árvore de decisão baseado em máquina de estados finitos. Neste estudo, as características estatísticas obtidas a partir do sinal de vibração (IMFs) são alimentadas como entrada para o algoritmo de classificação específico, e a árvore de decisão correspondente é obtida. O algoritmo básico é discreto, conforme descrito anteriormente na Figura 6.3.

Este algoritmo foi implementado para lidar com variáveis-alvo binárias em ambiente Matlab. A árvore de decisão classifica recursos, começando pela classificação de estacionariedade, redução dimensional de recursos, classificação ANOVA das IMFs, classificação dos recursos e teste ANOVA da combinação dos fatores de qualidade e recursos estatísticos. A seguir, cada ramo da árvore de decisão é descrito separadamente:

- Classificação de Estacionariedade: Inicialmente, os sinais de vibração são avaliados quanto à
 estacionariedade utilizando o teste de *Dickey-Fuller*. Somente os componentes estacionários são
 considerados para as etapas seguintes.
- 2) Redução Dimensional de Recursos: Após a classificação de estacionariedade, realiza-se a redução dimensional dos recursos para eliminar redundâncias e reduzir a complexidade computacional.
- 3) Classificação ANOVA das IMFs: Utiliza-se a análise de variância (ANOVA) para classificar as IMFs com base na significância estatística de suas características. IMFs com *p-values* inferiores a 0,05 são consideradas significativas e retidas para análise posterior.
- 4) Classificação dos Recursos: As características significativas são então classificadas utilizando o algoritmo de árvore de decisão. Este processo identifica as características que mais contribuem para a precisão da classificação.
- 5) Teste ANOVA da Combinação dos Fatores de Qualidade e Recursos Estatísticos: Finalmente, realizase um teste ANOVA para avaliar a combinação dos fatores de qualidade com os recursos estatísticos. Esta etapa garante que somente os recursos que possuem uma correlação significativa com os fatores de qualidade sejam considerados no modelo final.

Este método de seleção de recursos garante que o modelo final seja eficiente e preciso, eliminando características que não contribuem de maneira significativa para a classificação.

7.6.1. Classificação de estacionariedade

Para verificar a natureza do sinal original, aplicou-se o teste estatístico de triagem estacionária *Dickey-Fuller* (DF) ao sinal original e a cada componente (IMF) decomposto pelo EMD, com um nível de significância de 5%. A Figura 7.7 apresenta um resumo de cada experimento, onde a estacionariedade do sinal original de vibração foi verificada pelo teste DF.

De um modo geral, um valor de *p-value* < 0,05 no teste DF é indicativo de estacionariedade, ou seja, média e variância são constantes no estágio estacionário. Observando os diferentes valores de *p-value*, conclui-se que não há evidências muito fortes de estacionariedade para todos os experimentos. No Apêndice H, os valores do teste DF para todas as IMFs são apresentados, com a parte sombreada representando os sinais estacionários.

Cada experimento é decomposto em quantidades diferentes de IMFs, e para cada caso, o nível de ruído é variável. Os sinais de vibração CDFW contêm componentes estacionários e não estacionários. Considerando a quantidade de IMFs, há menos componentes não estacionários, com a maioria destes presentes apenas na IMF10.

O último componente representa o resíduo, enquanto os demais representam as vibrações características do processo. A natureza do sinal parece não depender dos parâmetros de entrada, mas revela alguma discrepância nos resultados do teste DF para os componentes não estacionários. Assim, com base no Apêndice H, pode-se concluir que os sinais de vibração CDFW têm componentes estacionários e não estacionários.

Intuitivamente, o processo CDFW é teoricamente estacionário, mas apresenta uma fraca não estacionariedade. Assim, as seis primeiras IMFs de alta frequência e as seis últimas de baixa frequência (excluindo o resíduo) de cada experimento foram classificadas para análise na próxima etapa.

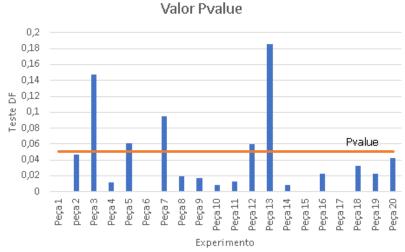


Figura 7.7 – Teste DF no sinal temporal original do estágio estacionário

7.6.2. Extração de recursos estatísticos no domínio do tempo e frequência

Após a classificação dos sinais pelo teste DF, a extração de recursos estatísticos das IMFs selecionadas é uma etapa vital na análise dos sinais de vibração CDFW, embora seja demorada e requeira um alto tempo computacional. Os recursos calculados para cada IMF são apresentados no Apêndice E, indicando características informativas complementares sobre a natureza do sinal. Esses recursos serão

utilizados nas próximas etapas para identificar informações relacionadas aos fatores de qualidade.

Apresentamos aqui apenas os resultados da IMF1 de cada experimento, conforme observado na Tabela 7.1, com os resultados das outras IMFs no Apêndice I. Os valores do coeficiente de correlação geralmente variam entre 0 e 1, indicando baixo grau de correlação perto de 0 e alto grau de correlação perto de 1. Os eixos x e y identificam o número do experimento.

0.18 0.28 -0.57 -0 74 0.19 0.18 -0.14 -0.02 0.04 -0.03 -0.27 -0.29 -0.02 -0.3 -0.22 -0.26 0.04 Cv 0.8 -0.14 -0.26 -0.19 -0.07 -0.11 -0.14 0.92 -0.07 0.95 0.57 -0.11 -0.02 -0.07 -0.03 0.42 0.04 0.31 -0.08 0.57 0.6 En 0.04 -0.11 0.95 -0.12 0.37 -0.07 -0.04 0.95 0.26 -0.14 0.48 0.4 -0.04 -0.04 -0.02 -0.03 -0.14 0.25 0.32 -0.12 0.89 0.48 Enp 0.89 -0.31 -0.04 0.98 0.22 0.96 Fc 0.84 0.98 -0.03 -0.12 -0.03 -0.12 0.2 Sf 0.98 0.92 0.99 Fi -0.28 -0.07 -0.04 0.22 -0.07 -0.74 -0.29 0.04 -0.04 -0.02 0.98 0.04 -0.2 0.76 Mi 0.91 0.98 -0.04 0.31 0.19 -0.02 0.95 -0.03 0.42 0 0.04 -0.08 -0.2 RMS -0.07 0.31 0.05 0.31 -0.26 -0.04 -0.3 -0.26 0.26 0.32 -0.22 -0.22 -0.11 0.26 -0.4 PAPR -0.22 -0.08 -0.14 -0.12 -0.08 0.26 -0.3 -0.14 -0.3 -0.26 0.48 0.48 -0.04 -0.63 0.48 -0.6 -0.02 -0.11 0.25 -0.19 0.18 0.04 -0.11 -0.12 0.37 -0.07 -0.04 0.26 -0.14 σ En Enp RMS Pk Var

Tabela 7.1 – Matriz de correlação entre os recursos estatísticos da IMF1 de cada experimento

Uma vez que as respostas dos recursos estatísticos foram calculadas para todos os experimentos e IMFs, estes são avaliados pelo algoritmo da árvore de decisão para determinar quais IMFs e recursos estatísticos fornecem as informações mais discriminatórias sobre os sinais. Os componentes diagonais representam instâncias corretamente identificadas na matriz de confusão com valor máximo. As características mais relevantes foram escolhidas a partir de uma pontuação de classificação, seguindo um critério combinado de dispersão e correlação. Esse processo foi repetido para todas as características estatísticas. No experimento 3, observou-se uma forte correlação entre Kv-Sk, Kv-Fc, Kv-Sf, Kv-Fi, Kv-Mi e Kv-PAPR. Adotou-se uma abordagem conservadora, selecionando recursos estatísticos com correlação superior a 0,8 para representar os demais. Este procedimento foi estendido a todos os experimentos e IMFs, resultando em uma redução.

A Tabela 7.2 mostra as características temporais e espectrais classificadas que foram selecionadas para avaliar a qualidade CDFW.

Tabela 7.2 - Recursos estatísticos classificados

Tommonois	Sk (a)	Cv (b)	En (e)	Fi(i)	Mi (j)	
Temporais	PAPR (m)	Pk (n)	Var (p)	Kv(c)		
Espectrais	Pse (a)	Cgf(b)	Kf(c)	RMSf(d)	Vf(e)	

Na árvore de decisão, apenas nove características temporais e cinco espectrais estão presentes. Após esta etapa de classificação e redução, o teste estatístico ANOVA foi utilizado como critério de seleção para todas as características selecionadas, aplicadas a todos os experimentos e IMFs. Os recursos insignificantes são removidos adotando-se o procedimento de eliminação retroativa, onde a variável com maior valor de *p*-value é eliminada com base no teste de significância da variável. Neste estudo, o teste para valor *p*-value é fixado em 0,05.

A classificação ANOVA das características estatísticas mais significativas é apresentada na Tabela 7.3, compilando os valores de *p-value* obtidos das IMF-1 e IMF-(n-6), indicando que os conjuntos de recursos são independentes e podem ser usados para avaliar a condição de qualidade. No Apêndice J, são mostrados os valores para as outras IMFs, que mudaram gradualmente à medida que se desenvolveu o processo, mas foram incapazes de fornecer informações significativas. Como resultado, pode-se observar que os parâmetros estatísticos mais eficazes foram selecionados, enquanto os parâmetros restantes foram excluídos de análises posteriores.

O procedimento de eliminação constatou que o valor *p-value* das IMFs 1 e n - 6 apresentou o menor valor, indicando que os conjuntos de dados são independentes e podem ser usados para avaliar a condição do sinal. Isso se deve ao fato de possuírem o maior índice de energia entre alta e baixa frequência. Portanto, apenas essas IMFs significativas são usadas para formar o modelo final. A dedução final é que as análises para indicadores de qualidade devem ser concentradas nos sinais de alta taxa de energia. As IMFs dominantes são as primeiras de alta e baixa frequência, respectivamente IMF-1 e IMF-2, que refletem a robustez das informações.

Tabela 7.3 - Classificação da significância dos recursos estatísticos com base na ANOVA

IMF1														
		P-Value		P-Value		P-Value		P-Value		P-Value		P-Value		P-Value
n		0,017		0,002		0,039		0,999		0,044		0,043		0,008
Pf	Sk (a)	0,995	Kv(c)	0	En (e)	0,021	PAPR (m)	0,029	Pk (n)	0,056	Var (p)	0,021	Vf (e)	0,006
Tf		0,022		0,001		0,016		0,79		0,064		0,016		0,109
Tn		0,118		0,001		0,057		0,105		0,174		0,057		0,014

IMF(n-6)								
		P-Value		P-Value		P-Value		P-Value
n		0,003		0,04		0,023		0,011
Pf	Cv (b)	0,003	Kv(c)	0,04	Fi (i)	0,005	Mi (j)	0,003
Tf		0,002		0,783		0,26		0,32
Tn		0,003		0,047		0,06		0,021

7.7 Caracterização dos parâmetros de entrada e fatores de qualidade

Na presente pesquisa, estabelece-se a análise da qualidade da junção CDFW pelo efeito paramétrico combinado entre os recursos estatísticos e os fatores de qualidade. É crucial ter uma compreensão abrangente

de como os recursos estatísticos se comportam sob diferentes condições experimentais. Conforme mencionado anteriormente, os recursos estatísticos calculados correspondem às IMF-1 e IMF-(n-6). Para isso, esta pesquisa analisa todas as IMFs selecionadas para verificar a significância dos quatro parâmetros de entrada sobre os recursos estatísticos, *burn-off, flash*, tamanho da TMAZ e valor médio do tamanho do grão na TMAZ. Cada experimento e suas respectivas IMFs foram analisados em um total de 340 testes. Nesta pesquisa, foram extraídos 16 recursos estatísticos temporais e 5 espectrais de cada IMF. Antes de proceder às análises, para que o modelo seja válido, as séries devem satisfazer a suposição de que os dados são normais. Portanto, o teste de normalidade de *Anderson-Darling* foi realizado. Uma breve avaliação dos dados mostra que os valores ajustados não são correlacionados, possuem uma constante variação e apresentam uma distribuição próxima à distribuição normal para todos os parâmetros estatísticos.

Na continuação, foi realizada a análise estatística ANOVA desses recursos para determinar os mais significativos, sendo classificados de acordo com seu valor *p-value*. Um valor de *p-value* maior que 0,10 indica insignificância, um valor entre 0,05 e 0,10 sugere leve importância e um valor menor que 0,05 indica significância (ANAHID; NIKNAM, 2024). Esse método determinará os parâmetros de entrada significativos para os parâmetros estatísticos e para os fatores de qualidade. Em seguida, para identificar os efeitos principais e suas interações, foi utilizado o gráfico de Pareto. Ao mesmo tempo, foi gerado o gráfico de efeitos, considerando um intervalo de confiança (IC) de 95%.

7.7.1 Caracterização do burn off e flash

Os parâmetros de entrada influenciam os resultados experimentais e também os sinais de vibração, que podem refletir variações *no burn-off* e no *flash* das juntas soldadas. A entrada de calor através do atrito reduziu o material base, causando um aumento no *burn-off* e no *flash*. Os valores do *burn-off*, mostrados na Figura 7.8(a)(b), variam de 1,34 mm a 6,56 mm.

É importante notar que os *burn-off* de todas as juntas de solda são assimétricos; neste estudo, apresentamos apenas os valores do lado fixo, que apresentou o maior valor. Essa variação pode ser atribuída a diferentes condições de operação, à heterogeneidade dos materiais utilizados e à convecção do ar no lado rotativo. Valores consistentes da área do *flash* indicam um processo estável e controlado. Os valores apresentados variam de 13,06 mm² a 19,00 mm², sugerindo que o material expelido ao longo da circunferência na interface de solda tinha uma largura radial uniforme, uma característica essencial para uma junta de boa qualidade. A variabilidade da área do *flash* em diferentes ciclos de soldagem pode ser atribuída a diferentes condições de operação ou à heterogeneidade dos materiais utilizados. Os dados coletados fornecem uma base para ajustes finos nos parâmetros de operação, visando interpretar os recursos estatísticos dos sinais de vibração. A análise contínua desses valores, juntamente com outros parâmetros do processo, pode levar a melhorias significativas na consistência e na qualidade das juntas soldadas.

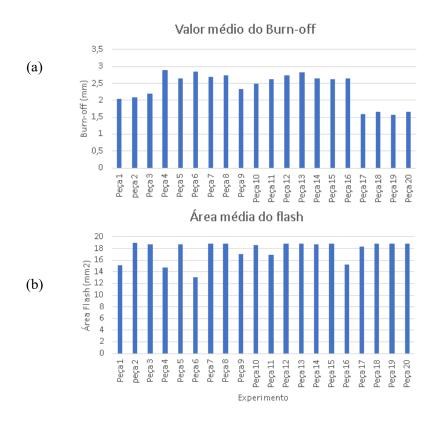


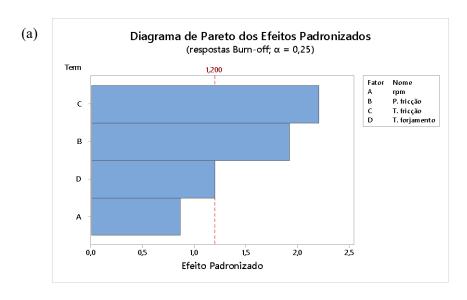
Figura 7.8 – (a) Valor médio do burn-off, (b) valor médio do flash no processo

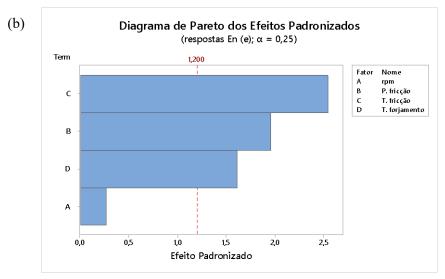
Após validar a normalidade, foram gerados gráficos de Pareto para o *burn-off, flash* e recursos estatísticos. Esses gráficos representam visualmente como os quatro parâmetros de entrada influenciam as respostas de saída, como o *burn-off* e *flash*. Os valores das IMF-1 e IMF-(n-6) foram classificados como dominantes no sinal e considerados nesta análise; entretanto, somente a IMF-1 apresentou maior nível de significância comparado com a IMF-(n-6). Como mencionado anteriormente, as outras IMFs mudaram gradualmente à medida que se desenvolveram, mas foram incapazes de fornecer informações significativas.

Assim, pode-se concluir que houve diferenças significativas nas variâncias dos parâmetros estatísticos. A variação dos parâmetros afeta as respostas, e as diferentes condições são refletidas nos gráficos. A Figura 7.9 mostra apenas os recursos que tiveram efeitos estatisticamente significativos no *burn-off*, ou seja, somente a IMF-1 foi considerada. Todas as variáveis de entrada que ultrapassam a linha vermelha são estatisticamente significativas.

Esta visualização auxilia na compreensão da relevância de cada parâmetro do processo. Para o *burnoff*, a Figura 7.9 revela um efeito positivo para todos os parâmetros e algumas interações. O fator C (tempo de fricção), B (pressão de fricção) e D (tempo de forjamento) são significativos; C é o fator mais significativo, enquanto B e D têm um impacto relativamente menor. O fator A não apresentou significância, e essa influência é mais detalhada na Figura 7.11.

A análise dos fatores En e Var na Figura 7.9 revela condições muito semelhantes ao fator de qualidade *burn-off*. A razão específica para esta semelhança é que o tempo de fricção e forjamento têm uma influência forte na resposta, provavelmente devido ao seu efeito na consolidação da junção de solda. As superfícies da junção tornam-se gradualmente lisas com o decorrer do tempo. O resultado mostra que, para as condições de operação utilizadas, o sinal de vibração foi sensível à relação entre *burn-off* e os fatores En e Var, sendo suficiente para criar uma métrica com potencial para verificar a qualidade.





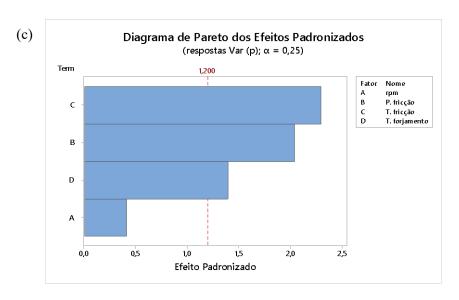


Figura 7.9 – Gráfico de Pareto (a) burn-off, (b) energia, (c) variância

Para refinar os resultados do experimento e ampliar ainda mais o estudo das interpretações da classificação, foi implementado um procedimento básico de análise de correlação. O coeficiente de determinação R^2 foi usado para descobrir quão próximos estão os valores de *burn-off* e os recursos estatísticos classificados. O valor de R^2 para *burn-off* e En(e) e entre *burn-off* e Var indicam que existe uma alta correlação, sugerindo que a classificação foi significativa, como mostrado no gráfico de correlação da Figura 7.10.

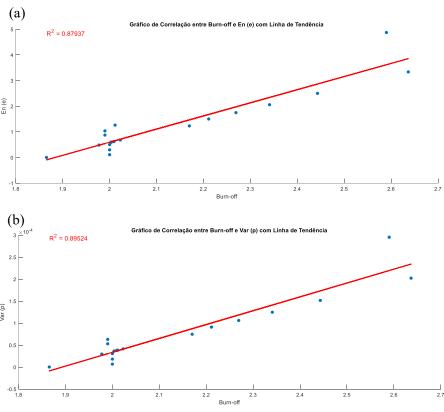


Figura 7.10 – Correlação entre (a) burn-off e En, (b) burn-off e Var

Vale ressaltar que a proposta da pesquisa é associar os fatores de qualidade com os recursos estatísticos; na próxima etapa, será avaliado o relacionamento entre as respostas e os parâmetros de entrada. Para isso, o gráfico de efeitos principais significativos mostrado na Figura 7.11 foi gerado para n, Pf, Tf, Tn e recursos estatísticos de *burn-off*.

O primeiro ponto a ser comentado é que a velocidade mostra uma relação direta nos efeitos do *burnoff*, En e Var; por outro lado, Pf, Tf e Tn apresentam uma relação inversa. As vibrações em RFW são complexas, e a distribuição de energia de vibração é afetada por muitos fatores. A energia do sinal está relacionada diretamente à velocidade devido ao aumento da frequência. Esta afirmação está de acordo com (PENG, Z. K.; CHU; TSE, 2005) os impactos gerados pelo atrito ocorrerão pelo menos uma vez por ciclo de rotação. Em alguns outros ciclos de rotação, a força da fricção pode variar e, portanto, a energia dos impactos também pode variar.

Por outro lado, os sinais de vibração indicam uma tendência ligeiramente crescente com o aumento do *burn-off*. A relação inversa de Pf, Tf e Tn é confirmada por (JIN; LI; LIU; *et al.*, 2019), que em sua pesquisa determinou que esses parâmetros são menos sensíveis à velocidade de rotação. Outra hipótese razoável para explicar este fato é que um aumento de Pf, Tf e Tn causa um aumento no *burn-off* e atritos mais fracos, diminuindo a energia do sinal. O sinal de vibração da IMF-1 para todos os experimentos apresenta características periódicas óbvias ao longo do eixo de tempo do espectro de energia. Isso é mais um indício de que, nos recursos estatísticos de vibração ocorridos nestes experimentos, é possível detectar a influência no *burn-off*. Portanto, En e Var para esta análise foram classificados com alta significância. O comportamento dessas variáveis foi muito semelhante ao ocorrido com o *burn-off*.

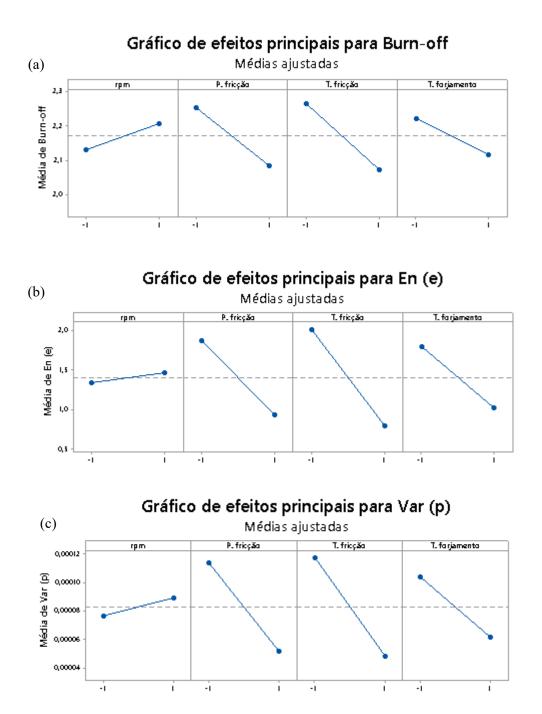
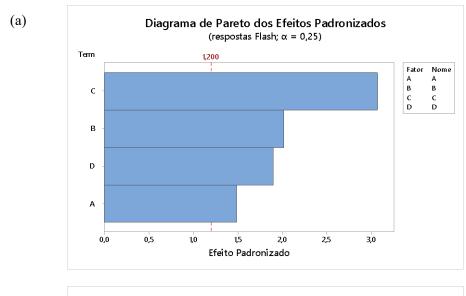


Figura 7.11 – Efeitos principais de cada parâmetro do processo sobre (a) burn-off, (b) energia, (c) variância

Conforme a Figura 7.12, mostramos apenas os recursos que tiveram efeitos estatisticamente significativos no *flash*, ou seja, somente a IMF-1 foi considerada. O tempo de fricção, pressão de fricção e o tempo de forjamento são os parâmetros mais eficazes que afetam individualmente o *flash* e Pk. Vale ressaltar que para o recurso estatístico Pk, a velocidade também foi significativa. Os recursos En(e) e Var também apresentam a mesma significância do parâmetro *flash*.



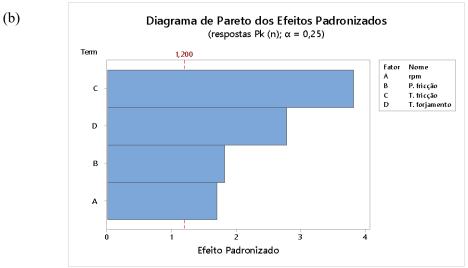


Figura 7.12 – Gráfico de Pareto (a) flash, (b) valor de pico

O coeficiente de determinação R^2 é usado para descobrir quão próximos estão os valores de *flash* e os recursos estatísticos classificados. Uma razão R^2 significativa entre duas estimativas é calculada para flash e En(e), *flash* e Var e *flash* e Pk, apresentando um valor baixo de 0,6016 e 0,6167 para R^2 , porém, a tendência ainda apresentou alto nível de significância (*pvalue* = 0,03), indicando que existe uma boa correlação, sugerindo que a classificação foi significativa, como mostrado no gráfico de correlação da Figura 7.13.

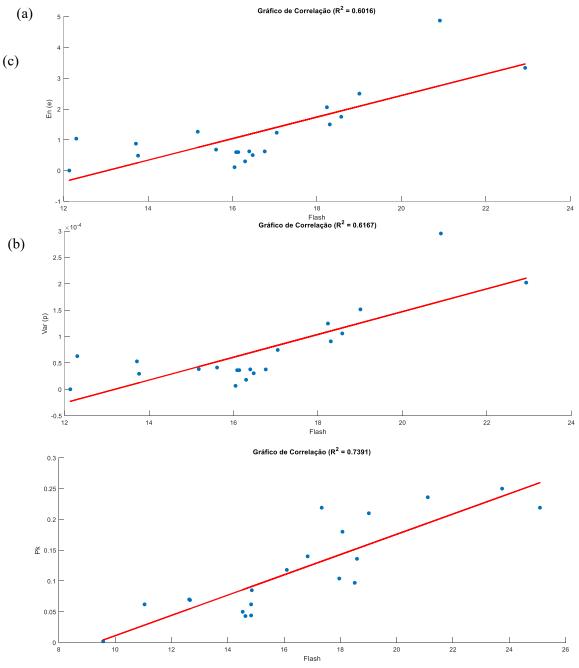


Figura 7.13 – Correlação entre (a) flash e En, (b) flash e var, (c) flash e Pk

O gráfico de efeito principal para *flash* revela um resultado semelhante ao do *burn-off*, com o acréscimo de Pk sendo significativo. Na Figura 7.14, os gráficos de efeitos principais mostram como cada fator afeta o *flash*, En, Var e Pk. As características En e Var são as mesmas analisadas no *burn-off*. Esta tendência é esperada porque, à medida que a velocidade aumenta, o efeito de convecção e da condutividade diminui a temperatura na borda do *flash* (LI, W *et al.*, 2008). Assim, menos geração de calor por atrito e deformação plástica comparativamente menor em velocidade rotacional menor. Com o material rígido, percebe-se a diminuição na velocidade e o aumento a energia de vibração. Portanto, En, Var e Pk para esta análise foram classificados com alta significância.

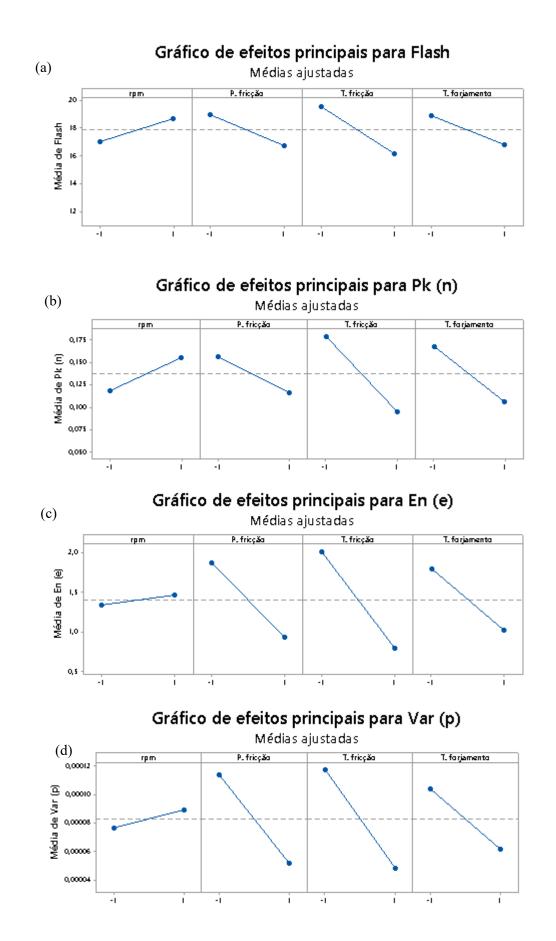


Figura 7.14 - Efeitos principais dos parâmetros sobre (a) flash, (b) energia, (c) variância, (d) pico

7.7.2 Caracterização macro e micro estrutural

A qualidade de uma junta soldada é função da menor largura média da TMAZ (*Thermomechanically Affected Zone*). Os valores da macroestrutura e microestrutura da junta soldada por fricção, produzida entre aços de carbono ASTM A36, são mostrados na Figura 7.9. Verificou-se que as microestruturas e macroestruturas apresentaram variações em termos de tipos, tamanhos e quantidades. A largura da TMAZ em ambos os lados é, em média, de cerca de 80 μm, devido à alta deformação em temperaturas elevadas. Além disso, observa-se que a largura da TMAZ aumenta gradualmente com o aumento do *burn-off*, conforme indicado em (NU; LOC; MINH, 2021). Como mostrado no Apêndice F, a região escura até a linha marcada na parte mais clara é indicada como material base. A região próxima à junção exibe um refinamento de grãos devido ao efeito de recristalização dinâmica e aos grãos plasticamente deformados na região TMAZ. No Apêndice G, são mostradas as microestruturas correspondentes à TMAZ de alguns experimentos utilizados para determinação do tamanho médio dos grãos.

O resultado estatístico dos grãos indica que a proporção de grãos com diâmetro médio é de 26 µm. Impulsos aleatórios induzidos por micro impactos são muito mais fracos do que aqueles causados por falhas de falta de aderência ou formação de vazios. Os grãos variam principalmente devido à distribuição heterogênea de temperatura e pressão. Esses grãos não são uniformes; o refinamento dos grãos aumenta a resistência à tração e a dureza, mas consequentemente diminui a ductilidade das juntas (KONGSIB; BREZING, 2015) . O tamanho do grão depende da geração de calor, e a velocidade de soldagem também influencia o tamanho do grão. Menor velocidade de soldagem promove alto calor de fricção, enquanto alta velocidade de soldagem proporciona menor entrada de calor de fricção.



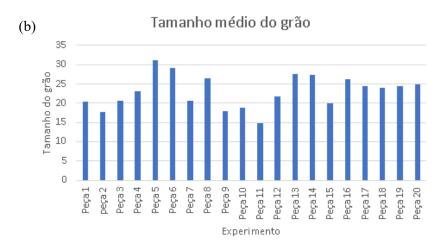
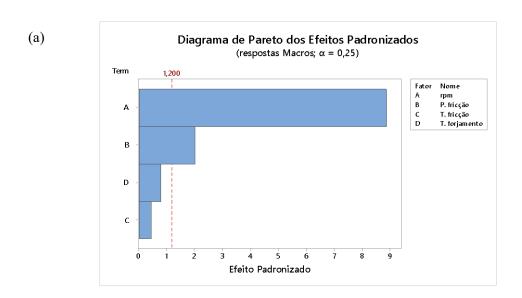


Figura 7.15 – (a) Valor médio TMAZ, (b) valor médio área de grão

A Figura 7.16(a) (b) indica os principais fatores individuais e interações significativas, correlacionando os resultados das medidas metalográficas com os sinais de vibração. Os resultados confirmaram que a velocidade e a pressão estão relacionadas ao aumento do tamanho médio dos grãos, revelando evidências de que a deformação da TMAZ está correlacionada com a evolução progressiva da rotação (ZHU *et al.*, 2009).



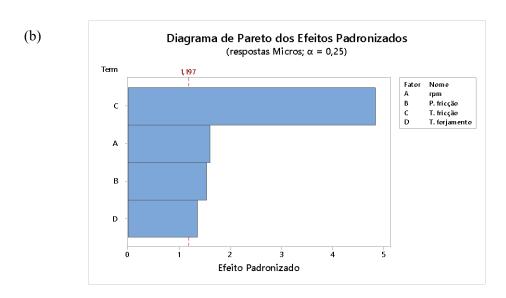


Figura 7.16 – Gráfico de Pareto (a) macroestrutura, (b) microestrutura

As macros e microestruturas examinadas exibem uma morfologia típica da maioria dos processos de fricção; as texturas analisadas dessas regiões pareciam qualitativamente semelhantes, embora a métrica gerada revelasse diferenças significativas.

Os efeitos principais de cada fator sobre a variável resposta macroestrutura e microestrutura são apresentados na Figura 7.17. Os resultados mostram que o aumento da velocidade teve um efeito positivo na microestrutura e na macroestrutura. Para o efeito da pressão de fricção, o aumento provocou uma diminuição; por outro lado, o aumento do tempo de fricção aumentou a microestrutura e não gerou nenhuma alteração na macroestrutura. Já o aumento do tempo de forjamento diminuiu a microestrutura e não provocou nenhuma alteração na macroestrutura. Estudos anteriores confirmam o resultado de nossa pesquisa(SATHIYA; ARAVINDAN; HAQ, 2005) (K2, 2015).

O método ANOVA foi utilizado para determinar se as relações dos recursos estatísticos formados eram apropriadas. Os recursos calculados não apresentaram nenhuma tendência particular, e as macro e microestruturas não puderam ser correlacionadas com os parâmetros de entrada. Como mencionado anteriormente, no estágio estacionário, por ser um algoritmo de extração linear, EMD e STFT não são robustos o suficiente para extrair informações de micro impactos (MATEO; TALAVERA, 2020; SHI *et al.*, 2020). Além desse fator, isto pode ser devido ao funcionamento mais suave (micro impactos) do processo (KONGSIB; BREZING, 2015).

Embora a maioria dos experimentos tenha mostrado uma linha de adesão completa sem defeitos visíveis, nos corpos de prova dos experimentos 3, 4 e 5, a área TMAZ apresentou defeitos, incluindo defeitos de porosidade na área metálica de solda. Esses defeitos na fase da microestrutura levam a alterações nas propriedades mecânicas da junção, alterando a qualidade. A análise espectral dos sinais, mostrada na Figura

7.5, revelou que a característica do sinal de vibração é influenciada pela não conformidade da TMAZ. E que o espectro de vibração pode ser utilizado como um indicador das condições de qualidade da junção. É claro que mais pesquisas são necessárias para considerar outros defeitos na escala microscópica.

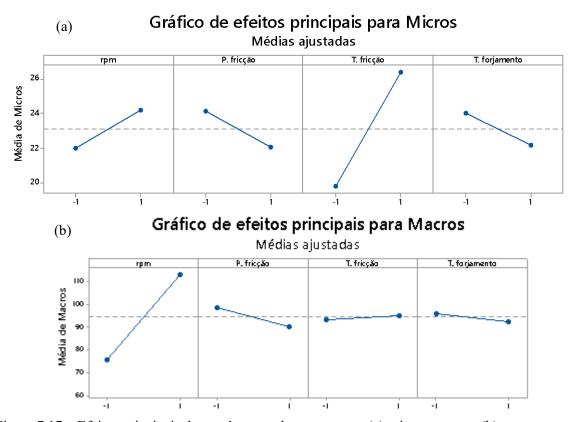


Figura 7.17 – Efeitos principais dos parâmetros do processo na (a) microestrutura, (b) macroestrutura

8. Validação dos resultados com sinal simulado

Como afirmado na introdução, o objetivo principal deste estudo é correlacionar os recursos estatísticos com os fatores de qualidade do processo, identificando quais recursos afetam os fatores de qualidade do processo CDFW (*Continuous Drive Friction Welding*). Para testar o modelo apresentado na Figura 6.3 e verificar sua eficácia em alcançar o objetivo proposto, foram realizados testes confirmatórios com nove sinais de vibração multivariada, incluindo três sinais sem significância, três sinais de média significância e três sinais de alta significância.

Esses sinais do processo CDFW foram simulados como sinais sintéticos gerados dentro das faixas selecionadas de condição paramétrica para produzir um sinal semelhante ao original. As características estatísticas e propriedades do sinal real consideradas como referência para gerar o sinal sintético foram: amplitude, frequência, densidade espectral de potência, autocorrelação, ruído, RMS, desvio padrão, variância, curtose, assimetria, e propriedades estacionárias e não-estacionárias. Para diminuir o esforço computacional nessa etapa, a redução de características estatísticas foi realizada, analisando-se somente En, Var e Pk. Embora esta abordagem seja menos precisa do que a utilização de todos os recursos, ela é útil para validar as características selecionadas no processo experimental.

O Apêndice K apresenta os sinais sintéticos de cada classe nos domínios do tempo, frequência e tempo-frequência. Observa-se, pelas distribuições dos níveis de vibração, que a intensidade de energia é diferente em cada tipo de sinal sintético. As frequências dominantes foram obtidas a partir do espectro de frequência usando o método FFT, e as frequências de tempo pelo método STFT. Para detectar e caracterizar os parâmetros estatísticos, foi aplicado o método experimental proposto em todas as etapas.

A Tabela 8.1 apresenta a matriz de confusão dos resultados das análises dos sinais sintéticos. Os sinais foram selecionados com base no resultado do ANOVA, utilizando o p valor. Dos três conjuntos de avaliações (sem significância, média significância e alta significância), o nível 3 (alta significância) foi selecionado como ideal.

Tabela 8.1 - Matriz de confusão das análises dos sinais sintéticos

Fator de qualidade	sem significância	média significância	alta significância		
sem significância	1	2	0		
média significância	0	3	0		
alta significância	0	0	3		

Entre os nove sinais, apenas dois sinais sem significância foram identificados erroneamente, mas todos os outros foram analisados corretamente. Portanto, foi observada uma boa concordância entre os fatores de qualidade *burn-off, flash* e as características estatísticas En, Var e Pk. Estes podem ser efetivamente utilizados como características estatísticas de sinais de vibração para uma análise satisfatória da qualidade no processo CDFW, com razoável precisão.

9. CONCLUSÃO

Este trabalho propõe uma metodologia inédita para a determinação da qualidade da junção de soldagem no processo CDFW (Continuous Drive Friction Welding) através de sinais de vibração. Foram apresentadas análises experimentais e simulações para caracterizar os sinais em função dos fatores de qualidade do processo. Características estatísticas foram extraídas a partir dos sinais de vibração brutos adquiridos e decompostos. Duas metodologias de análise foram propostas: uma utilizando diagrama espectral (STFT) e outra através da extração de recursos estatísticos dos sinais. Adicionalmente, foi desenvolvida uma metodologia de avaliação e classificação da estacionariedade dos sinais.

A pesquisa concentrou-se na análise dos sinais do estágio estacionário, correlacionando-os com os fatores de qualidade. Utilizou-se um classificador de árvore de decisão, baseado em máquina de estados finitos, para selecionar as características dominantes entre 22 recursos estatísticos e dezenas de IMFs extraídas do sinal. A classificação dos resultados experimentais e simulados demonstrou que o método proposto possui alta probabilidade de detecção e baixa probabilidade de falsos indicadores. Apesar de não representar necessariamente um caso de defeito, os resultados evidenciam a capacidade da metodologia de identificar componentes úteis para a análise de qualidade. Os principais destasques da pesquisa são:

- 1) Embora trabalhos anteriores tenham analisado os sinais de vibração brutos como não estacionários, nesta pesquisa os sinais na etapa estacionária exibem uma natureza estacionária, com componentes estacionários e não estacionários após decomposição.
- 2) O processo CDFW é caracterizado principalmente por sinais de vibração de baixa frequência, abaixo de 20Hz, com alta energia.
- 3) As imagens obtidas com base no espectrograma possuem propriedades únicas, mas um padrão comum pode ser encontrado em muitas delas, especificamente na faixa de 20 Hz. O espectrograma fornece análises de frequência importantes que podem detectar falhas existentes (linhas verticais e horizontais), demonstrando que a metodologia é simples e pode ser usada na análise de processos CDFW em tempo real.
- 4) A redução de IMFs assistida via ANOVA forneceu bons resultados. O método proposto utiliza o ANOVA para classificar os sinais e os recursos significativos, eliminando IMFs excessivas e identificando efetivamente os recursos estatísticos significantes.
- 5) O EMD (*Empirical Mode Decomposition*) ofereceu um método poderoso para processamento de sinais de vibração. O sinal decomposto de alta frequência (IMF-1) contém informações significativas do

- processo, sendo adequado para interpretar os sinais de vibração e prever a qualidade superficial das soldas por fricção.
- 6) A classificação binária baseada em máquina de estados finitos mostrou-se precisa, requerendo apenas um conjunto de regras *IF-THEN*. Este método é mais simples que os classificadores baseados em redes neurais e pode ser facilmente convertido em linguagem de máquina para aplicações industriais. As regras de decisão foram utilizadas para projetar um sistema *Ladder*.
- 7) Foi demonstrado que a análise de sinais de vibração pode ser usada para detectar irregularidades na junção de solda CDFW, como a formação de *flash* e *burn-off*.
- 8) A análise mostrou que os valores característicos do sinal, como En, Var e Pk, podem refletir efetivamente o estado e alterações nos fatores de qualidade *burn-off* e *flash*. A correlação entre o sinal de vibração e os fatores de qualidade foi corroborada por uma análise estatística através do coeficiente de determinação e da métrica ANOVA.
- 9) Aplicar muitos recursos estatísticos acabou sendo complexo. Recursos bem avaliados em outros processos de fabricação, como RMS, curtose e assimetria, foram indicadores muito menos seletivos neste contexto.
- 10)Os fatores de qualidade extraídos na zona afetada pelo calor de soldagem ao redor da junção não apresentaram significância.

A metodologia apresentada pode ser implementada em um sistema de automação, pois a aquisição de sinal não requer uma frequência de amostragem alta e a ANOVA não é muito exigente em termos de memória computacional, podendo ser implementada facilmente em um microcontrolador. No entanto, ainda há espaço para melhorias e trabalhos futuros nesta área. Algumas limitações precisam ser corrigidas, como a escolha para restrições dos classificadores. Além disso, nosso estudo foi limitado a um único material (ASTM A 36), sendo necessário realizar testes com outros materiais para comprovar a viabilidade para adoção industrial. Essas análises podem ser usadas para treinar sistemas *IoT* para que possam tomar decisões sempre que houver alteração anormal na leitura de qualquer parâmetro de qualidade.

10. REFERÊNCIAS

ABBOUD, D. *et al.* Envelope analysis of rotating machine vibrations in variable speed conditions: A comprehensive treatment. *Mechanical Systems and Signal Processing*, v. 84, p. 200–226, 2017.

ADALARASAN, R.; SHANMUGA SUNDARAM, A. Parameter design in friction welding of Al/SiC/Al2O3 composite using grey theory based principal component analysis (GT-PCA). *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, v. 37, n. 5, p. 1515–1528, 2015.

ADALARASAN, R.; SUNDARAM, A. Shanmuga. Parameter design and analysis in continuous drive friction welding of Al6061/SiCp composites. *Journal of Mechanical Science and Technology*, v. 29, n. 2, p. 769–776, 2015.

AHI, Ali Mahdian *et al.* Residual stress evaluation in friction stir-welded aluminum plates using finite element method and acoustic emission. *Journal of Materials Science*, v. 52, n. 4, p. 2103–2116, 2017.

AJITH, P.M.; HUSAIN, T.M. AFSAL; *et al.* Multi-objective Optimization of Continuous Drive Friction Welding Process Parameters Using Response Surface Methodology with Intelligent Optimization Algorithm. *Journal of Iron and Steel Research, International*, v. 22, n. 10, p. 954–960, 2015.

AJITH, P.M.; BARIK, Birendra Kumar; *et al.* Multiobjective optimization of friction welding of UNS S32205 duplex stainless steel. *Defence Technology*,v. 11, n. 2, p. 157–165, 2015.

AKBARIMOUSAVI, S. AA; GOHARIKIA, M. Investigations on the mechanical properties and microstructure of dissimilar cp-titanium and AISI 316L austenitic stainless steel continuous friction welds. *Materials and Design*, v. 32, n. 5, p. 3066–3075, 2011.

AMBROZIAK, Andrzej; GUL, Bartlomiej. Investigations of underwater FHPP for welding steel overlap joints. *Archives of Civil and Mechanical Engineering*, v. 7, n. 2, p. 67–76, 2007.

AMINI, S.; AMIRI, M. R. Study of ultrasonic vibrations' effect on friction stir welding. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, v. 73, n. 1–4, p. 127–135, 2014.

AMINI, Saeid; NAZARI, M. Mohammad; REZAEI, A. Bending vibrational tool for friction stir welding process. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, v. 84, n. 9–12, p. 1889–1896, 2016.

ANAHID, Mohamad Javad; NIKNAM, Seyed Ali. Sensitivity of acoustic emission signals features to cutting parameters in time domain: case of milling aeronautical aluminium alloys. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, v. 132, n. 1–2, p. 265–275, 1 2024.

ANANTHAPADMANABAN, D et al. A study of mechanical properties of friction welded mild steel to stainless steel joints. *Materials and Design*, v. 30, n. 7, p. 2642–2646, 2009.

ANKIRSKII, B. M. Effect of vibration and heat-treatment on the mechanical-properties of the metal and welded-joints in 20k steel. *Welding Production*, v. 32, n. 3, p. 26–28, 1985.

ARULARASU, S.; JOTHILINGAM, A. Design and development of low cost friction stir welding machine. *Advances in Engineering, Science and Management (ICAESM), 2012 International Conference on. IEEE*, p. 305–311, 2012.

ATES, Hakan; TURKER, Mehmet; KURT, Adem. Effect of friction pressure on the properties of friction welded. *Materials & design*, v. 28, n. 3, p. 948–953, 2007.

ATTALLAH, MM; PREUSS, M. Inertia friction welding (IFW) for aerospace applications. *Welding and joining of aerospace materials. Woodhead Publishing*, p. 25–74, 2012.

AZIZIEH, M. et al. Characterizations of dissimilar friction welding of ST37 and CK60 steels. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, v. 9, n. 85, p. 2773–2781, 2015.

BALACHANDAR, K.; JEGADEESHWARAN, R. Friction stir welding tool condition monitoring using vibration signals and Random forest algorithm - A Machine learning approach. 2021a, [S.l.]: Elsevier Ltd,. p. 1174–1180, 2021.

BALACHANDAR, K.; JEGADEESHWARAN, R. Friction stir welding tool condition monitoring using vibration signals and Random forest algorithm – A Machine learning approach. *Materials Today: Proceedings*, v. 46, p. 1174–1180, 1 jan. 2021b

BALASUBRAMANIAN, V. *et al.* A New Friction Law for the Modelling of Continuous Drive Friction Welding: Applications to 1045 Steel Welds. *Materials and manufacturing processes*, v. 14, n. 6, p. 845–860, 1999.

BALASUBRAMANIAN, Vikram *et al.* New friction law for the modelling of continuous drive friction welding: Applications to 1045 steel welds. *Materials and Manufacturing Processes*, v. 14, n. 6, p. 845–860, 1999.

BALTA, Berna; ARICI, A. Armagan; YILMAZ, Muharrem. Optimization of process parameters for friction weld steel tube to forging joints. *Materials and Design*, v. 103, p. 209–222, 2016.

BASHEER, U.M. et al. Effect of friction time on the properties of friction welded YSZ-alumina composite and 6061 aluminium alloy. *QScience Connect*, p. 8, 2013.

BATCHELOR, A.W. *et al.* The effect of metal type and multi-layering on friction surfacing. *Journal of Materials Processing Technology*, v. 57, p. 172–181, 1996.

BAYINDIR, R.; ATES, H. A novel control unit for a friction welding machine based on computer. *Materials and Manufacturing Processes*, v. 22, n. 1, p. 102–106, 2007a.

BAYINDIR, R.; ATES, H. Low-cost and high sensitively microcontroller based control unit for a friction welding machine. *Journal of Materials Processing Technology*, v. 189, n. 1–3, p. 126–131, 2007b.

BEN ALI, Jaouher *et al.* Application of empirical mode decomposition and artificial neural network for automatic bearing fault diagnosis based on vibration signals. *Applied Acoustics*, v. 89, p. 16–27, 2015.

BENNETT, C. Finite element modelling of the inertia friction welding of a CrMoV alloy steel including the effects of solid-state phase transformations. *Journal of Manufacturing Processes*, v. 18, p. 84–91, 2015.

BESLER, Florian A. *et al.* Friction crush welding of aluminium, copper and steel sheetmetals with flanged edges. *Journal of Materials Processing Technology*, v. 234, p. 72–83, 2016.

BEVINGTON, James H. US0709197A. [S.l: s.n.]., 1891

BHAMJI, I *et al.* Solid state joining of metals by linear friction welding: a literature review. *Materials Science and Technology*, v. 27, n. 1, p. 2–12, 2011.

BHAMJI, Imran *et al.* Linear friction welding of AISI 316L stainless steel. *Materials Science and Engineering A*, v. 528, n. 2, p. 680–690, 2010.

BILICI, Mustafa Kemal; YÜKLER, Ahmet Irfan. Influence of tool geometry and process parameters on macrostructure and static strength in friction stir spot welded polyethylene sheets. *Materials and Design*, v. 33, n. 1, p. 145–152, 2012.

BISHOP, E. Friction welding in the Soviet Union. *Welding and metal fabrication. IPC Scientific and Technology Press*, v. 28, p. 408–410, 1960.

BOUARROUDJ, El-oualid *et al.* Thermal analysis during a rotational friction welding. *Applied Thermal Engineering*, v. 110, p. 1543–1553, 2017.

BOZZI, S. *et al.* Influence of FSSW parameters on fracture mechanisms of 5182 aluminium welds. *Journal of Materials Processing Technology*, v. 210, n. 11, p. 1429–1435, 2010.

BU, Wende *et al.* Distribution and Variation Characteristics of Temperature in Inertia Friction Welded Inconel 718 Joint. *Advanced Materials Research. Trans Tech Publications*, v. 154, p. 1581–1585, 2011.

BUFFA, Gianluca *et al.* Shear coefficient determination in linear friction welding of aluminum alloys. *Materials & Design*, v. 82, p. 238–246, 2015.

CALIGULU, Ugur *et al.* The effects of process parameters for joining of AISI 1010-Cu alloys by friction welded. *International Journal of Steel Structures*, v. 15, n. 4, p. 923–931, 2015.

CAO, Yuanlong *et al.* Retracted: Anomaly detection with ensemble empirical mode decomposition and approximate entropy for quick user datagram protocol internet connection-based distributed Blockchain systems. *IET Software*, v. 17, n. 4, p. 742–754, 1 ago. 2023.

CARBONI, Michele; MORONI, Fabrizio. Tensile-shear fatigue behavior of aluminum and magnesium lap-joints obtained by ultrasonic welding and adhesive bonding. *Procedia Engineering*, v. 10, p. 3561–3566, 2011.

CELIK, Sare; ERSOZLU, Ismail. Investigation of the mechanical properties and microstructure of friction welded joints between AISI 4140 and AISI 1050 steels. *Materials and Design*, v. 30, n. 4, p. 970–976, 2009.

CHAINARONG, Suppachai; MEENGAM, Chaiyoot; TEHYO, Muhamad. Rotary friction welding of dissimilar joints between SSM356 and SSM6061 aluminium alloys produced by GISS. *Engineering Journal*, v. 21, n. 1, p. 181–191, 31 jan. 2017.

CHAMANFAR, Ahmad; JAHAZI, Mohammad; CORMIER, Jonathan. A Review on Inertia and Linear Friction Welding of Ni-Based Superalloys. *Metallurgical and Materials Transactions A: Physical Metallurgy and Materials Science*, v. 46, n. 4, p. 1639–1669, 2015.

CHANDER, G. Subhash; REDDY, G. Madhusudhan; RAO, A. Venugopal. Influence of Rotational Speed on Microstructure and Mechanical Properties of Dissimilar Metal AISI 304-AISI 4140 Continuous Drive Friction Welds. *Journal of Iron and Steel Research International*, v. 19, n. 10, p. 64–73, 2012.

CHEN, Changming; KOVACEVIC, Radovan; JANDGRIC, Dragana. Wavelet transform analysis of acoustic emission in monitoring friction stir welding of 6061 aluminum. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, v. 43, n. 13, p. 1383–1390, 2003.

CHEN, Hai-Yan *et al.* Radial Distribution Characteristics of Microstructure and Mechanical Properties of Ti–6Al–4V Butt Joint by Rotary Friction Welding. *Acta Metallurgica Sinica (English Letters* v. 28, n. 10, p. 1291–1298, 2015.

CHENG, C. J. Transient temperature distribution during friction welding of two similar materials in tubular form. *Welding Journal*, v. 41, n. 12, p. 542–550, 1962.

CHENITI, B., B Cheniti, D Miroud, R Badji, P Hvizdoš, M Fides, T Csanádi, B Belkessa, M Tata. Microstructure and mechanical behavior of dissimilar AISI 304L/WC-Co cermet rotary friction welds. *Materials Science and Engineering A*, v. 758, p. 36–46, 2019.

CHOWDHURY, Mohammad Asaduzzaman; HELALI, Maksud. The effect of amplitude of vibration on the coefficient of friction for different materials. *Tribology International*, v. 41, p. 307–314, 2008.

CHUDIKOV, A. I. Friction Welding. Russian Patent, RU106270, 1956.

COLLIGAN, K. Material flow behavior during friction welding of aluminum. *Welding journal*, v. 75, n. 7, p. 229–237, 1999.

CROSSLAND, B. Friction welding. US Patent ..., n. September, p. 17–18, 1971.

CUI, Lei, X. Yang, D. Wang, J. Cao, e W. Xu. Experimental study of friction taper plug welding for low alloy structure steel: Welding process, defects, microstructures and mechanical properties. *Materials and Design*, Inertial, v. 62, p. 271–281, 2014.

DAS, Bipul; PAL, Sukhomay; BAG, Swarup. A combined wavelet packet and Hilbert-Huang transform for defect detection and modelling of weld strength in friction stir welding process. *Journal of Manufacturing Processes*, v. 22, p. 260–268, 2016a.

DAS, Bipul; PAL, Sukhomay; BAG, Swarup. A combined wavelet packet and Hilbert-Huang transform for defect detection and modelling of weld strength in friction stir welding process. *Journal of Manufacturing Processes*, v. 22, p. 260–268, 2016b.

DAS, Bipul; PAL, Sukhomay; BAG, Swarup. Advances in Material Forming and Joining. 2015.

DAVARI, H, MH Parsa, AM Hadian, MN Ahmadabadi. Experimental and Numerical Thermomechanical Analysis of Hybrid Friction Welding of Commercially Pure Copper Bars. *Materials and Manufacturing Processes*, v. 26, n. 5, p. 694–702, 2011.

DAVÉ, V.R.; COLA, M J; HUSSEN, G N A. Heat Generation in the Inertia Welding of Dissimilar Tubes. *Welding Journal-New York*, v. 80, n. 10, p. 246s–252s, 2001.

DE BACKER, Jeroen *et al.* Investigation of path compensation methods for robotic friction stir welding. *Industrial Robot*, v. 39, n. 6, p. 601–608, 2012.

DELIBAS, Bulent; KOC, Burhanettin. A Method to Realize Low Velocity Movability and Eliminate Friction Induced Noise in Piezoelectric Ultrasonic Motors. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, v. 25, n. 6, p. 2677–2687, 2020.

DELIJAICOV, S *et al.* Characterization of the surface and mechanical properties of the friction stir welding in tri-dissimilar joints with aluminum alloys and titanium alloy. *International journal of research in engineering and technology*, v. 95, p. 1339–1355, 2017.

DEY, H. C. et al. Joining of titanium to 304L stainless steel by friction welding. *Journal of Materials Processing Technology*, v. 209, n. 18–19, p. 5862–5870, 2009.

DONATI, Lorenzo *et al.* FEM Analysis and Experimental Validation of Friction Welding Process of 6xxx Alloys for the Prediction of Welding Quality. *Materials Today: Proceedings*, v. 2, n. 10, p. 5045–5054, 2015.

DONG, Honggang *et al.* Direct Friction Welding of TiAl Alloy to 42CrMo Steel Rods. *Materials and Manufacturing Processes*, n. November 2014, p. 141016132602003, 2014.

ETESAMI, S. A. *et al.* Investigating the Properties of Friction Welded 2014 Aluminum Joints Prepared with Different Rotational Speeds. *Transactions of the Indian Institute of Metals*, v. 68, n. 3, p. 479–489, 2015.

FAKIH, Mohammad Ali *et al.* Detection and assessment of flaws in friction stir welded joints using ultrasonic guided waves: experimental and finite element analysis. *Mechanical Systems and Signal Processing*, v. 101, p. 516–534, 2018.

FANELLI, Pierluigi; VIVIO, Francesco; VULLO, Vincenzo. Experimental and numerical characterization of Friction Stir Spot Welded joints. *Engineering Fracture Mechanics*, v. 81, p. 17–25, 2012.

FAUZI, M.N. Ahmad *et al.* Microstructure and mechanical properties of alumina-6061 aluminum alloy joined by friction welding. *Materials and Design*, v. 31, n. 2, p. 670–676, 2010.

FELDMAN, Michael. Hilbert transform methods for nonparametric identification of nonlinear time varying vibration systems. *Mechanical Systems and Signal Processing*, v. 47, n. 1–2, p. 66–77, 2019.

FIGGIS, Benjamin; BERMUDEZ, Veronica; LOPEZ GARCIA, Juan. PV module vibration by robotic cleaning. *Solar Energy*, v. 250, p. 168–172, jan. 2023.

FOROOZMEHR, Ehsan; LIN, Dechao; KOVACEVIC, Radovan. Application of vibration in the laser powder deposition process. *Journal of Manufacturing Processes*, v. 11, n. 1, p. 38–44, 2009.

FOULADI, S.; ABBASI, M. The effect of friction stir vibration welding process on characteristics of SiO2 incorporated joint. *Journal of Materials Processing Technology*, v. 243, p. 23–30, 2017.

FROLOV, V. A. *et al.* Friction stir welding - Pluses and minuses. *Welding International*, v. 24, n. 5, p. 358–365, 2010.

FUKAKUSA, K. On the characteristics of the rotational contact plane - A fundamental study of friction surfacing. *Welding international*, v. 10, n. 7, p. 524–529, 1996.

GANDRA, J. et al. Friction surfacing - A review. *Journal of Materials Processing Technology*, v. 214, n. 5, p. 1062–1093, 2014.

GAO, D. *et al.* A new one-sided joining process for aluminum alloys: Friction Stir Blind Riveting. Journal of Manufacturing. *Science and Engineering*, v. 131, n. 6, p. 61002, 2009.

GARCÍA PLAZA, E.; NÚÑEZ LÓPEZ, P. J.; BEAMUD GONZÁLEZ, E. M. Efficiency of vibration signal feature extraction for surface finish monitoring in CNC machining. *Journal of Manufacturing Processes*, v. 44, p. 145–157, 2018.

GIBSON, B. T. *et al.* Friction stir welding: Process, automation, and control. *Journal of Manufacturing Processes*, v. 16, n. 1, p. 56-73, 2014

GRANT, B *et al.* Finite element process modelling of inertia friction welding advanced nickel-based superalloy. *Materials Science and Engineering A journal*, v. 514, p. 366–375, 2009.

GRIFFITHS, J. C. Coefficient of Variation 13.1 Concept and Procedure 13.2 Numerical Example on Geochemical Data of Karst Aquifer. . [S.l: s.n.], 1967.

HAN, Dongying; ZHAO, Na; SHI, Peiming. Gear fault feature extraction and diagnosis method under different load excitation based on EMD, PSO-SVM and fractal box dimension. *Journal of Mechanical Science and Technology*, v. 33, n. 2, p. 487–494, 2019.

HAN, Xinghui; HUA, Lin. Friction behaviors in cold rotary forging of 20CrMnTi alloy. *Tribology International*, v. 55, p. 29–39, 2012.

HANDA, Amit; CHAWLA, Vikas. Evaluation of tensile strength and fracture behavior of friction welded dissimilar steels under different rotational speeds and axial pressures. *Indian Academy of Sciences Evaluation*, v. 40, n. August, p. 1639–1655, 2015.

HANDA, Amit; CHAWLA, Vikas. Experimental evaluation of mechanical properties of friction welded AISI steels. *Cogent engineering*, v. 1, n. 1, p. 936–996, 2014.

HANDA, Amit; CHAWLA, Vikas; ROAD, Kapurthala. Mechanical Characterization of Friction Welded AISI 304 Steels. *International Journal of Engineering Sciences & Research Technology*, v. 2, n. 10, p. 10–13, 2013.

HANKE, Stefanie *et al.* Microstructural features of dynamic recrystallization in alloy 625 friction surfacing coatings. *Materials and Manufacturing Processes*, v. 33, n. 3, p. 270–276, 2018.

HASÇALIK, A.; ÜNAL, E.; ÖZDEMIR, N. Fatigue behaviour of AISI 304 steel to AISI 4340 steel welded by friction welding. *Journal of Materials Science*, v. 41, n. 11, p. 3233–3239, 2006.

HASSAN, A. J. et al. History of Microstructure Evolution and Its Effect on the Mechanical Behavior During Friction Welding for AISI 316. Applied Mechanics, Behavior of Materials, and Engineering Systems, p. 51–66, 2017.

HATTINGH, Danie G. *et al.* Residual Stresses in Overlapping Friction Taper Stud Welds. *Materials Science Forum*, v. 652, p. 111–115, 2010.

HATTINGH, Dg; ZYL, C Van. Temperature Distribution for a Friction Taper Stud Weld in Thick Walled 10CrMo910 Steel. *South African Inst. of Mech. Eng.*, v. 28, p. 37–45, 2012.

HAZRA, Mrityunjoy; RAO, Kotipalli Srinivasa; REDDY, Gankidi Madhusudhan. Friction welding of a nickel free high nitrogen steel: Influence of forge force on microstructure, mechanical properties and pitting corrosion resistance. *Journal of Materials Research and Technology*, v. 3, n. 1, p. 90–100, 2014.

HEBDA-SOBKOWICZ, Justyna *et al.* Informative frequency band selection in the presence of non-Gaussian noise – a novel approach based on the conditional variance statistic with application to bearing fault diagnosis. *Mechanical Systems and Signal Processing*, v. 145, p. 106971, 2020.

HEMMATI, Farzad; ORFALI, Wasim; GADALA, Mohamed S. Roller bearing acoustic signature extraction by wavelet packet transform, applications in fault detection and size estimation. *Applied Acoustics*, v. 104, p. 101–118, 2016.

HESSAINIA, Zahia *et al.* On the prediction of surface roughness in the hard turning based on cutting parameters and tool vibrations. *Measurement: Journal of the International Measurement Confederation*, v. 46, n. 5, p. 1671–1681, 2013.

HONG, Geonkyo; SUH, Dongjun. Mel Spectrogram-based advanced deep temporal clustering model with unsupervised data for fault diagnosis. *Expert Systems with Applications*, v. 217, 2023.

HONG, Li; HUANG, Di Shan; HUANG, Wei Ling. Vibration test on welding robot. 2020, Elsevier B.V., p. 323–329, 2020.

HONG, Yeh-Sun; DOH, Yoon-Ho. Analysis on the friction losses of a bent-axis type hydraulic piston pump. *KSME International Journal*, v. 18, n. 9, p. 1668–1679, 2004.

HUANG, Dan; CUI, Shuo; LI, Xiaoqing. Wavelet packet analysis of blasting vibration signal of mountain tunnel. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, v. 117, p. 72–80, 2019.

HUANG, Norden E. *et al.* The empirical mode decomposition and the Hubert spectrum for nonlinear and non-stationary time series analysis. *Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, v. 454, n. 1971, p. 903–995, 1998a.

HUANG, Norden E. *et al.* The empirical mode decomposition and the Hubert spectrum for nonlinear and non-stationary time series analysis. *Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, v. 454, n. 1971, p. 903–995, 1998b.

HUANG, Y X et al. New technique of in situ rolling friction stir welding. Science and Technology of Welding and Joining, v. 17, n. 8, p. 636–642, 2011.

HUANG, Yongxian *et al.* Self-riveting friction stir lap welding of aluminum alloy to steel. *Materials Letters*, v. 185, p. 181–184, 2016.

HUGGETT, D. J. et al. Prediction of friction stir weld quality without and with signal features. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, v. 95, n. 5–8, p. 1989–2003, 2018.

HYNES, N Rajesh Jesudoss; SUJANA, J Angela Jennifa; NAGARAJ, P. Controller for Friction Stud Welding Machine. *Energy Efficient Technologies for Sustainability (ICEETS)*, 2013 International Conference on. IEEE, p. 879–882, 2013.

IRACHETA, O; BENNETT, C J; SUN, W. A sensitivity study of parameters affecting residual stress predictions in finite element modelling of the inertia friction welding process. *INTERNATIONAL JOURNAL OF SOLIDS & STRUCTURES*, v. 71, p. 180–193, 2015.

ISLAM, Anas *et al.* Real-time data monitoring through sensors in robotized shielded metal arc welding. *Materials Today: Proceedings*, v. 26, p. 2368–2373, 2020.

IWASHITA, Tomoyuki. Method and apparatus for joining. U.S. Patent No. 6,601,751, n. 5, 2003.

JI, Shu De *et al.* 3D numerical analysis of material flow behavior and flash formation of 45# steel in continuous drive friction welding. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China (English Edition)*, v. 22, n. SUPPL.2, p. 528–533, 2012.

JI, Shude *et al.* New technique for eliminating keyhole by active-passive filling friction stir repairing. *Materials and Design*, v. 97, p. 175–182, 2016.

JIN, Feng; LI, Jinglong; LIU, Pu. Friction coefficient model and joint formation in rotary friction welding. *Journal of Manufacturing Processes*, v. 46, p. 286–297, 1 out. 2019.

JIN, Feng; LI, Jinglong; DU, Y. Numerical simulation based upon friction coefficient model on thermomechanical coupling in rotary friction welding corresponding with corona-bond evolution. *Journal of Manufacturing Processes*, v. 45, p. 595–602, 1 set. 2019.

JIN, Feng *et al.* The corona bond response to normal stress distribution during the process of rotary friction welding. p. 913–922, 2018.

JOSE, M J; KUMAR, S S; SHARMA, A. Vibration assisted welding processes and their influence on quality of welds. *Science and Technology of Welding and Joining*, v. 21, n. 0, p. 243–258, 2015.

JURČIUS, Aurimas; VALIULIS, Algirdas Vaclovas; ČERNAŠEJUS, Olegas. Effects of Vibration energy Input on Stress Concentration in Weld and Heat-affected Zone of S355J2 steel. *Solid State Phenomena*. *Trans Tech Publications*, v. 165, p. 73–78, 2010.

K2, Umanath K1* and Palanikumar. Influence of process parameter on microstructural characteristics and tensile properties of Friction Welded ASS304L alloy. *Applied Mechanics and Materials*, v. 767, p. 745–750, 2015.

KAHVECI, Kamil; CAN, Yilmaz; CIHAN, Ahmet. Heat Transfer in Continuous-Drive Friction Welding of Different Diameters. *Numerical Heat Transfer, Part A: Applications*, v. 48, n. 10, p. 1035–1050, 2005.

KALSI, Nirmal S.; SHARMA, Vishal S. A statistical analysis of rotary friction welding of steel with varying carbon in workpieces. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, v. 57, n. 9–12, p. 957–967, 2011.

KANAN, Luis Fernando *et al.* Friction Hydro-Pillar Processing of a High Carbon Steel: Joint Structure and Properties. *Metallurgical and Materials Transactions B: Process Metallurgy and Materials Processing Science*, p. 1–10, 2018.

KANNAN, S.; SENTHIL KUMARAN, S.; KUMARASWAMIDHAS, L. A. An investigation on mechanical property of commercial copper tube to aluminium 2025 tube plate by FWTPET process. *Journal of Alloys and Compounds*, v. 672, p. 674–688, 2016.

KAPOOR, Rajeev; NEMAT-NASSER, Sia. Determination of temperature rise during high strain rate deformation. *Mechanics of Materials*, v. 27, n. 1, p. 1–12, 1998.

KESSLER, M. et al. Modeling of upset and torsional moment during inertia friction welding. *Journal of Materials Processing Technology*, v. 227, p. 34–40, 2016.

KHODIR, Saad Ahmed; SHIBAYANAGI, Toshiya; NAKA, Masaaki. Microstructure and Mechanical Properties of Friction Stir Welded AA2024-T3 Aluminum Alloy. v. 47, n. 1, p. 185–193, 2006.

KIM, Yunhan *et al.* Phase-based time domain averaging (PTDA) for fault detection of a gearbox in an industrial robot using vibration signals. *Mechanical Systems and Signal Processing*, v. 138, p. 106544, 1 abr. 2020.

KLOPSTOCK, H.; NEELANDS, A. R. Patent Specification. *An improved method of joining and welding metals*, 1941.

KOHN, G. et al. Laser-assisted friction stir welding. Welding journal, v. 81, n. 2, p. 46–48, 2002.

KONGSIB, J; BREZING, A N. The Influence of Annealing on Material Properties of Rotary-Friction Welded. *IEEE IEEM*, p. 170–174, 2015.

KRAJEWSKI, Arkadiusz. Mechanical vibrations in welding processes. *Welding International*, v. 30, n. 1, p. 27–32, 2016.

KUMAR, M. Girish *et al.* Fault Diagnosis of Welded Joints through Vibration Signals Using Naïve Bayes Algorithm. *Procedia Materials Science*, v. 5, p. 1922–1928, 2014.

KUMAR, Rajeev; SINGH, Jujhar; SHARMA, Shubham; LI, Changhe; KRÓLCZYK, Grzegorz; ELDIN, Elsayed Mohamed Tag; *et al. Heliyon*, v. 8, n. 12, p. e12053, 2022.

KUMAR, Rajeev; SINGH, Jujhar; SHARMA, Shubham; LI, Changhe; KRÓLCZYK, Grzegorz; WOJCIECHOWSKI, Szymon. Neutrosophic entropy-based ingenious measurement for fast fourier transforms based classification of process-parameters and wear resistance of friction-stir processed hybrid AA7075-B4C aluminium metal-matrix composites. *Journal of Materials Research and Technology*, v. 20, p. 720–739, 2022.

KUMAR, Ujjwal *et al.* Defect identification in friction stir welding using discrete wavelet analysis. *Advances in Engineering Software*, v. 85, p. 43–50, 2015.

- KURT, A; UYGUR, I; PAYLASAN, U. Effect of Friction Welding Parameter on Mechanical and Microstructural Properties of Dissimilar AISI 1010-ASTM B22 Joints. *Welding Journal*, v. 90, n. 5, p. 102s–106s, 2011.
- LAKSHMINARAYANAN, A. K.; ANNAMALAI, V. E.; ELANGOVAN, K. Identification of optimum friction stir spot welding process parameters controlling the properties of low carbon automotive steel joints. *Journal of Materials Research and Technology*, v. 4, n. 3, p. 262–272, 2015.
- LAVAL, Laurent *et al.* H/sub/spl infin//-force control of a hydraulic servo-actuator with environmental uncertainties. *IEEE International Conference*, v. 2, p. 1566–1571, 1996.
- LEE, D G et al. Fatigue properties of inertia dissimilar friction-welded stainless steels. *Journal of materials processing technology*, v. 156, p. 1402–1407, 2004a.
- LEE, D. G. et al. Fatigue properties of inertia dissimilar friction-welded stainless steels. *Journal of Materials Processing Technology*, v. 155–156, n. 1–3, p. 1402–1407, 2004b.
- LI, Peng *et al.* A study of the mechanisms involved in initial friction process of continuous drive friction welding. *Journal of Adhesion Science and Technology*, v. 29, n. 12, p. 1246–1257, 2015a.
- LI, Peng *et al.* A study of the mechanisms involved in initial friction process of continuous drive friction welding. *Journal of Adhesion Science and Technology*, v. 29, n. 12, p. 1246–1257, 18 jun. 2015b.
- LI, Peng *et al.* Inhomogeneous interface structure and mechanical properties of rotary friction welded TC4 titanium alloy/316L stainless steel joints. *Journal of Manufacturing Processes*, v. 33, n. April, p. 54–63, 2018.
- LI, Peng; LI, Jinglong; DONG, Honggang. Analytical description of heat generation and temperature field during the initial stage of rotary friction welding. *Journal of Manufacturing Processes*, v. 25, p. 181–184, 2017.
- LI, W *et al.* Effect of friction time on flash shape and axial shortening of linear friction welded 45 steel. v. 62, p. 293–296, 2008.
- LI, Wenya *et al.* Influence of parent metal microstructure and post-weld heat treatment on microstructure and mechanical properties of linear friction welded Ti-6Al-4V joint. *Advanced Engineering Materials*, v. 14, n. 5, p. 312–318, 2012.
- LI, Wenya *et al.* Linear and rotary friction welding review Linear and rotary friction welding review. *International Materials Reviews*, v. 61, n. 2, p. 71–100, 2016.
- LI, Wenya; WANG, Feifan. Modeling of continuous drive friction welding of mild steel. *Materials Science and Engineering A*, v. 528, n. 18, p. 5921–5926, 2011.
- LI, Xiaohu *et al.* Milling chatter detection based on VMD and difference of power spectral entropy. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, v. 111, n. 7–8, p. 2051–2063, 2020.
- LI, Xin; MEI, Deqing; CHEN, Zichen. An effective EMD-based feature extraction method for boring chatter recognition. 2010, p. 1058–1063, 2010.

- LI, Xun *et al.* Effect of rotation speed on friction behavior and radially non-uniform local mechanical properties of AA6061-T6 rotary friction welded joint. *Journal of Adhesion Science and Technology*, v. 32, n. 18, p. 1987–2006, 2018.
- LI, Xun *et al.* Microstructure evolution and mechanical properties of rotary friction welded TC4/SUS321 joints at various rotation speeds. *Materials & Design*, 3.5, v. 99, p. 26–36, 2016.
- LIANG, Chen. Effect of Rotation Speed on Temperature Field and Axial Shortening of Inertia Friction Welded GH4169 Joints by Numerical Simulation. v. 16, n. 3, p. 277–280, 2011.
- LIU, Chenyu *et al.* Vibration-based gear continuous generating grinding fault classification and interpretation with deep convolutional neural network. *Journal of Manufacturing Processes*, v. 79, p. 688–704, 2022.
- LIU, H. J.; LI, J. Q.; DUAN, W. J. Friction stir welding characteristics of 2219-T6 aluminum alloy assisted by external non-rotational shoulder. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, v. 64, n. 9–12, p. 1685–1694, 2013.
- LIU, Huihong; FUJII, Hidetoshi. Ultralow rotation speed produces high-quality joint in dissimilar friction welding of Ti–6Al–4V alloy and SUS316L stainless steel. *Materials Science and Engineering A*, v. 800, 2022.
- LIU, X. C.; WU, C. S.; PADHY, G. K. Improved weld macrosection, microstructure and mechanical properties of 2024Al-T4 butt joints in ultrasonic vibration enhanced friction stir welding. *Science and Technology of Welding and Joining*, v. 20, n. 4, p. 345–352, 2015.
- LIU, Zhenlei *et al.* Effects of intense cooling on microstructure and properties of friction-stir-welded Ti–6Al–4V alloy. *Materials Science and Technology (United Kingdom)*, v. 34, n. 2, p. 209–219, 2018.
- LU, Siliang *et al.* Sound-aided vibration weak signal enhancement for bearing fault detection by using adaptive stochastic resonance. *Journal of Sound and Vibration*, v. 449, p. 18–29, 9 jun. 2019.
- LUO, J; WANG, X J; WANG, J X. New technological methods and designs of stir head in resistance friction stir welding. *Science and Technology of Welding and Joining*, v. 14, n. 7, p. 650–654, 2009.
- LUO, Jian *et al.* A new current hybrid inertia friction welding for nickel-based superalloy K418-alloy steel 42CrMo dissimilar metals. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, v. 70, n. 9–12, p. 1673–1681, 2014.
- LUO, Jian *et al.* Radial friction welding interface between brass and high carbon steel. *Journal of Materials Processing Technology*, v. 212, n. 2, p. 385–392, 2012.
- MA, Hong *et al.* Effect of post-weld heat treatment on friction welded joint of carbon steel to stainless steel. *Journal of Materials Processing Technology*, v. 227, p. 24–33, 2016.
- MA, Hong *et al.* Microstructure characterization and properties of carbon steel to stainless steel dissimilar metal joint made by friction welding. *Materials & Design*, v. 86, p. 587–597, 2015.
- MAALEKIAN, M. Friction welding critical assessment of literature. *Science and Technology of Welding and Joining*, v. 12, n. 8, p. 738–759, 2007.

MACÍAS, E. J. et al. Characterisation of friction stir spot welding process based on envelope analysis of vibro-acoustical signals. Science and Technology of Welding and Joining, v. 20, n. 2, p. 172–180, 2015.

MAHAJAN, Aditya M. *et al.* Effect of Heat Treatment on the Microstructure and Mechanical Properties of Rotary Friction Welded AA7075 and AA5083 Dissimilar Joint. *Materials*, v. 16, n. 6, p. 2464, 20 mar. 2023.

MAO, Jia Jia; ZHANG, Wei. Linear and nonlinear free and forced vibrations of graphene reinforced piezoelectric composite plate under external voltage excitation. *Composite Structures*, v. 203, p. 551–565, 2018.

MARINO, Luca; CICIRELLO, Alice. Coulomb friction effect on the forced vibration of damped mass– spring systems. *Journal of Sound and Vibration*, v. 535, 29 set. 2022.

MARTINSEN, K.; HU, S. J.; CARLSON, B. E. Joining of dissimilar materials. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, v. 64, n. 2, p. 679–699, 2015.

MATEO, Carlos; TALAVERA, Juan Antonio. Bridging the gap between the short-time Fourier transform (STFT), wavelets, the constant-Q transform and multi-resolution STFT. *Signal, Image and Video Processing*, v. 14, n. 8, p. 1535–1543, 2020.

MEISNAR, M et al. Microstructural characterisation of rotary friction welded AA6082 and Ti-6Al-4V dissimilar joints. *Materials & Design*, v. 132, p. 188–197, 2017a.

MEISNAR, M. *et al.* Microstructural characterisation of rotary friction welded AA6082 and Ti-6Al-4V dissimilar joints. *Materials and Design*, v. 132, p. 188–197, 2017b.

MENDES, Nuno *et al.* Machines and control systems for friction stir welding: A review. *Materials and Design*, v. 90, p. 256–265, 2016a.

MENDES, Nuno et al. Machines and control systems for friction stir welding: A review. [S.l.]: Elsevier B.V., v. 90, 2016b

MENG, Xiangchen *et al.* Interface characteristic and tensile property of friction stir lap welding of dissimilar aircraft 2060-T8 and 2099-T83 Al–Li alloys. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, v. 94, n. 1–4, p. 1253–1261, 2018.

MERCAN, Serdar; AYDIN, Sinan; ÖZDEMIR, Niyazi. Effect of welding parameters on the fatigue properties of dissimilar AISI 2205–AISI 1020 joined by friction welding. *International Journal of Fatigue*, v. 81, p. 78–90, 2015.

MERKLEIN, M; GIERA, ZsA. Integrated process simulation and die-design in sheet metal forming. *International Journal of Material Forming*, v. 1, p. 185–188, 2008.

MIN, Junying *et al*. Mechanical property of Al alloy joints by friction stir blind riveting. *Procedia Engineering*, v. 81, n. October, p. 2036–2041, 2014.

MONTAG, Tobias *et al.* Influence of tool wear on quality criteria for refill friction stir spot welding (RFSSW) process. *Procedia CIRP*, v. 24, n. C, p. 108–113, 2014.

MONTAZEROLGHAEM, Hamid; BADROSSAMAY, Mohsen; TEHRANI, Alireza Fadaei. Investigation of Vibration Assisted Friction Stir Welding. *Key Engineering Materials*, v. 504–506, p. 741–746, 2012.

MOSTAFAPOUR, A; GHOLIZADEH, V. Experimental investigation of the effect of vibration on mechanical properties of 304 stainless steel welded parts. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, v. 70, n. 5–8, p. 1113–1124, 2014.

MOUSMOULIS, G. et al. Application of Spectral Kurtosis on vibration signals for the detection of cavitation in centrifugal pumps. Applied Acoustics, v. 182, p. 108289, 2021.

NANDAN, R.; DEBROY, T.; BHADESHIA, H. K D H. Recent advances in friction-stir welding - Process, weldment structure and properties. *Progress in Materials Science*, v. 53, n. 6, p. 980–1023, 2008.

NETO, Diogo Mariano; NETO, Pedro. Numerical modeling of friction stir welding process: A literature review. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, v. 65, n. 1–4, p. 115–126, 2013.

NICHOLAS, E.D. Friction Processing Technologies. *Welding in the World*, variantes do processo, v. 47, n. 11, p. 2–9, 2003.

NICHOLAS, E.D. Radial friction welding. Welding Journal, v. 62, n. 7, p. 19–29, 1983.

NIE, Longfei *et al.* Microstructure evolution modeling of FGH96 superalloy during inertia friction welding process. *Finite Elements in Analysis and Design*, v. 80, p. 63–68, 2014.

NIKSEFAT, By Navid; SEPEHRI, Nariman. Designing Robust Force Control of Despite System and Environmental Uncertainties. *IEEE Control Systems*, v. 21, n. 2, p. 66–77, 2001.

NU, Ho Thi My *et al.* A study on rotary friction welding of titanium alloy (Ti6Al4V). *Advances in Materials Science and Engineering*, v. 2019, 2019.

NU, Ho Thi My; LOC, Nguyen Huu; MINH, Luu Phuong. Influence of the rotary friction welding parameters on the microhardness and joint strength of Ti6Al4V alloys. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers*, *Part B: Journal of Engineering Manufacture*, v. 235, n. 5, p. 795–805, 1 abr. 2021.

OBERLE, Theodore L.; LOYD, C. D.; CALTON, M. R. Inertia welding dissimilar metals. *WELD J*, v. 46, n. 4, p. 511–516, 1967.

ÖZDEMIR, N. O. Investigation of the mechanical properties of friction-welded joints between AISI 304L and AISI 4340 steel as a function rotational speed. *Materials letters*, v. 59, p. 2504–2509, 2005.

OZDEMIR, N.; SARSILMAZ, F.; HASÇALIK, A. Effect of rotational speed on the interface properties of friction-welded AISI 304L to 4340 steel. *Materials and Design*, v. 28, n. 1, p. 301–307, 2007.

ÖZDEMIR, Niyazi; ORHAN, Nuri. Microstructure and mechanical properties of friction welded joints of a fine-grained hypereutectoid steel with 4% Al. *Journal of Materials Processing Technology*, v. 166, n. 1, p. 63–70, 2005.

PADHY, G. K.; WU, C. S.; GAO, S. Friction stir based welding and processing technologies - processes, parameters, microstructures and applications: A review. *Journal of Materials Science and Technology*, v. 2, 2017.

PALANIVEL, R. *et al.* Microstructure and mechanical characterization of continuous drive friction welded grade 2 seamless titanium tubes at different rotational speeds. *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, v. 154, p. 17–28, 2017.

PALANIVEL, R; DINAHARAN, I; LAUBSCHER, R F. Author 's Accepted Manuscript. *Materials Science & Engineering A*, 2017.

PALANIVEL, R; LAUBSCHER, R F; DINAHARAN, I. An investigation into the effect of friction welding parameters on tensile strength of titanium tubes by utilizing an empirical relationship. *Measurement*, 2016.

PEETERS, Cédric; ANTONI, Jérôme; HELSEN, Jan. Blind filters based on envelope spectrum sparsity indicators for bearing and gear vibration-based condition monitoring. *Mechanical Systems and Signal Processing*, v. 138, p. 106556, 1 abr. 2020.

PEJRYD, Lars; LARSSON, Joakim; OLSSON, Mikael. Process monitoring of wire drawing using vibration sensoring. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, v. 18, p. 65–74, 1 ago. 2017a.

PEJRYD, Lars; LARSSON, Joakim; OLSSON, Mikael. Process monitoring of wire drawing using vibration sensoring. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, v. 18, p. 65–74, 1 ago. 2017b.

PENG, Z. K.; CHU, F. L.; TSE, Peter W. Detection of the rubbing-caused impacts for rotor–stator fault diagnosis using reassigned scalogram. *Mechanical Systems and Signal Processing*, v. 19, n. 2, p. 391–409, 1 mar. 2005.

PENG, Z.; KESSISSOGLOU, N. An integrated approach to fault diagnosis of machinery using wear debris and vibration analysis. *Wear*, v. 255, n. 7–12, p. 1221–1232, 2003.

POLLAK, Artur *et al.* Prediction of belt drive faults in case of predictive maintenance in industry 4.0 platform. *Applied Sciences (Switzerland)*, v. 11, n. 21, 2021.

POULIMENOS, A. G.; FASSOIS, S. D. Parametric time-domain methods for non-stationary random vibration modelling and analysis - A critical survey and comparison. *Mechanical Systems and Signal Processing*, v. 20, n. 4, p. 763–816, 2006.

PRASHOB, K.; SENTHIL KUMARAN, S.; KANNAN, S. Optimization of friction welding of commercial copper tube to AL 6063 tube plate using an external tool with clearance fit. *International Journal of Applied Engineering Research*, v. 10, n. 49, p. 540–544, 2015.

PUČKO, Bogdan; GLIHA, Vladimir. Effect of vibration on weld metal hardness and toughness. *Science and Technology of Welding and Joining*, v. 10, n. 3, p. 335–339, 2005.

RAAB, Ulrich *et al.* Orbital Friction Welding of Titanium Blisks: Process Characteristics and Microstructure Development. p. 327–330, 2016.

RABI, J.; BALUSAMY, T.; RAJ JAWAHAR, R. Analysis of vibration signal responses on pre induced tunnel defects in friction stir welding using wavelet transform and empirical mode decomposition. *Defence Technology*, 2019a.

RABI, J.; BALUSAMY, T.; RAJ JAWAHAR, R. Analysis of vibration signal responses on pre induced tunnel defects in friction stir welding using wavelet transform and empirical mode decomposition. *Defence Technology*, n. xxxx, 2019b.

RABI, J.; BALUSAMY, T.; RAJ JAWAHAR, R. Analysis of vibration signal responses on pre induced tunnel defects in friction stir welding using wavelet transform and empirical mode decomposition. *Defence Technology*, n. xxxx, 2019c.

RABI, J.; BALUSAMY, T.; RAJ JAWAHAR, R. Analysis of vibration signal responses on pre induced tunnel defects in friction stir welding using wavelet transform and empirical mode decomposition. *Defence Technology*, v. 15, n. 6, p. 885–896, 1 dez. 2019d.

RAFI, H. Khalid *et al.* Microstructure and tensile properties of friction welded aluminum alloy AA7075-T6. *Materials and Design*, v. 31, n. 5, p. 2375–2380, 2010.

RAHMI, M.; ABBASI, Mahmoud. Friction stir vibration welding process: modified version of friction stir welding process. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, p. 1–11, 2016.

RAIMONDI, Luca *et al.* Development of a novel monitoring system for the in-process characterisation of the machine and tooling effects in Inertia Friction Welding (IFW). *Mechanical Systems and Signal Processing*, v. 156, p. 107551, 1 jul. 2021.

RAJAN, S Pandia; SENTHIL KUMARAN, S; KUMARASWAMIDHAS, L A. An investigation on thermal and friction effect produced by friction welding of SA 213 tube to SA 387 tube plate. *Alexandria Engineering Journal*, v. 55, n. 1, p. 101–112, 2016.

RAO, Singiresu S.; YAP, Fook Fah. Mechanical Vibration. n. 0904582, p. 4–5, 2011.

RASHIDI, Arash; MOSTAFAPOUR, Amir. Influence of machine parameters on material flow behavior during channeling in modified friction stir channeling. *International Journal of Material Forming*, v. 9, n. 1, p. 1–8, 2014.

RATKOVIĆ, Nada *et al.* Micro-structure in the joint friction plane in friction welding of dissimilar steels. *Procedia Engineering*, v. 149, p. 414–420, 2016.

REIMANN, Martin *et al.* Keyhole closure using friction spot welding in aluminum alloy 6061-T6. *Journal of Materials Processing Technology*, v. 237, p. 12–18, 2016.

RIBEIRO JUNIOR, Ronny Francis; DE ALMEIDA, Fabrício Alves; GOMES, Guilherme Ferreira. Fault classification in three-phase motors based on vibration signal analysis and artificial neural networks. *Neural Computing and Applications*, v. 32, n. 18, p. 15171–15189, 1 set. 2020.

RICHTER, W. Herbeifuehrung einer haftverbindung zwischen plaettehen aus werkzeugstahl und deren traegern nach art einer schweissung oder loetung. *Patent no. DE477084*, 1929.

ROVERE, C. A. Della *et al.* Corrosion behavior of radial friction welded supermartensitic stainless steel pipes. *Materials and Design*, 3.5, v. 65, p. 318–327, 2015.

ROVERE, C.A. Della *et al.* Local mechanical properties of radial friction welded supermartensitic stainless steel pipes. *Materials in Engineering*, v. 56, p. 423–427, 2014.

ROVERE, Carlos Alberto Della *et al.* Microstructure and corrosion resistance of radial friction welded supermartensitic stainless steels. *Welding International*, v. 30, n. 7, p. 512–519, 2016.

RUSSELL, M. J. *et al.* Recent developments in the friction stir welding of titanium alloys. *Welding in the World*, v. 52, n. 9–10, p. 12–15, 2008.

RYKALIN, N. N.; PUGIN, A. I.; VASIL'EVA, V. A. The heating and cooling of rods butt welded by the friction process. *Welding Production*, p. 42–52, 1959.

SA, A; FALS, H Carvajal; JIME, E. Application of vibroacoustic signals to evaluate tools profile changes in friction stir welding on AA 1050 H24 alloy. v. 17, n. 6, p. 501–511, 2012.

SAHIN, Mumin. Evaluation of the joint-interface properties of austenitic-stainless steels (AISI 304) joined by friction welding. *Materials and Design*, v. 28, n. 7, p. 2244–2250, 2007.

SAHIN, Mümin. Joining with friction welding of high-speed steel and medium-carbon steel. *Journal of Materials Processing Technology*, v. 168, n. 2, p. 202–210, 2005.

SAHIN, Mümin. Simulation of friction welding using a developed computer program. *Journal of Materials Processing Technology*, v. 154, p. 1011–1018, 2004.

SAHIN, Mumin; ÇIL, Ender; MISIRLI, Cenk. Characterization of properties in friction welded stainless steel and copper materials. *Journal of Materials Engineering and Performance*, v. 22, n. 3, p. 840–847, 2013.

SAHU, Santosh K *et al.* Monitoring of friction stir welding for dissimilar Al 6063 alloy to polypropylene using sensor signals. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2019.

SAIDI, Lotfi; ALI, Jaouher Ben; FNAIECH, Farhat. Bi-spectrum based-EMD applied to the non-stationary vibration signals for bearing faults diagnosis. *ISA Transactions*, v. 53, n. 5, p. 1650–1660, 1 set. 2014.

SAKANO, R. et al. Development of Spot FSW Robot System for Automobile Body Members. *Third International Symposium on Friction Stir Welding*, 2001a.

SAKANO, R. et al. Development of Spot FSW Robot System for Automobile Body Members. *Third International Symposium on Friction Stir Welding*, 2001b.

SAKURADA, Daisuke; KATOH, Kazuyoshi; TOKISUE, Hiroshi. Underwater friction welding of 6061 aluminum alloy. *Journal of Japan Institute of Light Metals*, v. 52, n. 1, p. 2–6, 2002.

SALAWU, O.S. Detection of structural damage through changes in frequency: a review. *Engineering Structures*, v. 19, n. 9, p. 718–723, 1997.

SATHIYA, P.; ARAVINDAN, S.; HAQ, A. Noorul. Mechanical and metallurgical properties of friction welded AISI 304 austenitic stainless steel. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, v. 26, n. 5–6, p. 505–511, 2005.

SCHILLING, Christoph; SANTOS, Jorge Dos. Patente United States Patent. Method and device for joining at least two adjoining work pieces by friction welding. U.S. Patent n. 6,722,556, n. 1, 2004.

SCHMICKER, D.; NAUMENKO, K.; STRACKELJAN, J. A robust simulation of Direct Drive Friction Welding with a modified Carreau fluid constitutive model. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, v. 265, p. 186–194, 2013.

SCHMICKER, D; PERSSON, P; STRACKELJAN, J. Implicit Geometry Meshing for the simulation of Rotary Friction Welding. *Journal of Computational Physics*, v. 270, p. 478–489, 2014.

SELI, Hazman *et al.* Mechanical evaluation and thermal modelling of friction welding of mild steel and aluminium. *Journal of Materials Processing Tech.*, v. 210, n. 9, p. 1209–1216, 2010.

SELVAMANI, S T; PALANIKUMAR, K. Optimizing the friction welding parameters to attain maximum tensile strength in AISI 1035 grade carbon steel rods. Elsevier Ltd, 2014.

SENKOV, Oleg N. *et al.* Inertia Friction Welding of Dissimilar Superalloys Mar-M247 and LSHR. *Metallurgical and Materials Transactions A*, v. 45, n. 12, p. 5545–5561, 2014.

SHANJEEVI, C.; SATISH KUMAR, S.; SATHIYA, P. Multi-objective optimization of friction welding parameters in AISI 304L austenitic stainless steel and copper joints. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, v. 230, n. 3, p. 449–457, 2016.

SHEN, Zhikang *et al.* Microstructure and mechanical properties of friction spot welded 6061-T4 aluminum alloy. *Materials & Design*, v. 54, p. 766–778, 2014.

SHI, Huaitao *et al.* Incipient Fault Detection of Rolling Element Bearings Based on Deep EMD-PCA Algorithm. *Shock and Vibration*, v. 2020, 2020.

SHRIVASTAVA, Amber *et al.* Force measurement-based discontinuity detection during friction stir welding. *Journal of Manufacturing Processes*, v. 26, p. 113–121, 2017.

SINGH, Gurinder Singh Brar1 and Ajay Singh Jamwal. Friction Crush Welding of Aluminium Alloy 6061 T-6. v. 9, n. 2, p. 101–104, 2017.

SINGH, Shailesh K. *et al.* Experimental and numerical studies on friction welding of thixocast A356 aluminum alloy. *Acta Materialia*, v. 73, p. 177–185, 2014.

SONG, Yu-lai et al. Strength distribution at interface of rotary-friction-welded aluminum to nodular cast iron. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, v. 18, n. 1, p. 14–18, 2008.

SOUZA, Roberto M. *et al.* Deep learning for diagnosis and classification of faults in industrial rotating machinery. *Computers & Industrial Engineering*, v. 153, p. 107060, 1 mar. 2021. TEIDELT, Elena; STARCEVIC, Jasminka; POPOV, Valentin L. Influence of Ultrasonic Oscillation on Static and Sliding Friction. *Tribology Letters*, v. 48, n. 1, p. 51–62, 2012.

TEWARI, B Y S P. Effects of Longitudinal Vibration on Tensile Properties of Weldments. *Welding journal*, v. 73, n. 11, p. 2725–2765, 1994.

THIEN, Dang *et al.* A Welding Temperature Determination Method of by Rotary Friction Welding Process. 2016.

THOMAS, W.; NICHOLAS, D. Leading edge-friction hydro pillar processing. *TWI Connect*, p. 1992, 1992.

THOMAS, W.M. et al. GB Patent application 9125978.8;US Patent No. 5460317. 1991.

THOMAS, W.M.; THREADGILL, P.L.; NICHOLAS, E.D. Feasibility of friction stir welding steel. *Science and Technology of Welding and Joining*, v. 4, n. 6, p. 365–372, 1999.

TITILAYO, Akinlabi Esther; MAKUNDWANEYI, Madyira; AKINWALE, Akinlabi Stephen. Reconfiguration of a Milling Machine to Achieve Friction Stir Welds. *Mechanical and Aerospace Engineering, ICMAE2012*, Applied Mechanics and Materials. v. 232, p. 86–91, 2012.

TRANCOSSI, Michele; DUMAS, Antonio. Direct Drive Friction Welding: A Comprehensive Mathematical Model. *SAE Technical Paper*, v. 1, p. 1869, 2010.

TYAGAR, Kh A. Friction welding in the reconditioning of worn components. *Svar. Proizvod*, v. 1, n. 10, p. 3–24, 1959.

UDAY, M B et al. Advances in friction welding process: a review. Science and Technology of Welding and Joining, v. 15, n. 7, p. 534–559, 2010.

UDAY, M. B. et al. An insight into microstructural evolution during plastic deformation in AA6061 alloy after friction welding with alumina-YSZ composite. *Mechanics of Materials*, v. 91, n. P1, p. 50–63, 2015.

UDAY, M. B. *et al.* Evaluation of interfacial bonding in dissimilar materials of YSZ-alumina composites to 6061 aluminium alloy using friction welding. *Materials Science and Engineering*, v. 528, n. 3, p. 1348–1359, 2011.

UDAY, M. B. *et al.* Thermal analysis of friction welding process in relation to the welding of YSZ-alumina composite and 6061 aluminum alloy. *Applied Surface Science*, v. 258, n. 20, p. 8264–8272, 2012.

URBANEK, Jacek; BARSZCZ, Tomasz; ANTONI, Jerome. Time–frequency approach to extraction of selected second-order cyclostationary vibration components for varying operational conditions. *Measurement*, v. 46, n. 4, p. 1454–1463, 1 maio 2013.

VARTIAINEN, Eero *et al.* Impact of weighted average cost of capital, capital expenditure, and other parameters on future utility-scale PV levelised cost of electricity. *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, v. 28, n. 6, p. 439–453, 1 jun. 2020.

VIANA, M C A et al. Identifying Grain size in ASTM A36 Steel using Ultrasonic Backscattered Signals and Machine Learning. [S.l: s.n.], [S.d.].

VILL, V. I. Energy distribution in the friction welding of steel bars. Welding Production, p. 31–41, 1959.

VILL, Vadim Ivanovich. Friction welding of metals. New York, American Welding Society, 1962.

WAHID, Mohd Atif; KHAN, Zahid A.; SIDDIQUEE, Arshad Noor. Review on underwater friction stir welding: A variant of friction stir welding with great potential of improving joint properties. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China (English Edition)*, v. 28, n. 2, p. 193–219, 2018.

WANG, D. A.; CHEN, C. H. Fatigue lives of friction stir spot welds in aluminum 6061-T6 sheets. *Journal of Materials Processing Technology*, v. 209, n. 1, p. 367–375, 2009.

WANG, Guilong *et al.* Study on microstructure evolution of AISI 304 stainless steel joined by rotary friction welding. p. 1187–1193, 2018.

WANG, K. K.; LIN, W. Flywheel friction welding research. *Welding Journal*, v. 53, n. 6, p. 233s–241s, 1974.

WANG, X. C. et al. Friction-induced stick-slip vibration and its experimental validation. *Mechanical Systems and Signal Processing*, v. 142, 1 ago. 2020.

WEN, Tong *et al.* Influence of high frequency vibration on microstructure and mechanical properties of TIG welding joints of AZ31 magnesium alloy. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, v. 25, n. 2, p. 397–404, 2015.

WINICZENKO, Radosław. Effect of friction welding parameters on the tensile strength and microstructural properties of dissimilar AISI 1020-ASTM A536 joints. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, v. 84, n. 5–8, p. 941–955, 2016.

WU, Fangji; QU, Liangsheng. Diagnosis of subharmonic faults of large rotating machinery based on EMD. *Mechanical Systems and Signal Processing*, v. 23, n. 2, p. 467–475, 2009.

XIAO, Yihua *et al.* Modeling heat transfer during friction stir welding using a meshless particle method. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, v. 104, p. 288–300, 2017.

XING, Pengfei *et al.* Experimental investigation on identifying friction state in lubricated tribosystem based on friction-induced vibration signals. *Mechanical Systems and Signal Processing*, v. 138, 2020.

XIONG, J T *et al.* An analytical model of steady-state continuous drive friction welding. *Acta Materialia*, v. 61, n. 5, p. 1662–1675, 2013.

XU, Xuanxi *et al.* Microstructure and mechanical properties of inertia friction welded joints between high-strength low-alloy steel and medium carbon steel. *Journal of Materials Processing Technology*, v. 286, p. 116811, 1 dez. 2020.

YAZDIPOUR, Alireza; HEIDARZADEH, Akbar. Dissimilar butt friction stir welding of Al 5083-H321 and 316L stainless steel alloys. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, v. 87, n. 9–12, p. 3105–3112, 2016.

YILBAŞ, Bekir S. *et al.* Friction welding of StAl and AlCu materials. *Journal of Materials Processing Tech.*, v. 49, n. 3–4, p. 431–443, 1995.

YIN, Yayun *et al.* Investigation on welding parameters and bonding characteristics of underwater wet friction taper plug welding for pipeline steel. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, v. 81, n. 5–8, p. 851–861, 2015.

YU, Hai Jie *et al.* Lubrication State Recognition Based on Energy Characteristics of Friction Vibration with EEMD and SVM. *Shock and Vibration*, v. 2021, 2021.

YUAN, W. et al. Effect of tool design and process parameters on properties of Al alloy 6016 friction stir spot welds. *Journal of Materials Processing Technology*, v. 211, n. 6, p. 972–977, 2011.

YUE, Yanchao et al. Applicability Analysis of Inspection and Monitoring Technologies in Wind Turbine Towers. Shock and Vibration. [S.l.]: Hindawi Limited, 2021

ZAEH, M. F.; POEHLER, A. Vibrations in friction welding. *Production Engineering*, v. 5, n. 2, p. 159–165, 2011.

ZAKSON, R. I.; TURUKIN, F. G. Friction welding and hardfacing of agricultural machine parts. *Avesta Svarka*, v. 3, p. 48–50, 1965.

ZHANG, Kejin *et al.* Non-monotonic evolution of microstructure and fatigue properties of round bar–plate rotary friction welding joints in 304 austenitic stainless steel. *Materials and Design*, v. 224, 1 dez. 2022.

ZHENG, Jinde *et al.* Holo-hilbert square spectral analysis: A new fault diagnosis tool for rotating machinery health management. *Mechanical Systems and Signal Processing*, v. 189, p. 110069, 2023.

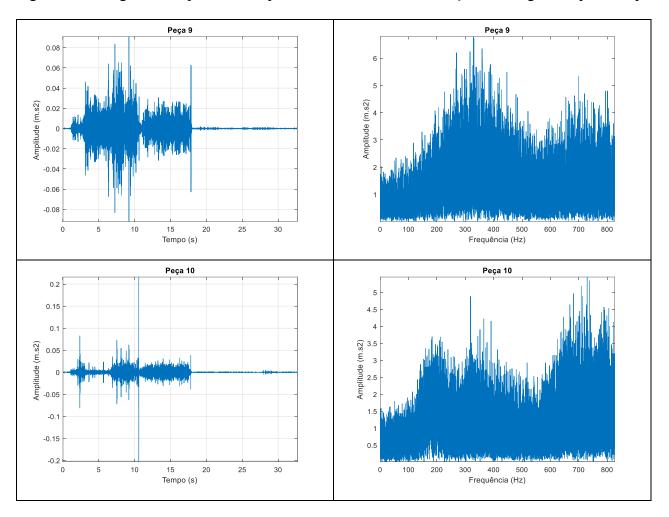
ZHOU, L. *et al.* Interface behavior and mechanical properties of 316L stainless steel filling friction stir welded joints. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, v. 81, n. 1–4, p. 577–583, 2015.

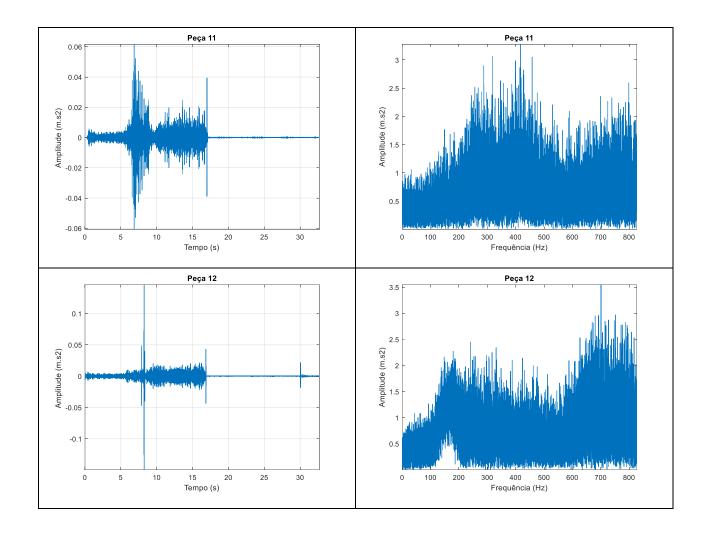
ZHOU, L. *et al.* New technique of self-refilling friction stir welding to repair keyhole. *Science and Technology of Welding & Joining*, v. 17, n. 8, p. 649–655, 2012.

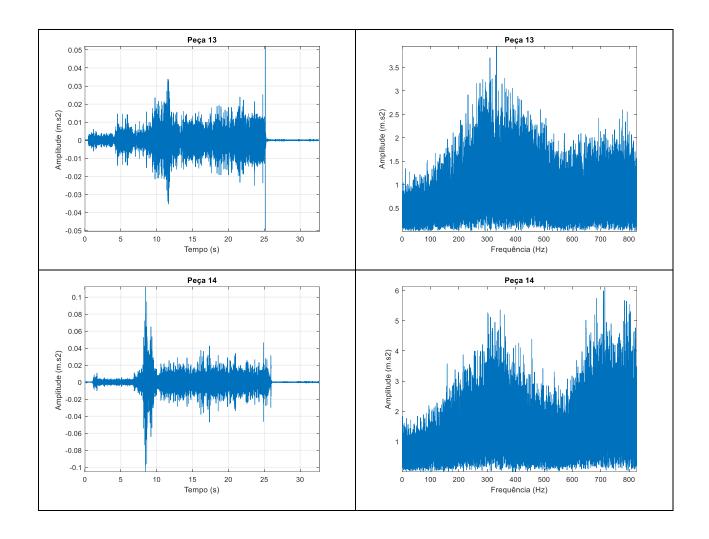
ZHU, Yuanzhi *et al.* Microstructural evolution in 4Cr10Si2Mo at the 4Cr10Si2Mo/Nimonic 80A weld joint by inertia friction welding. *Journal of Alloys and Compounds*, v. 476, n. 1–2, p. 341–347, 2009.

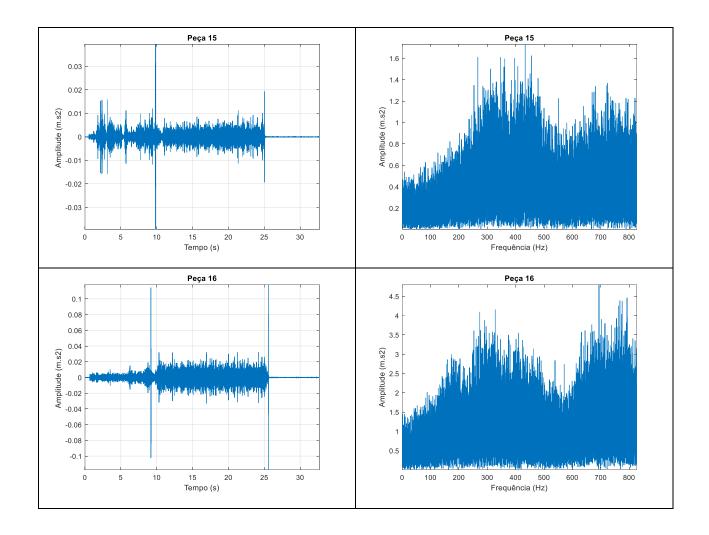
APENDICE A

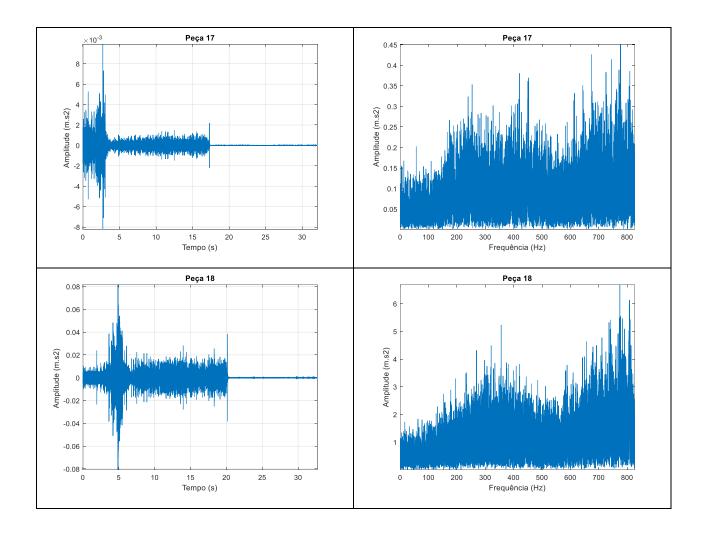
Figura A. 1. Diagrama temporal e de espectro do sinal bruto de vibração no estágio completo do processo CDFW

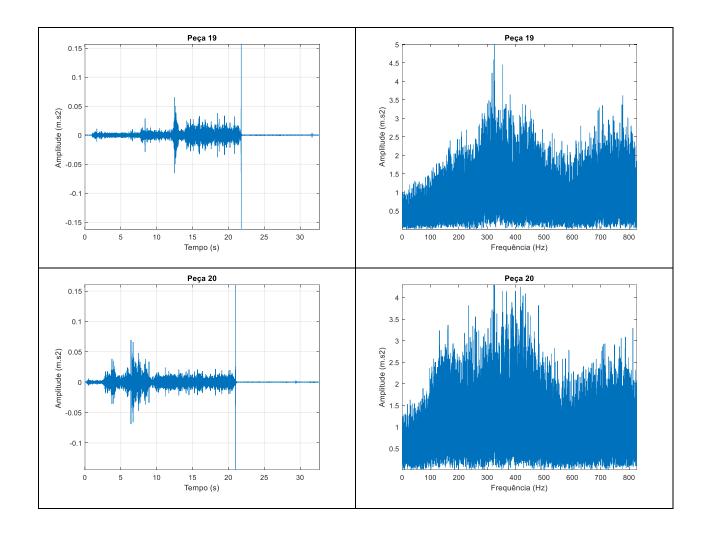






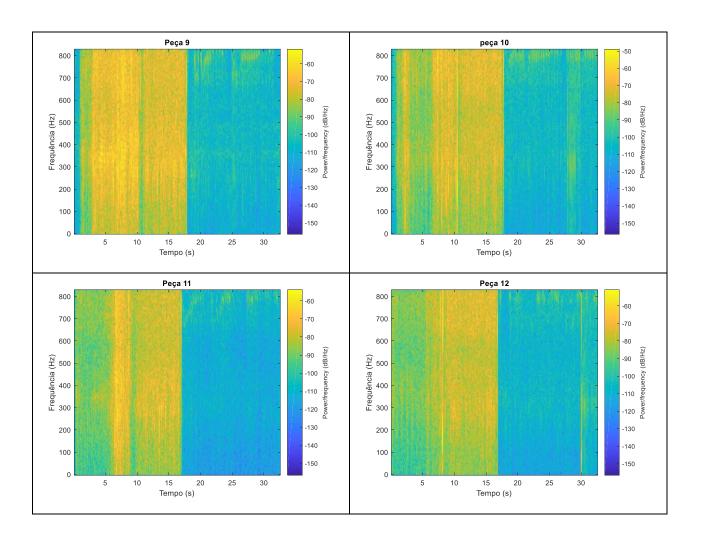


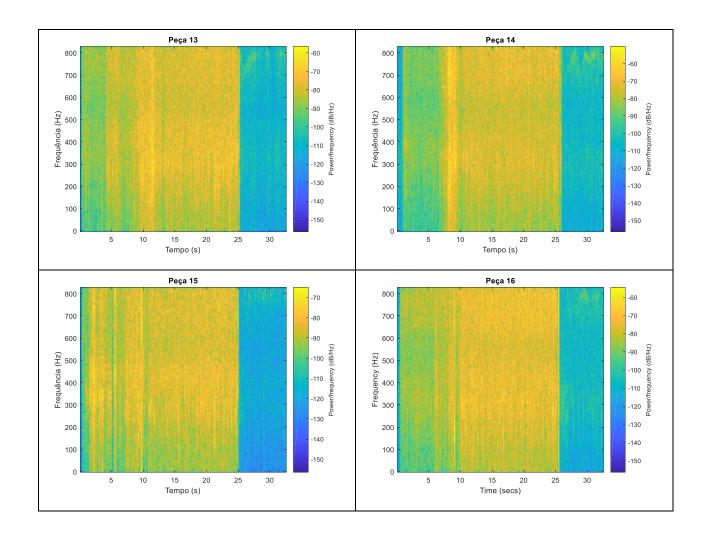


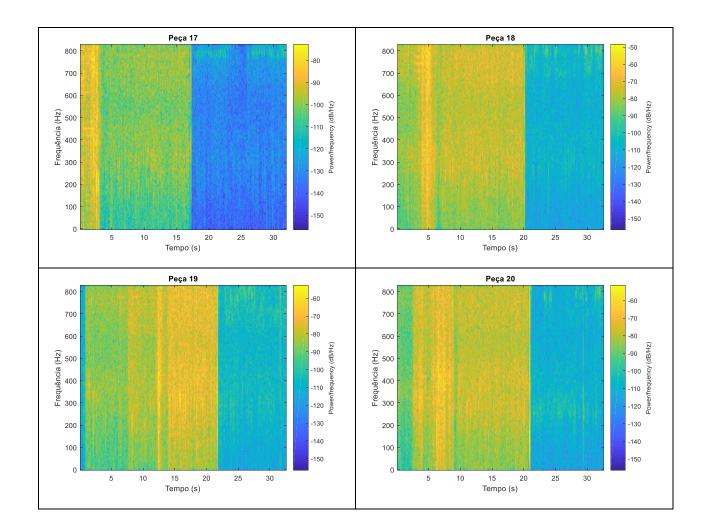


APENDICE B

Figura B. 1. Diagrama tempo-frequência do sinal bruto de vibração no estágio completo do processo CDFW

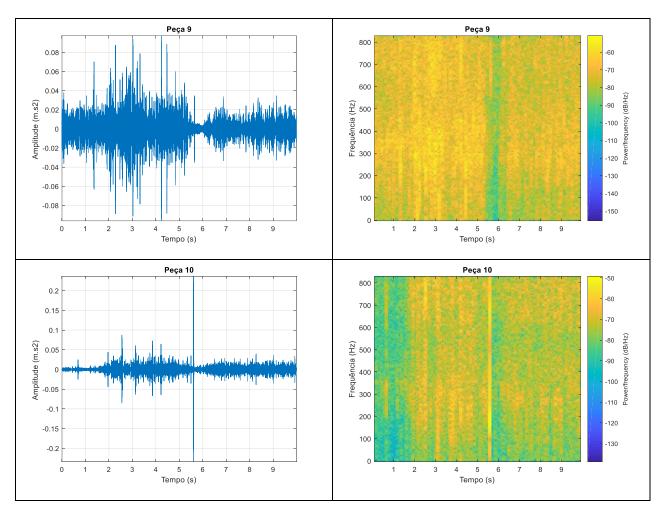


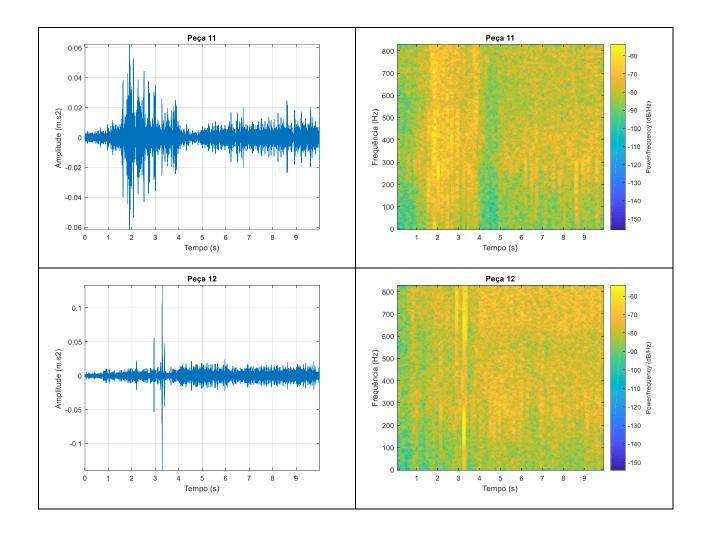


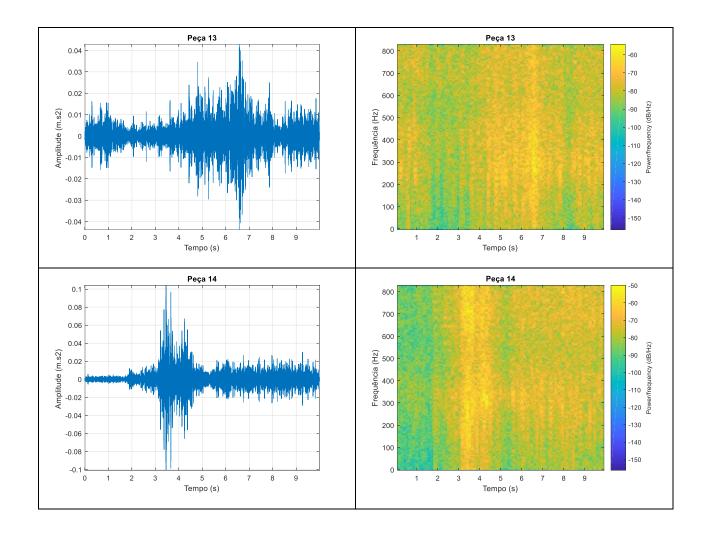


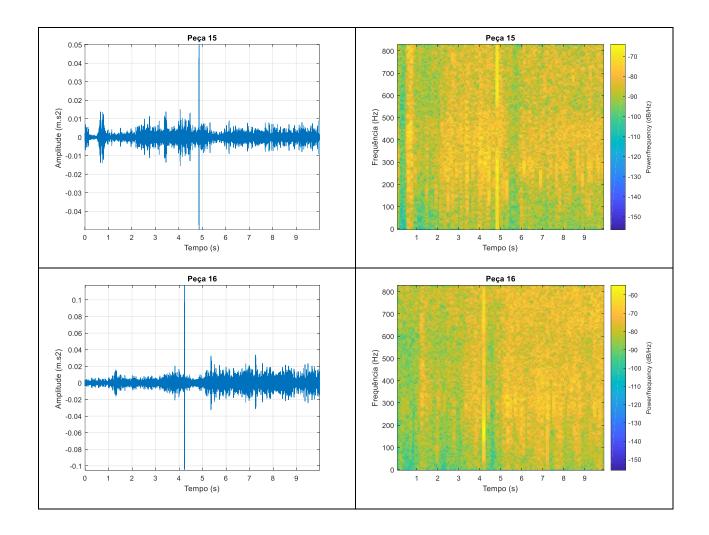
APENDICE C

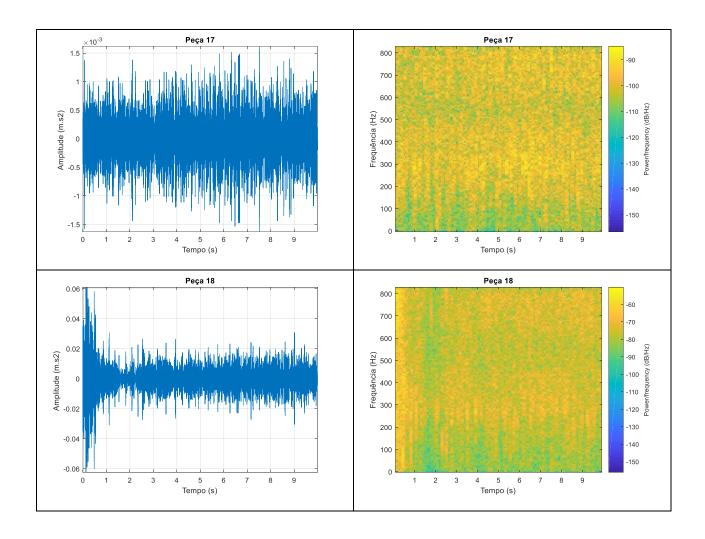
Figura C. 1. Diagrama temporal e diagrama tempo-frequência do estágio estacionário do sinal bruto de vibração do processo CDFW

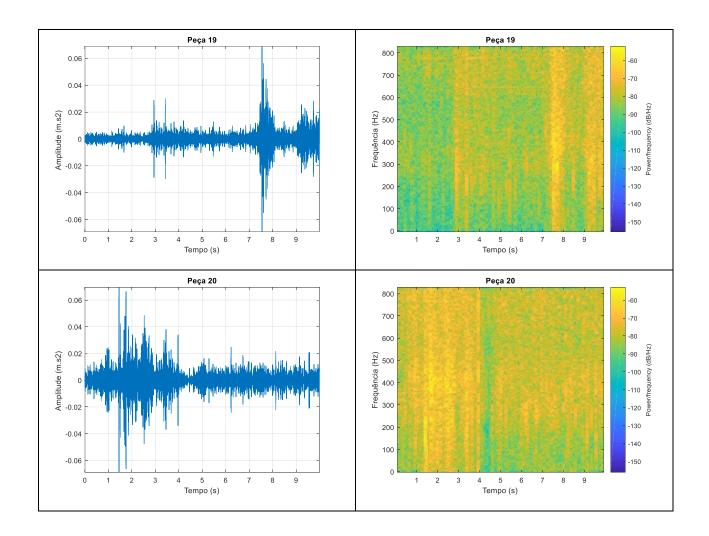






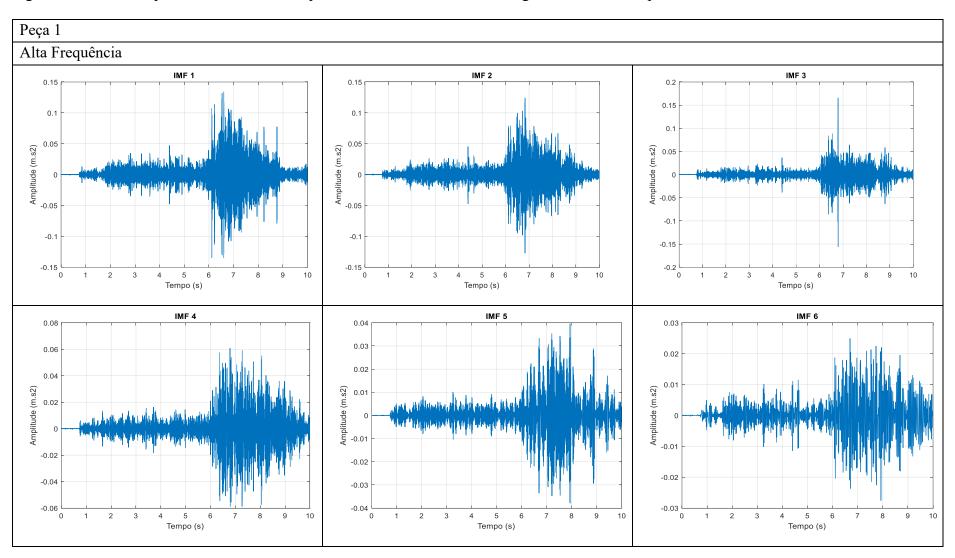


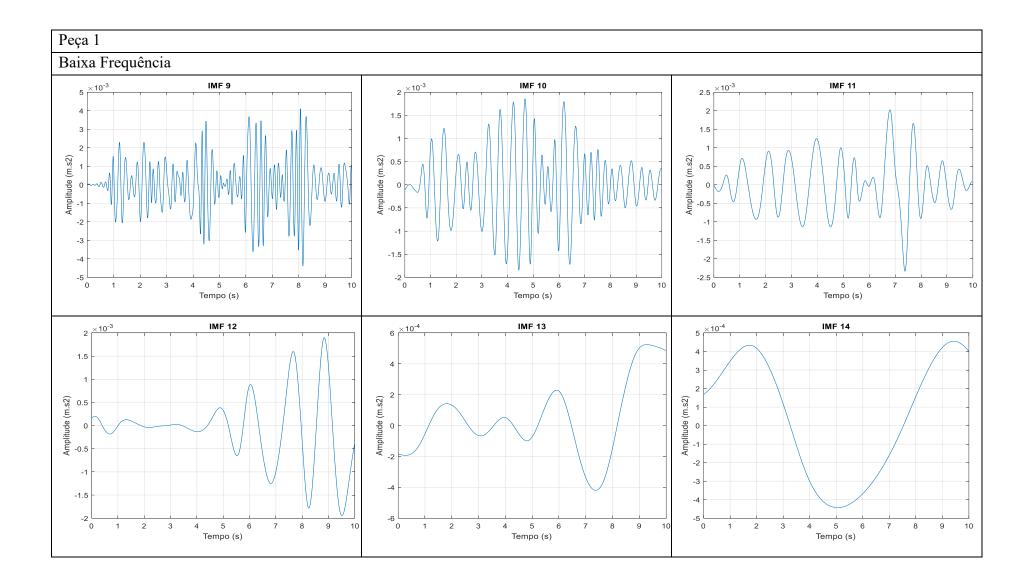


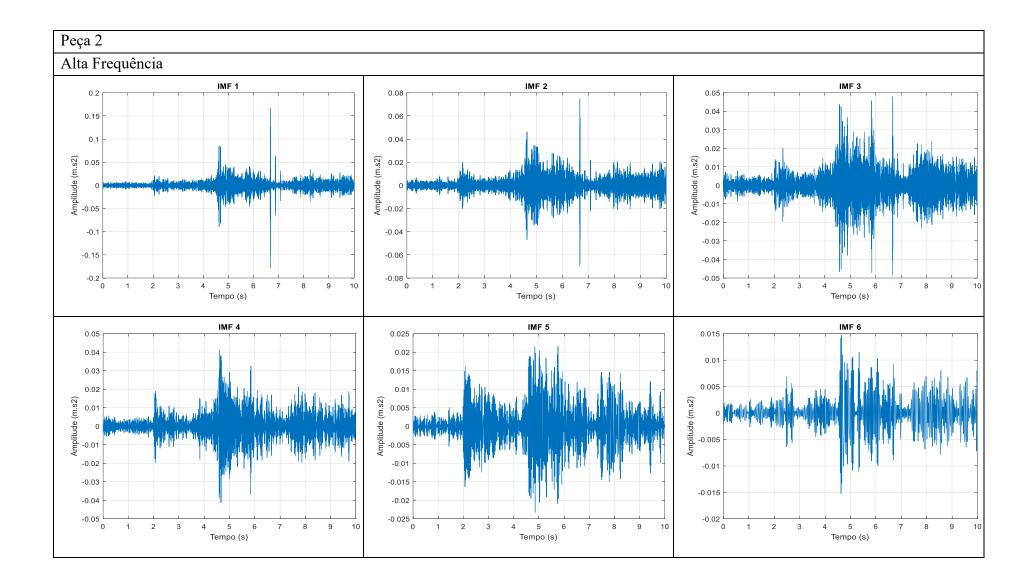


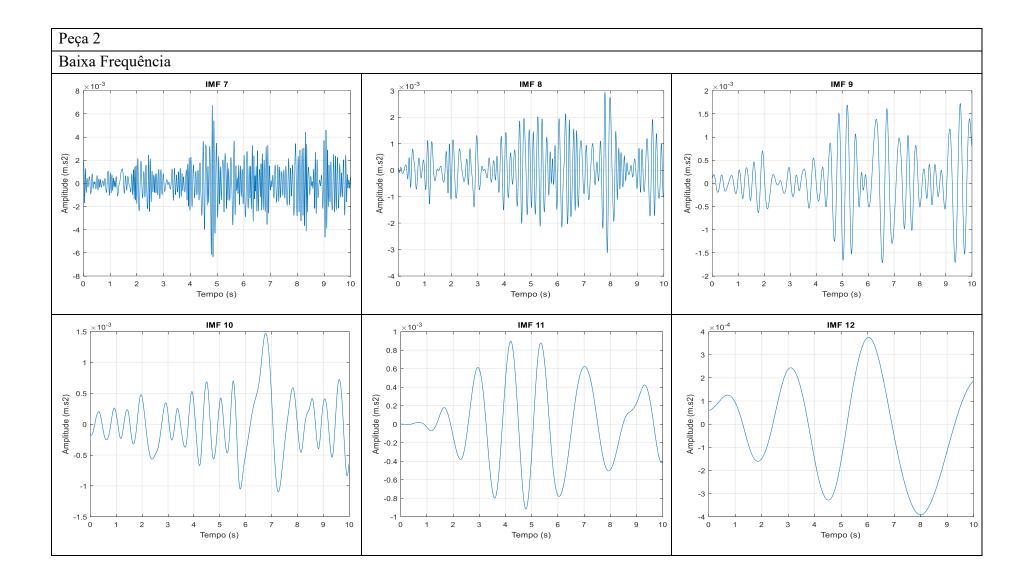
APENDICE D

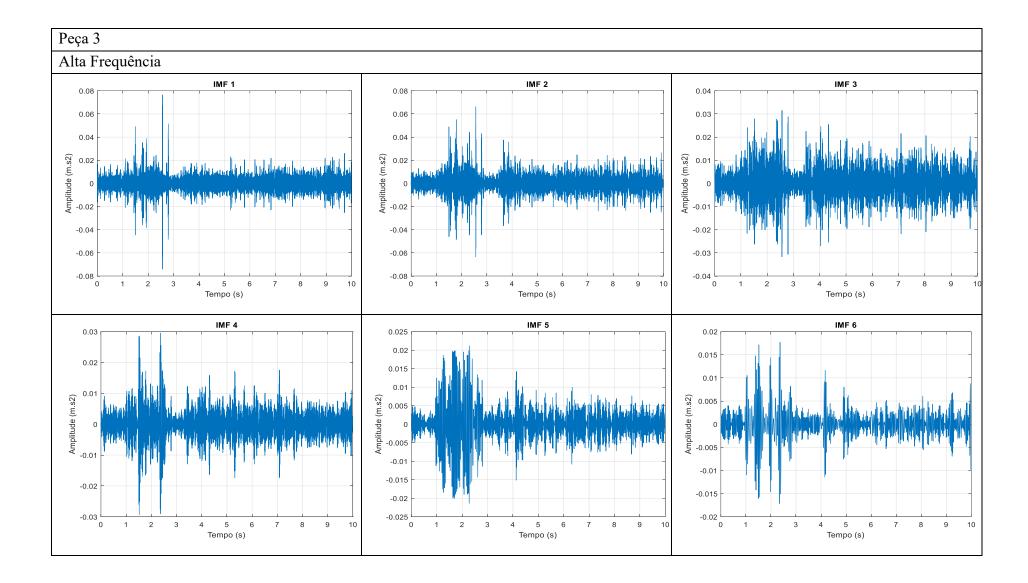
Figura D. 1. Sinal temporal de alta e baixa frequência das IMFs do sinal do estágio estacionário do processo CDFW

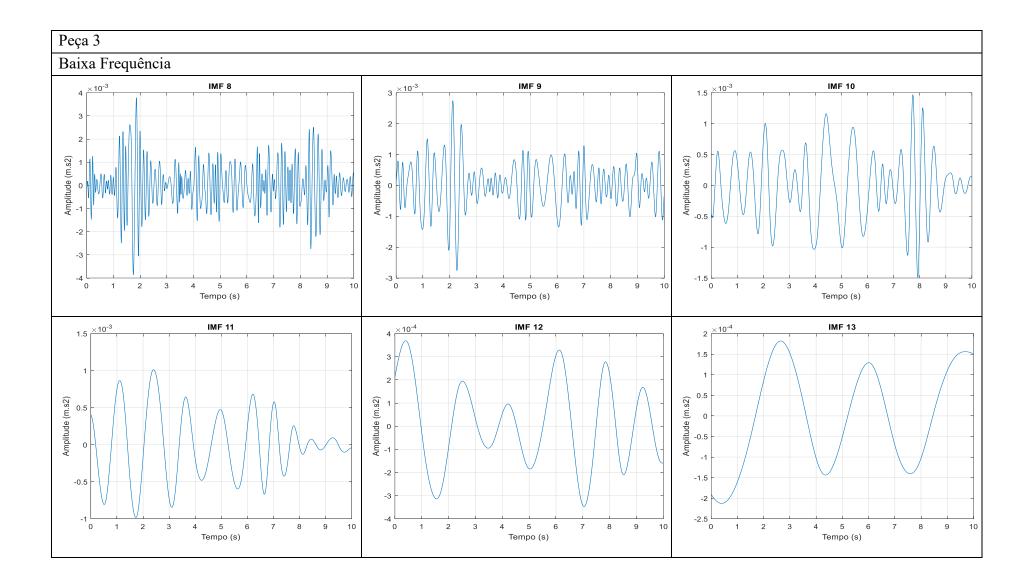


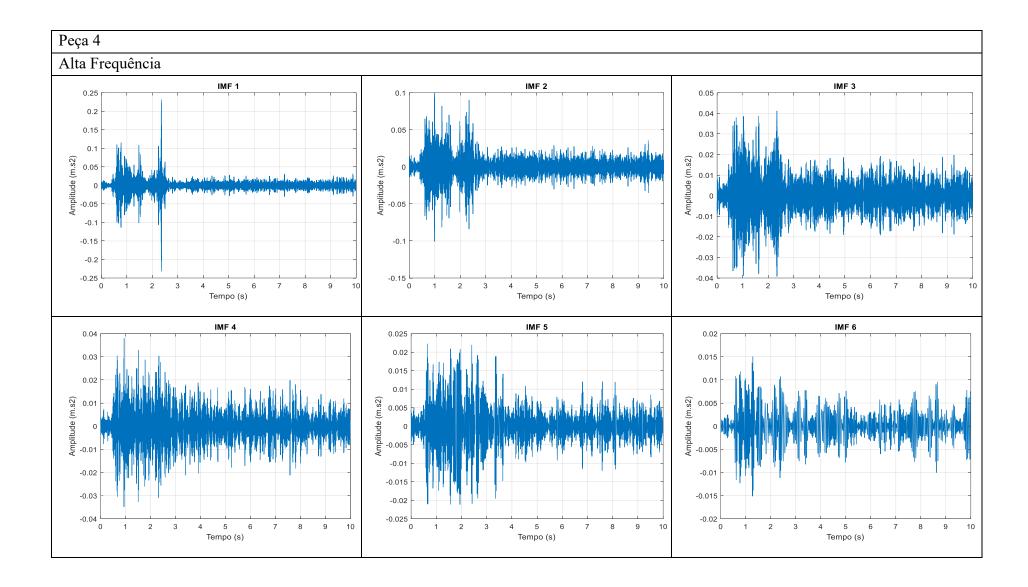


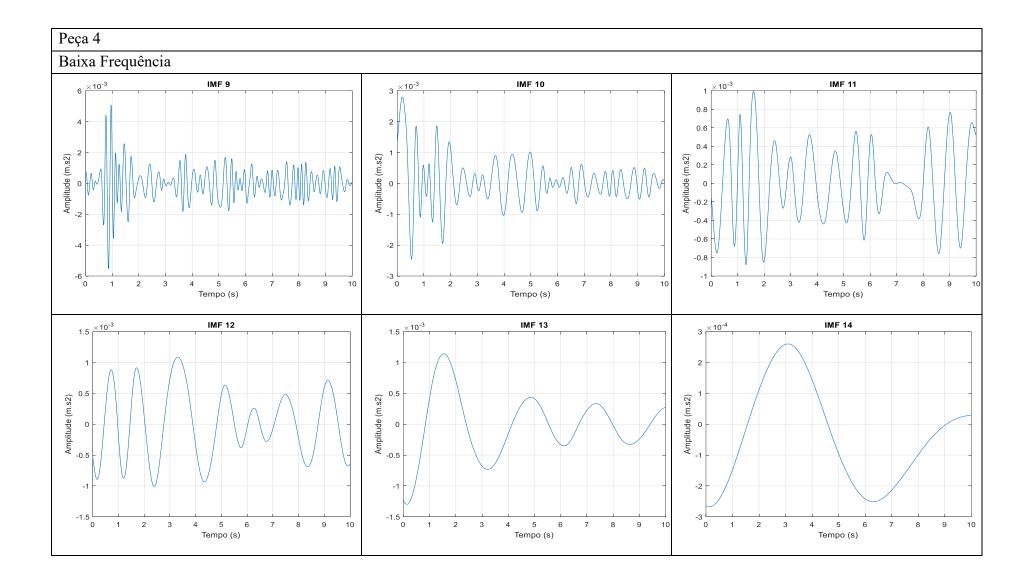


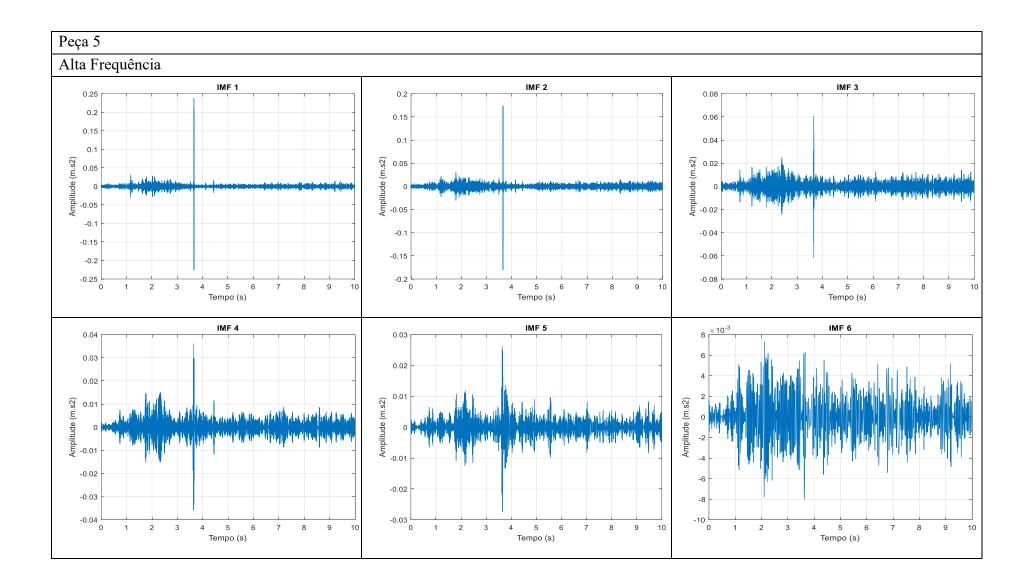


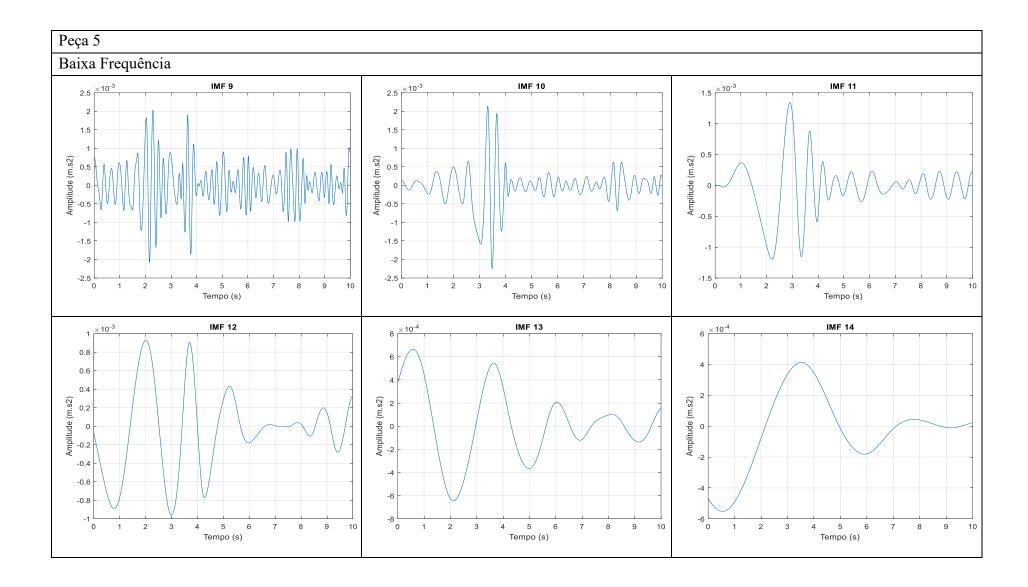


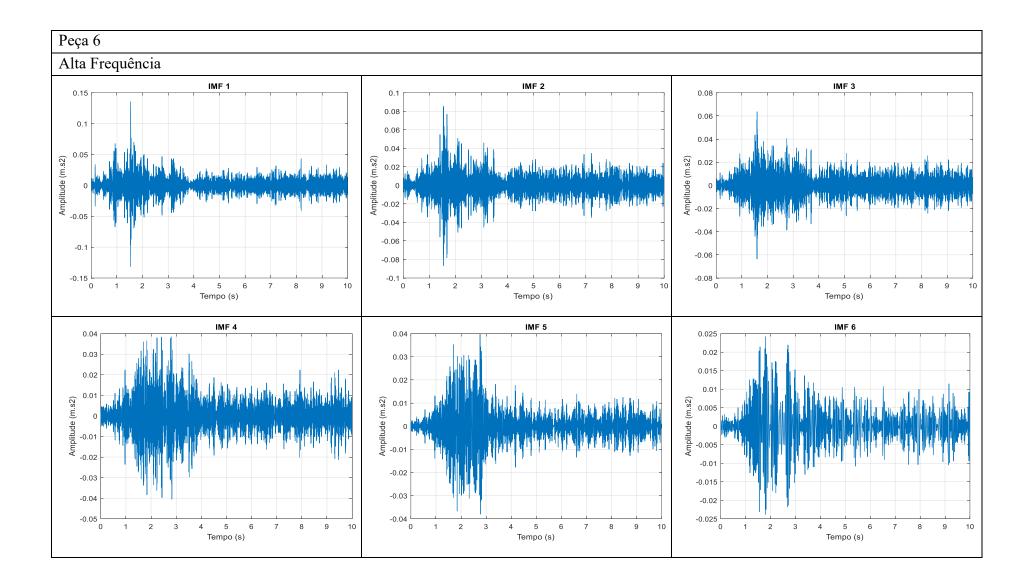


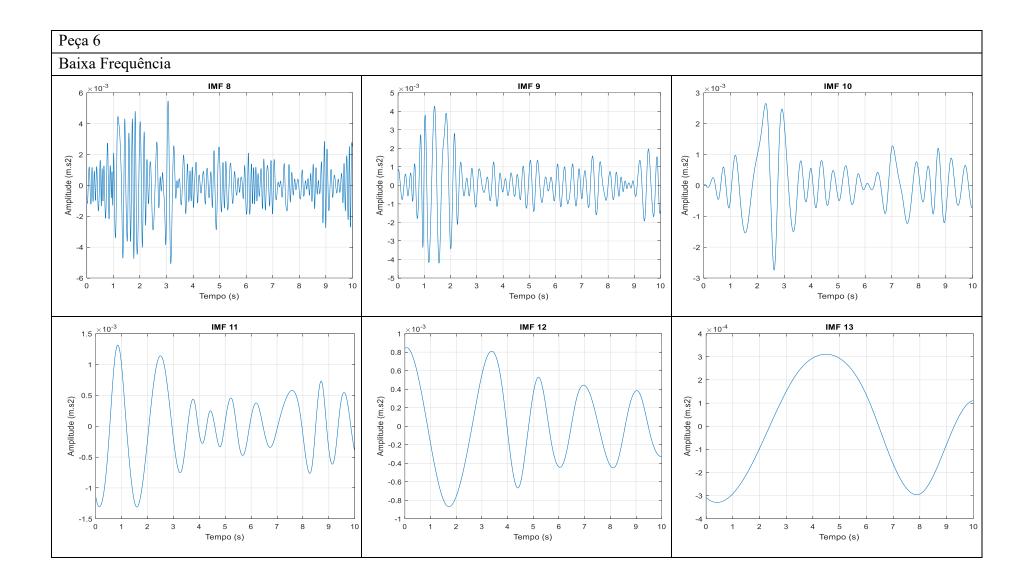


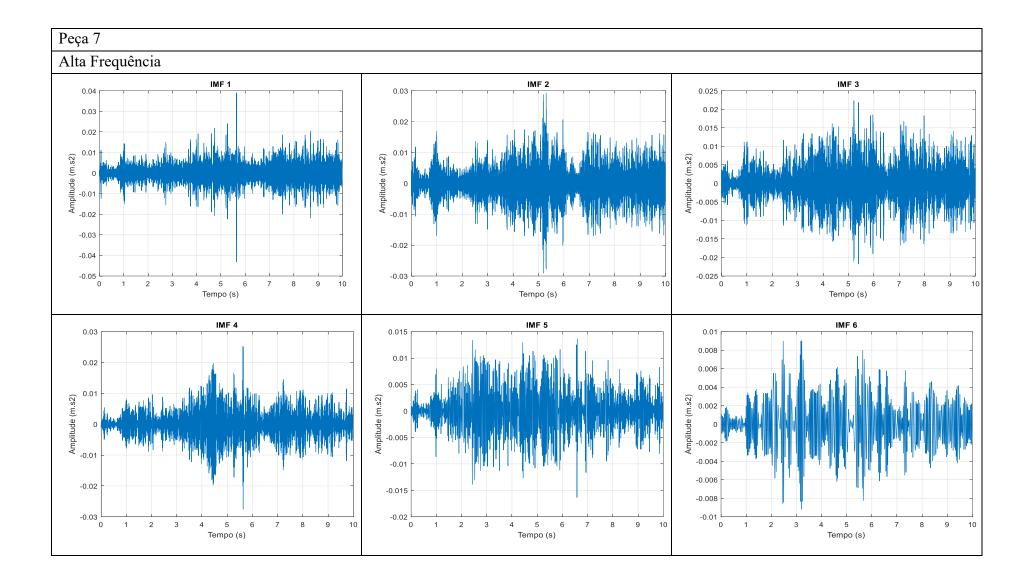


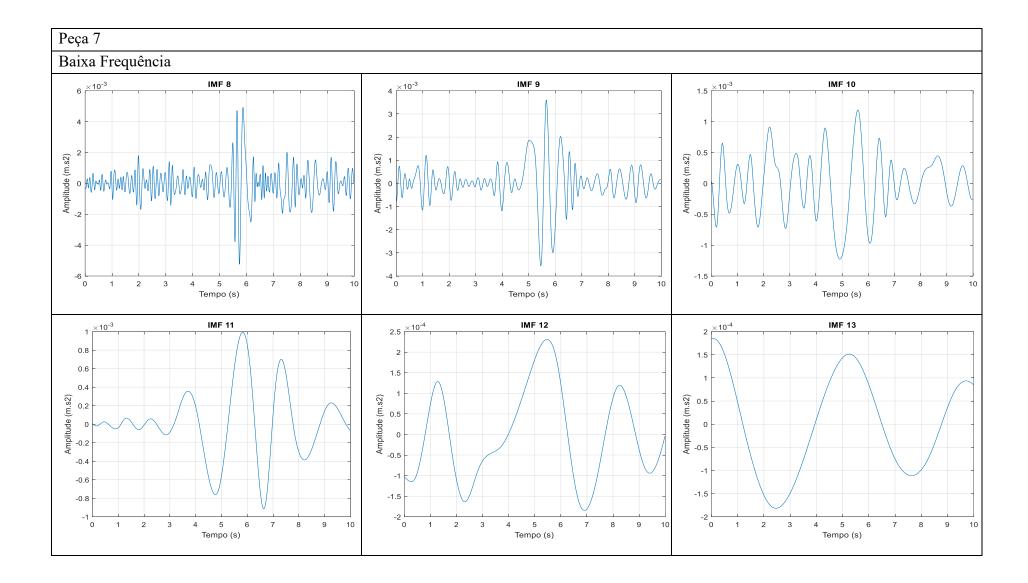


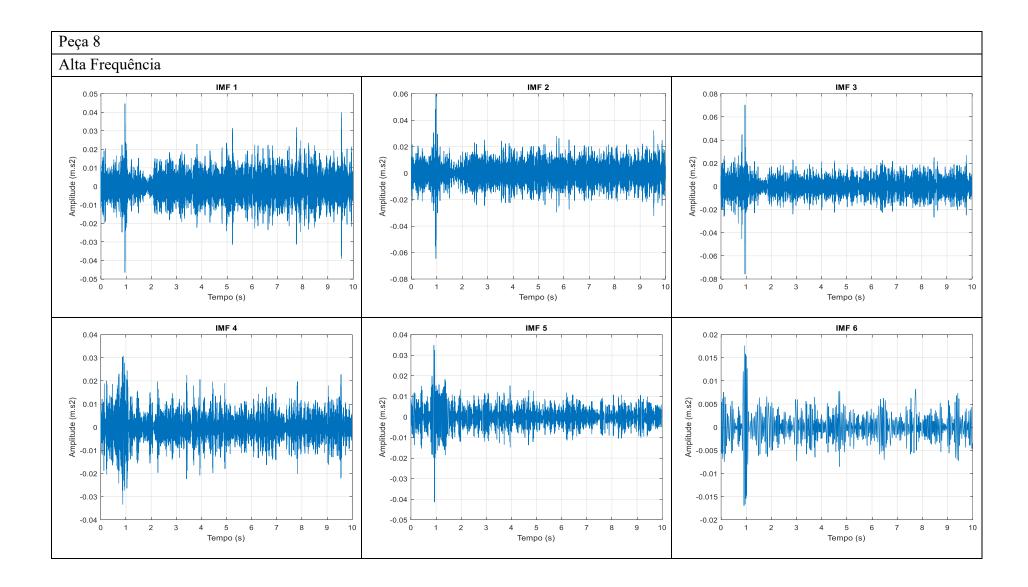


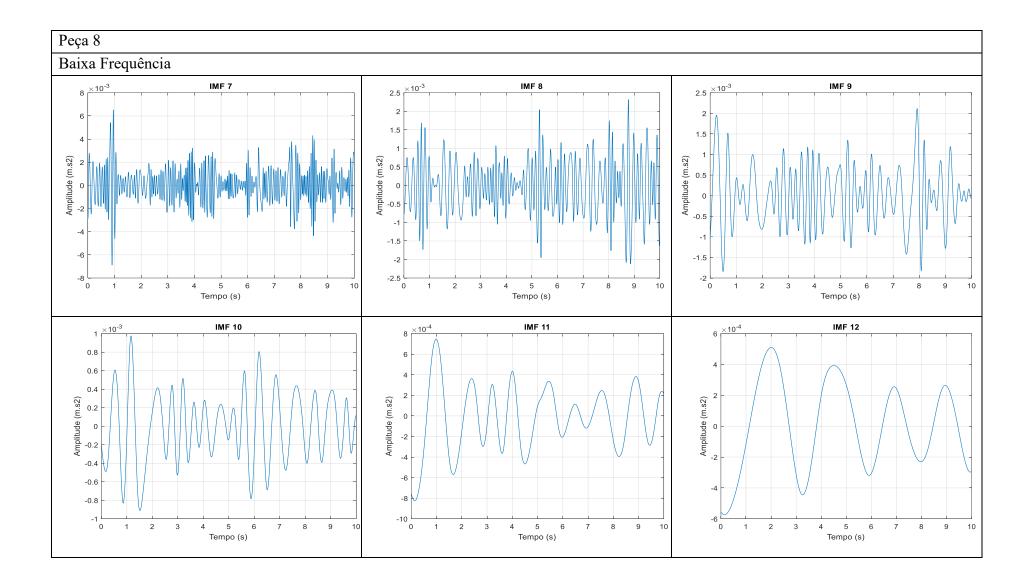


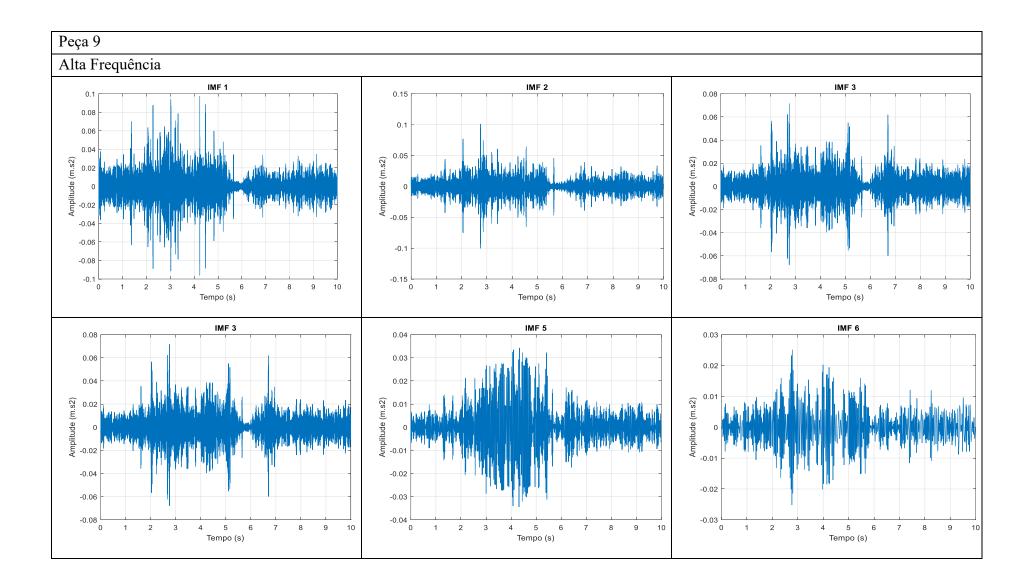


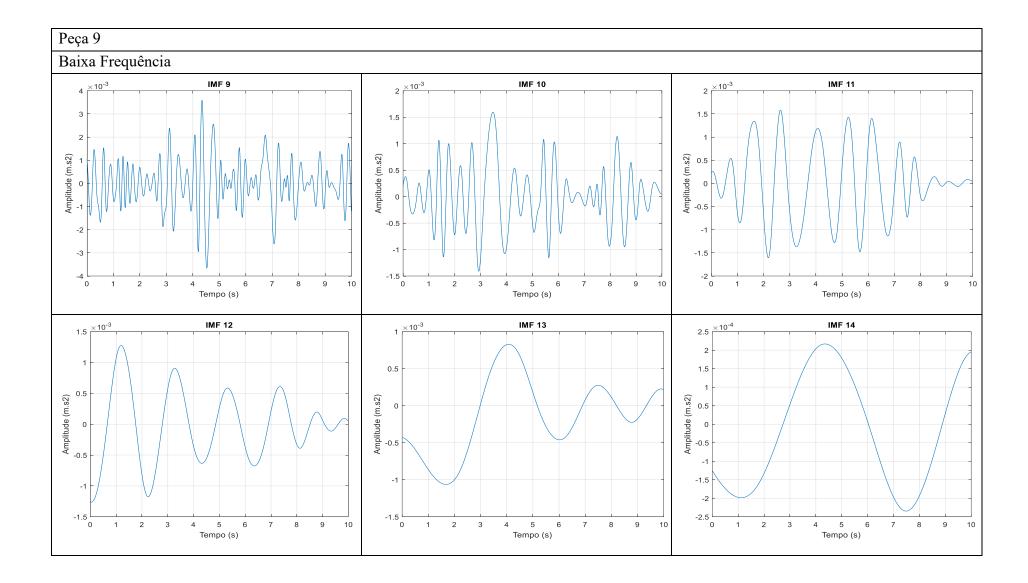


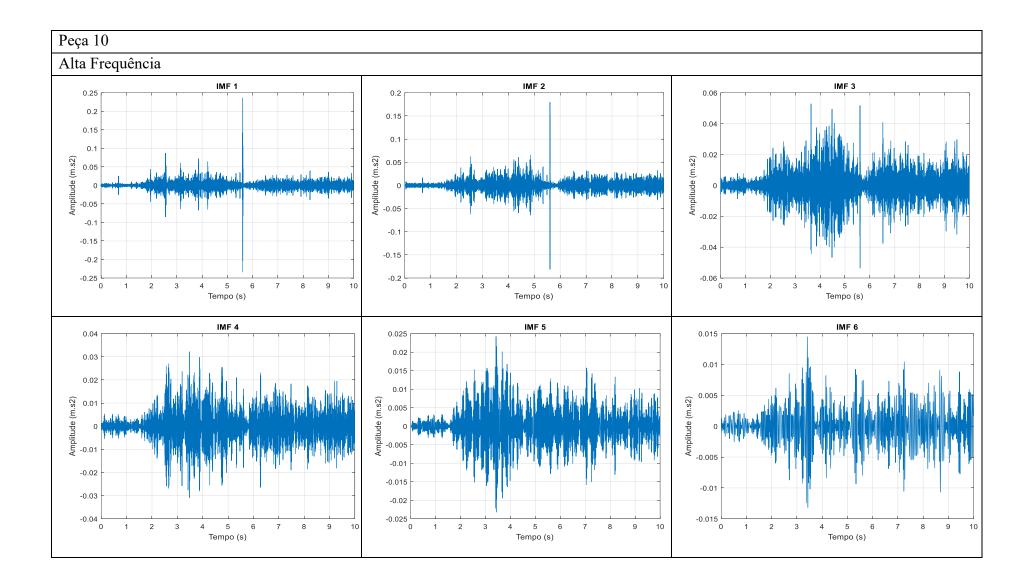


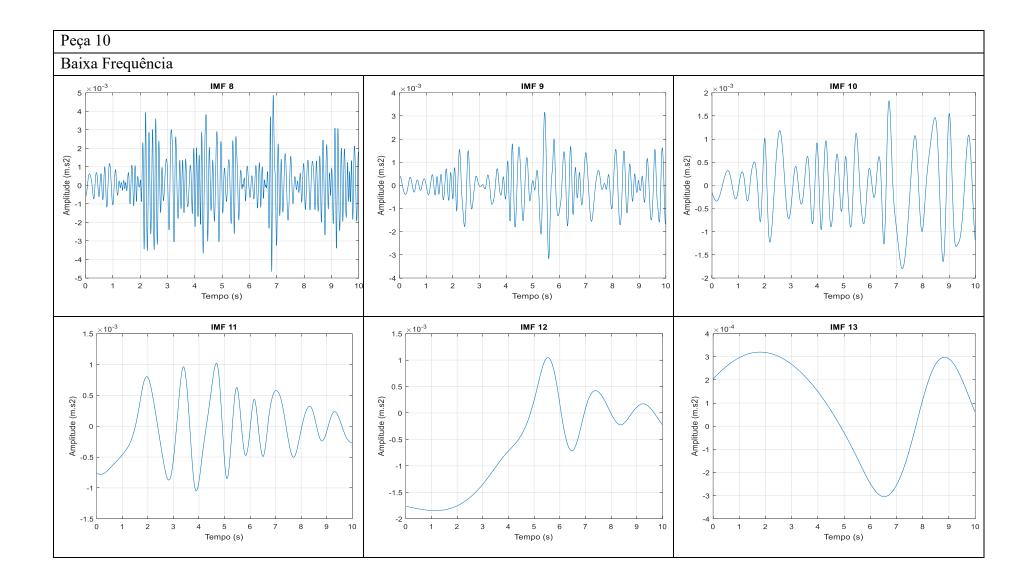


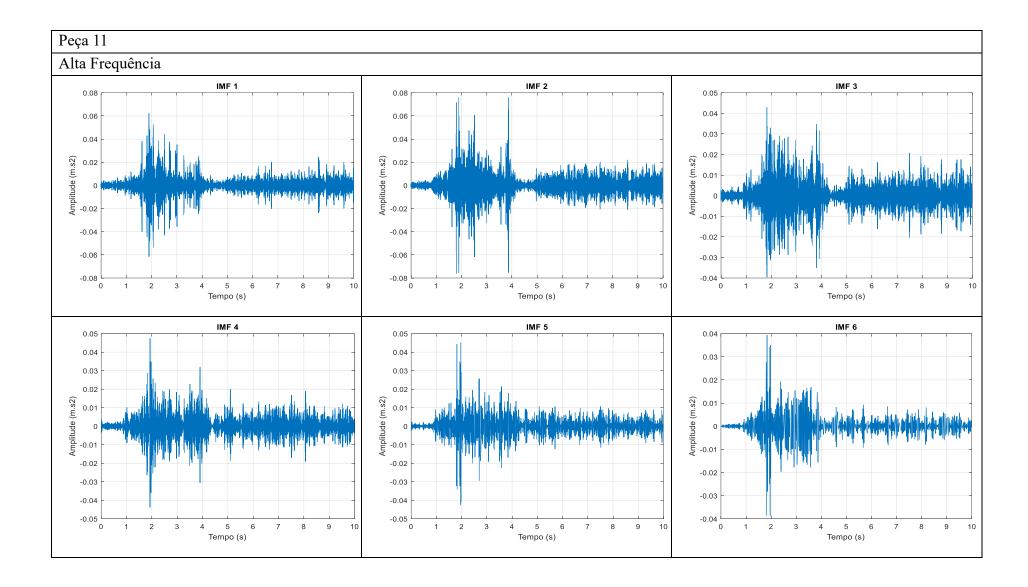


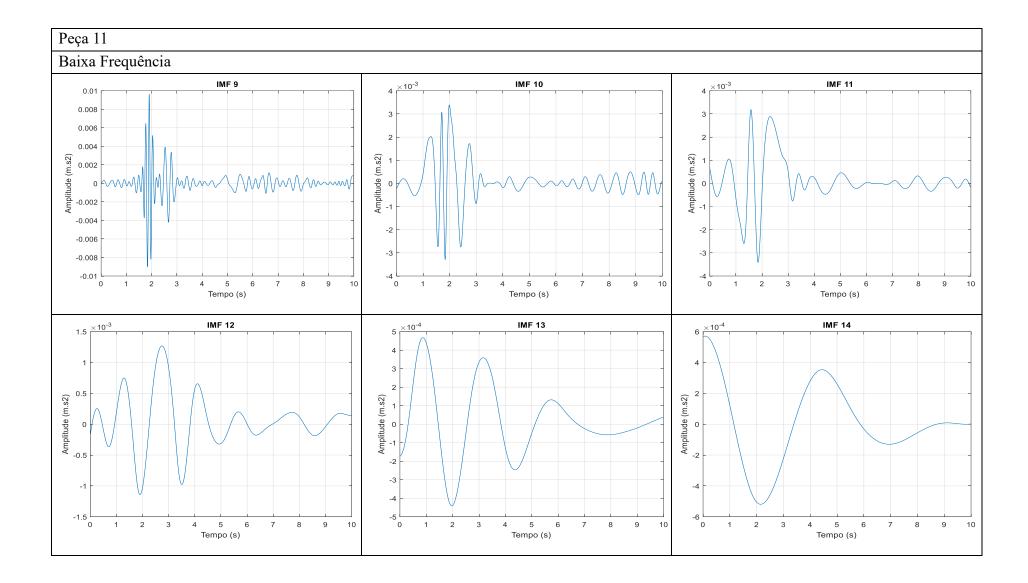


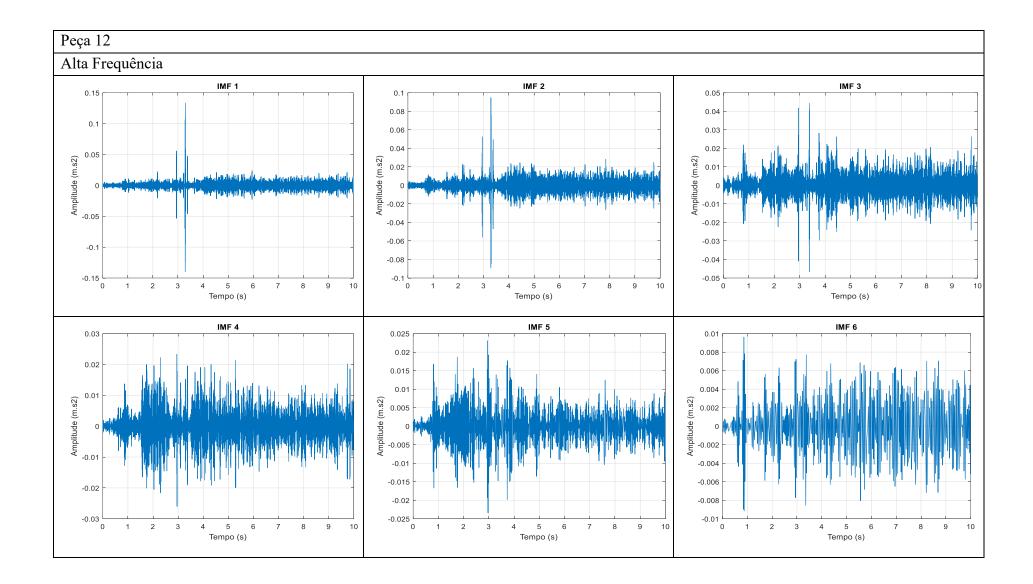


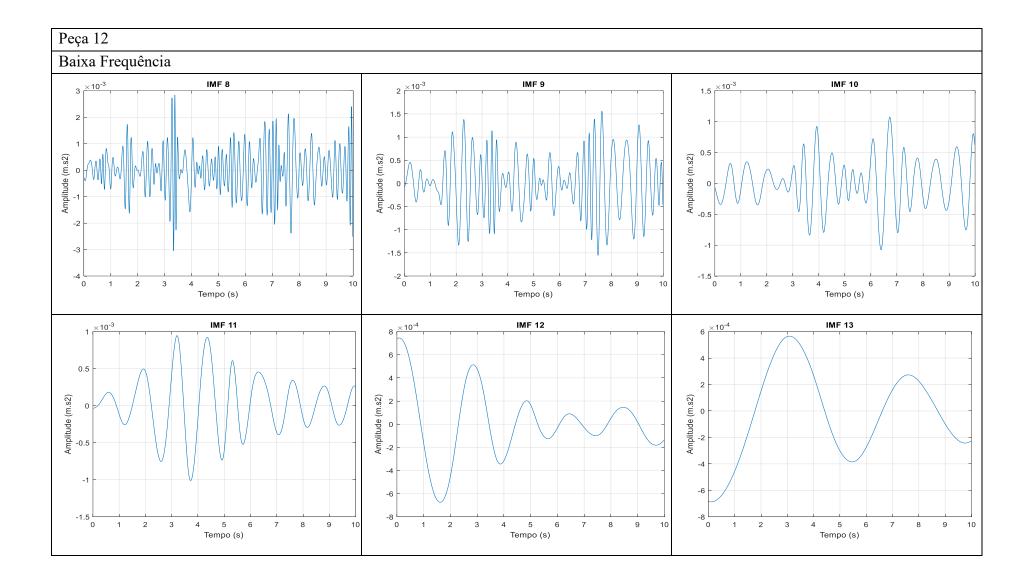


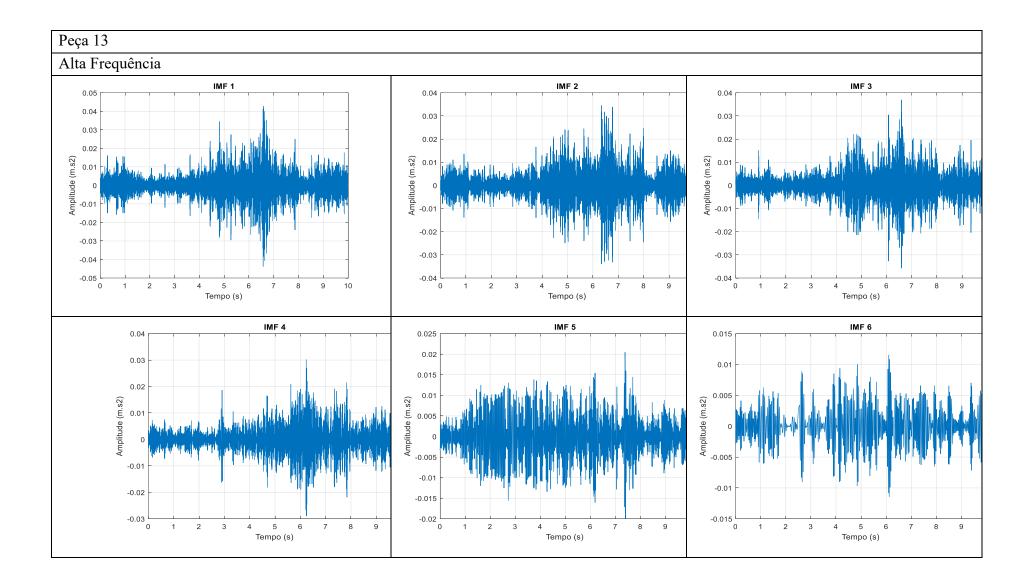


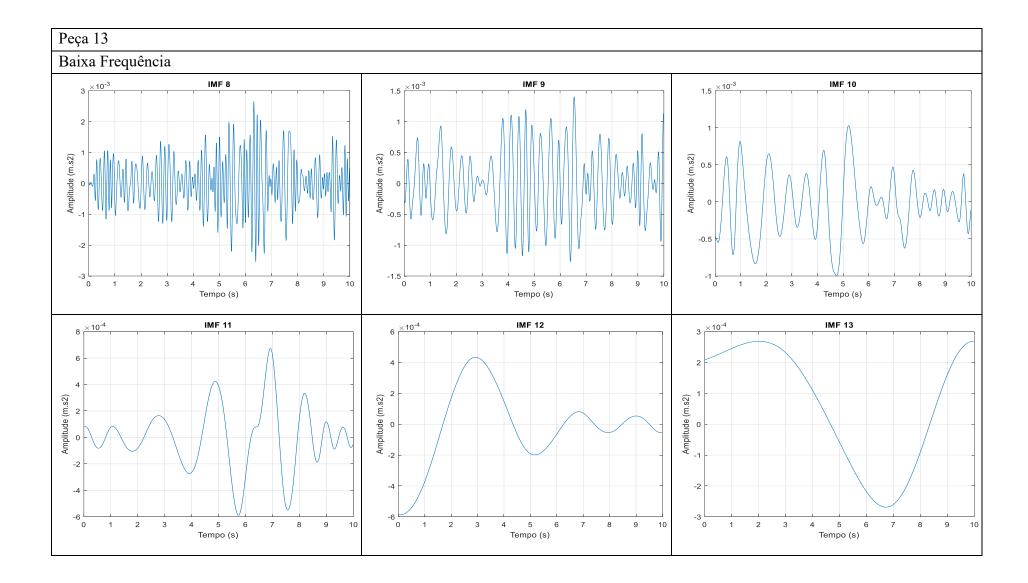


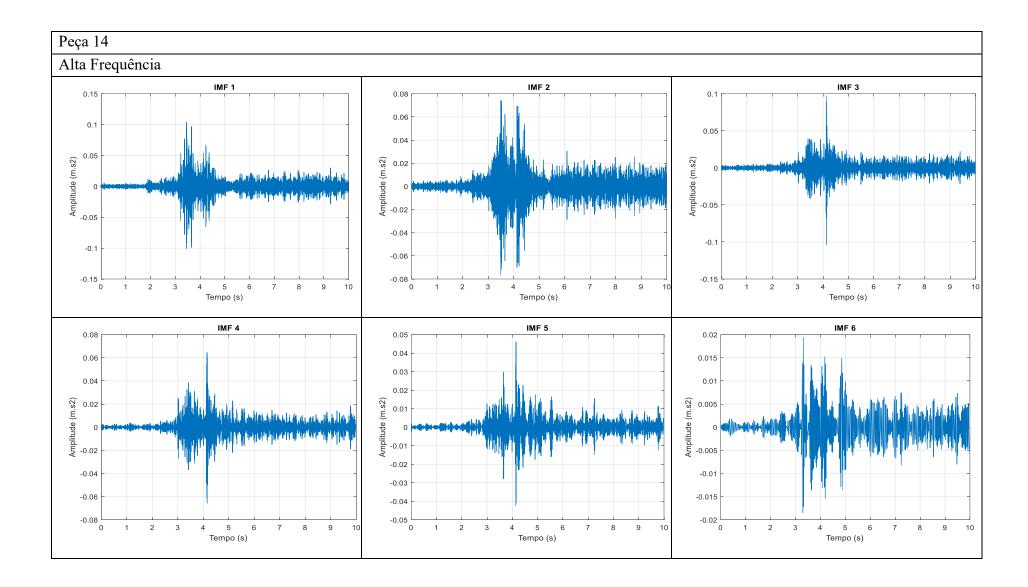


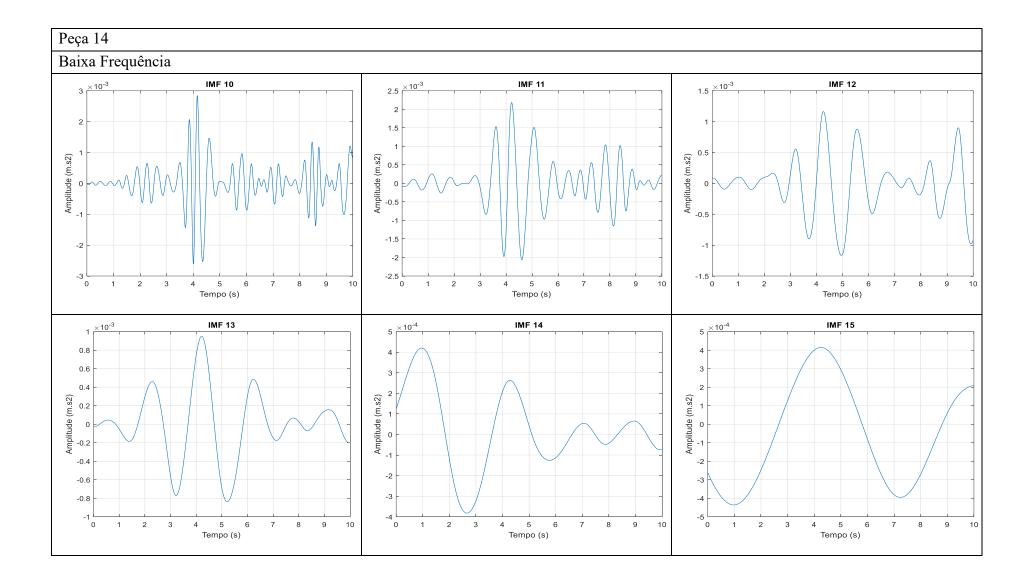


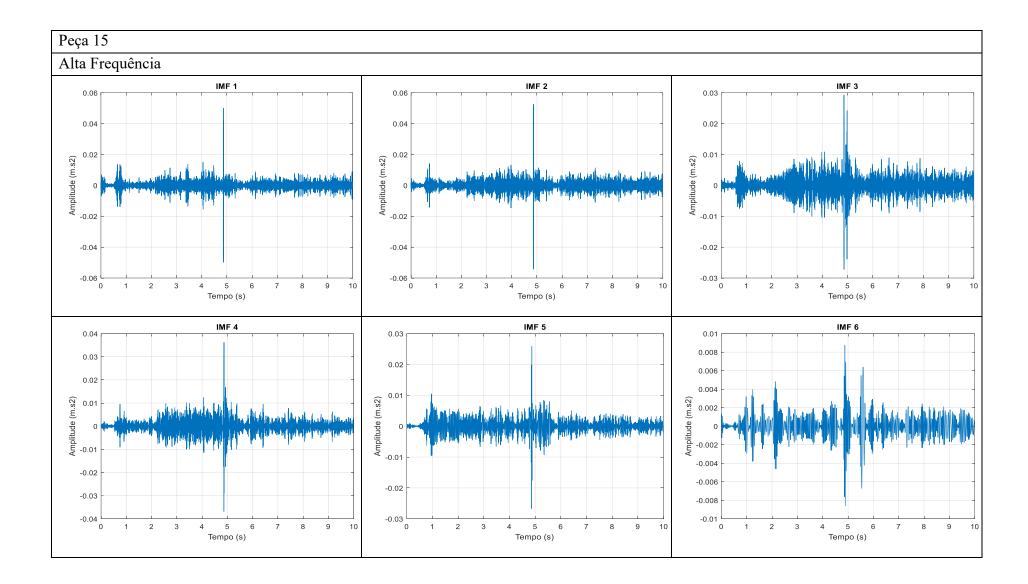


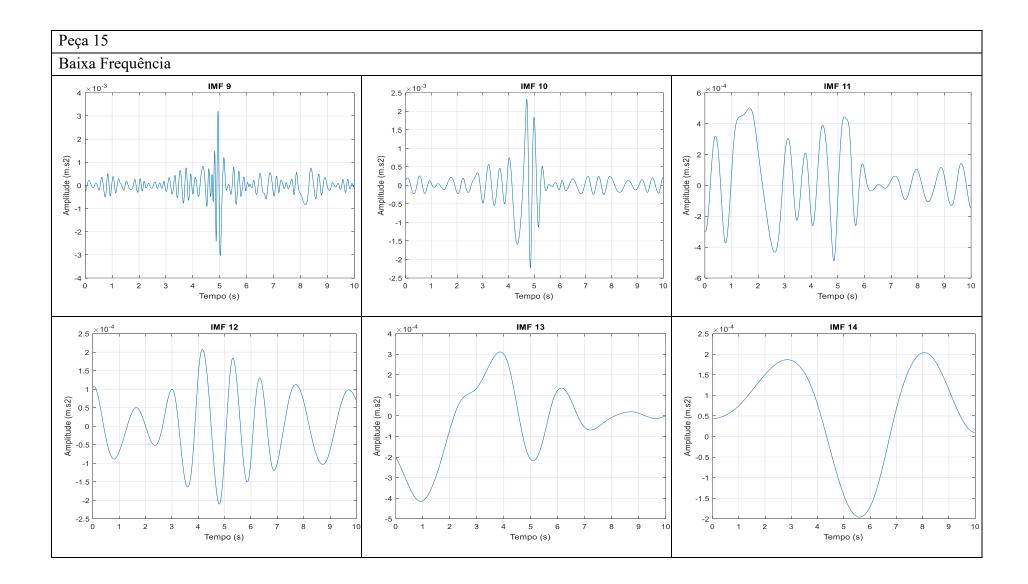


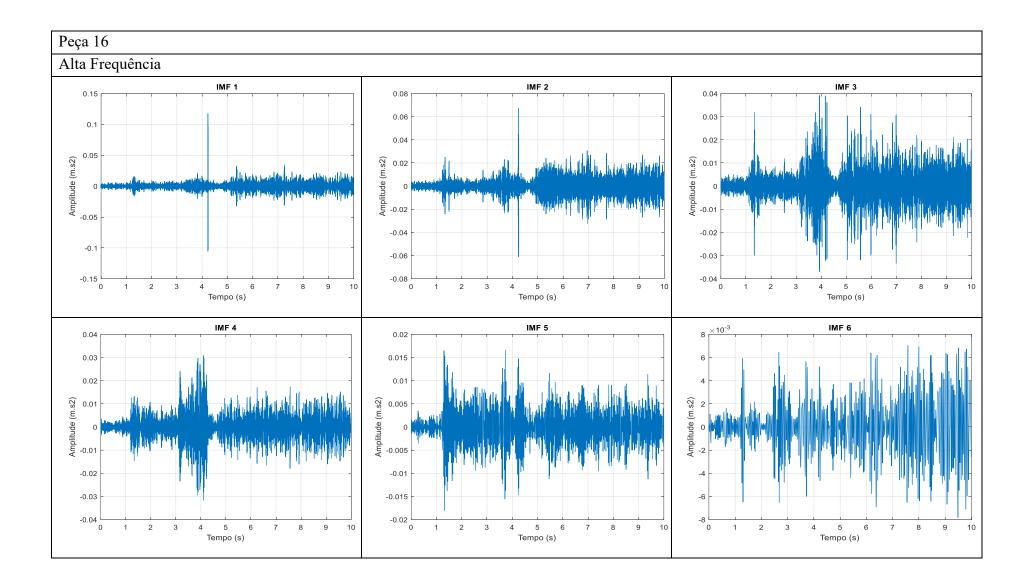


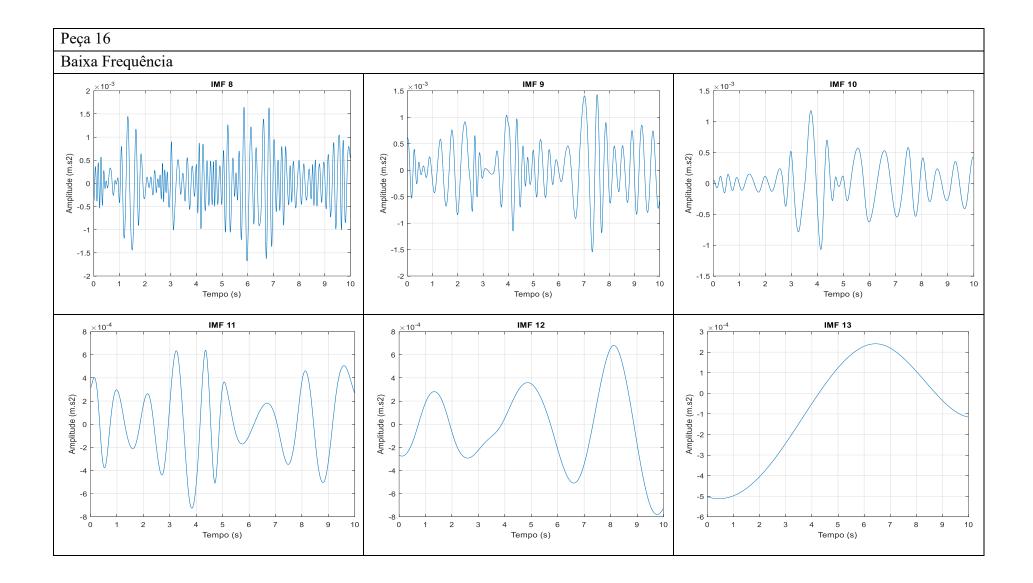


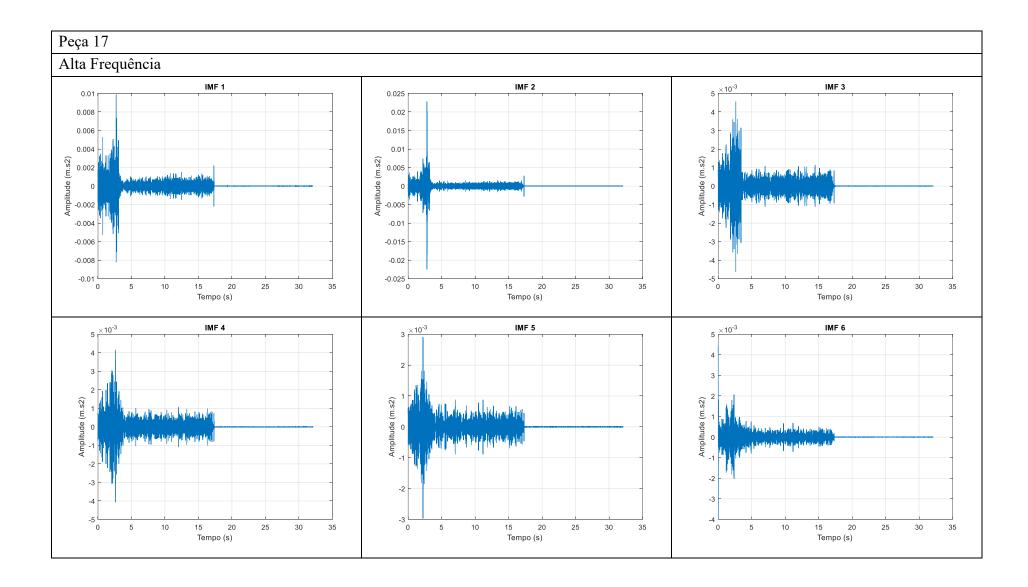


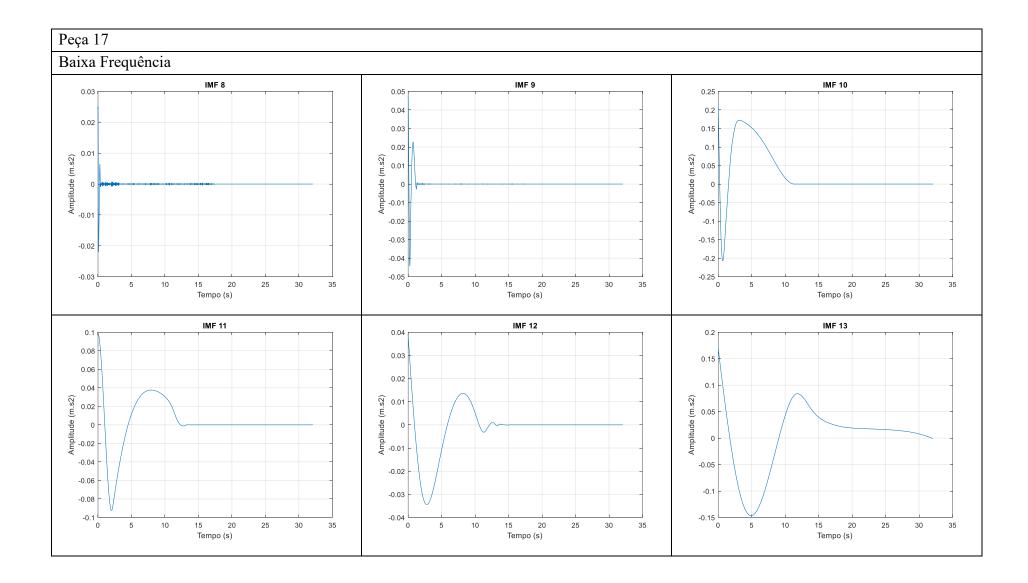


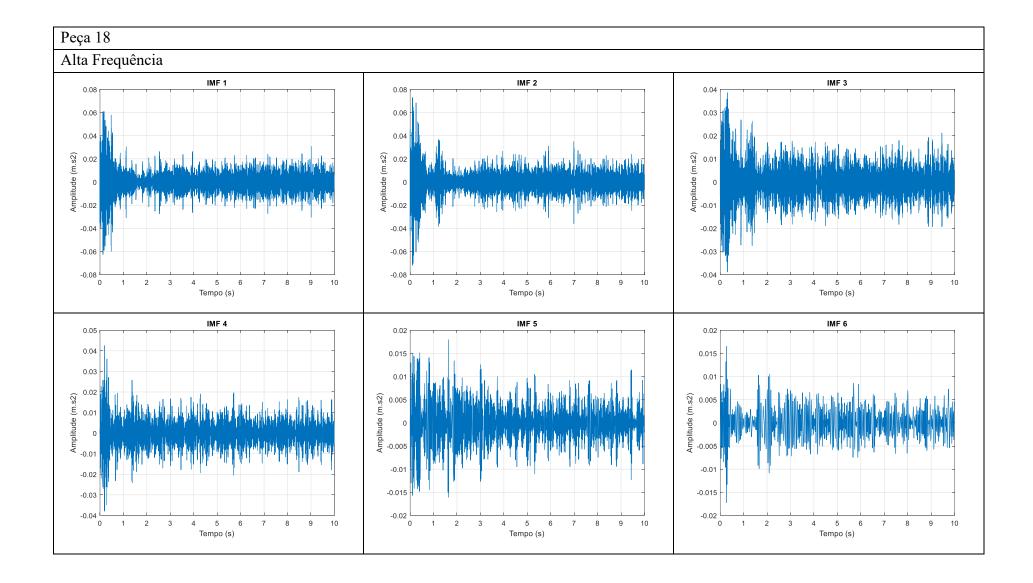


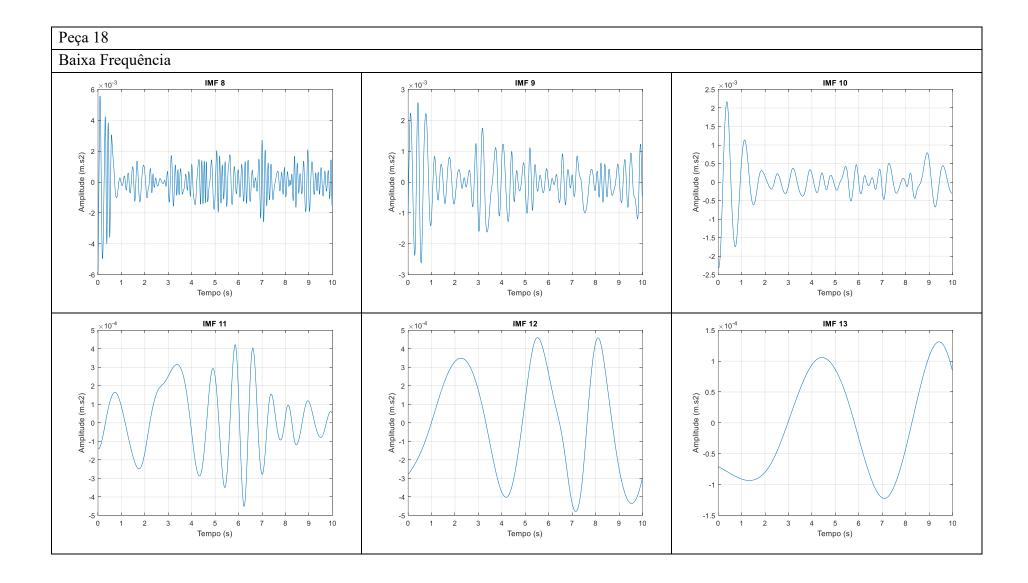


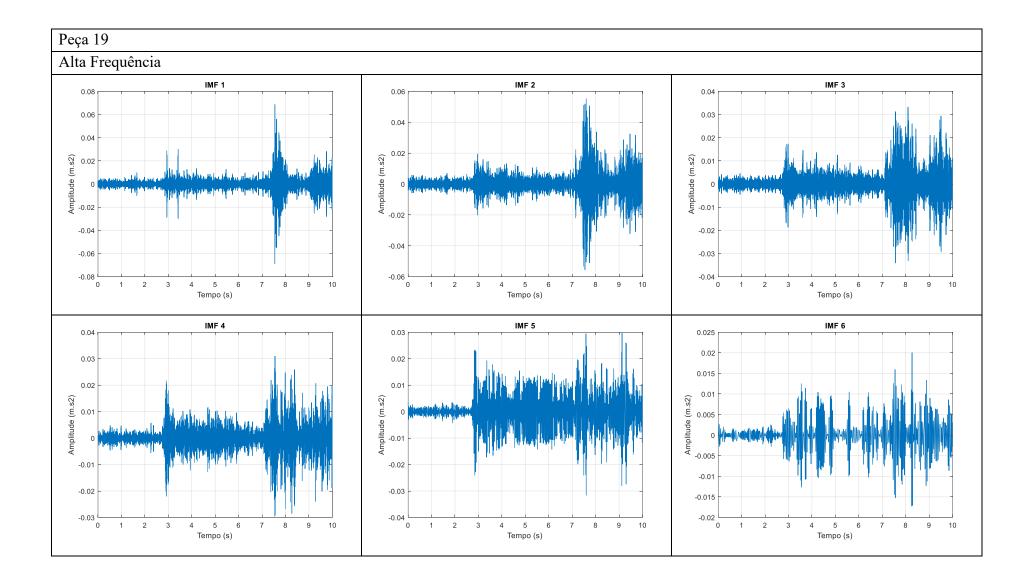


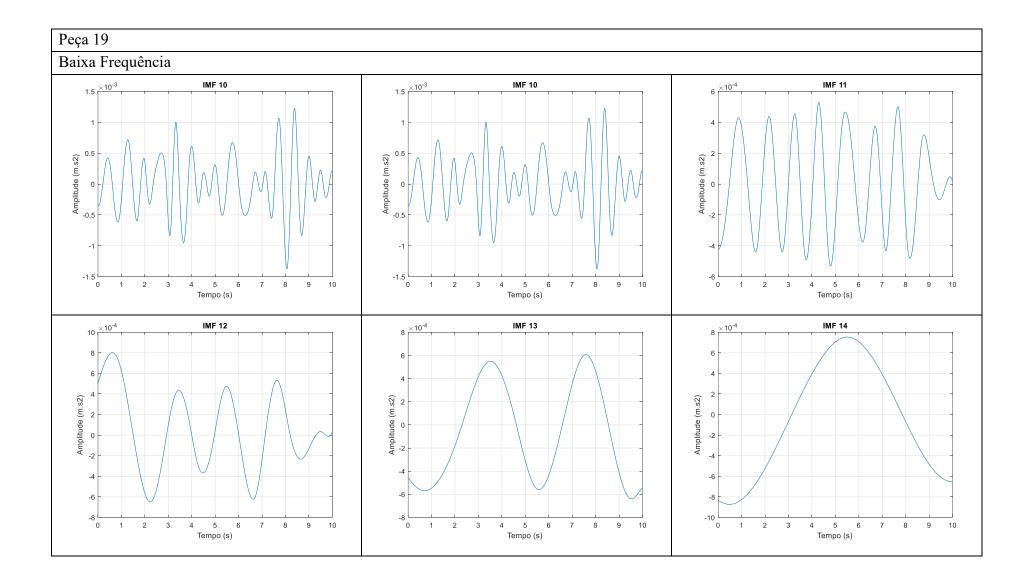


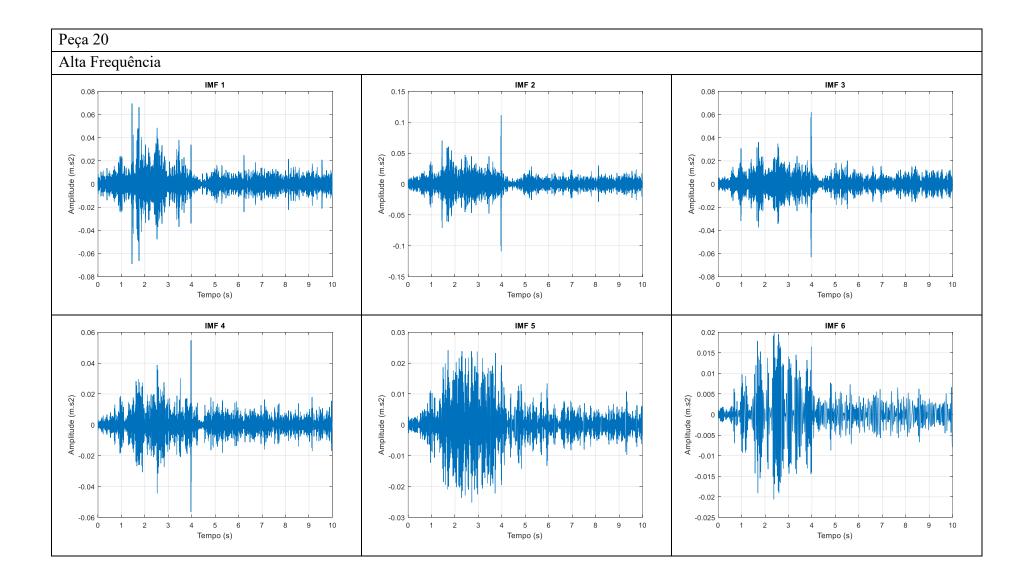


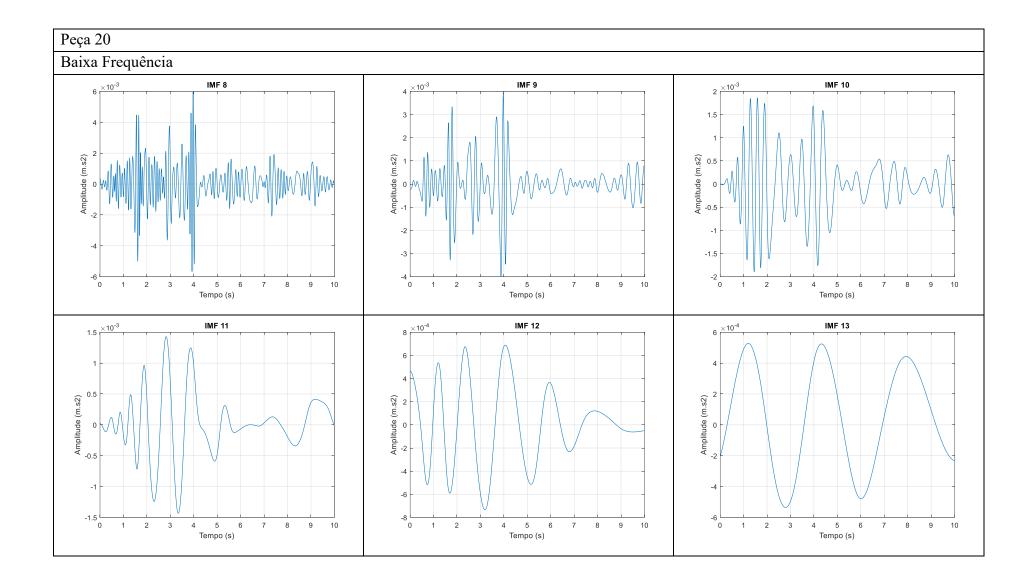












APENDICE E

Tabela E.1. Resultado dos recursos estatísticos no domínio do tempo para as IMFs de alta frequência

IMF-1																
Pç	Sk (a)	Cv (b)	Kv (c)	σ (d)	En (e)	Enp (f)	Fc (g)	Sf (h)	Fi (i)	Mi (j)	RMS (k)	SNR (I)	PAPR (m)	Pk (n)	μ (0)	Var (p)
1	0,011	213444,119	12,386	0,017	4,873	2,116	7,856	1,655	13,003	18,131	0,017	-19,013	61,721	0,135	8,051E-06	2,953E-04
2	0,070	-36293,741	53,346	0,009	1,231	1,599	20,569	1,592	32,753	41,635	0,009	-19,299	423,101	0,178	-2,380E-05	7,463E-05
3	-0,007	-63211,797	11,577	0,006	0,634	1,493	12,340	1,341	16,551	19,548	0,006	-20,453	152,279	0,076	-9,805E-06	3,841E-05
4	-0,173	-44325,176	46,679	0,014	3,337	1,952	16,283	1,730	28,162	36,261	0,014	-21,611	265,128	0,232	-3,208E-05	2,022E-04
5	-1,589	-30487,448	570,777	0,006	0,623	1,126	38,745	1,986	76,933	94,233	0,006	-22,757	1501,190	0,238	-2,015E-05	3,773E-05
6	0,071	-31817,489	12,366	0,011	2,058	1,969	12,141	1,401	17,007	20,551	0,011	-21,683	147,397	0,136	-3,510E-05	1,247E-04
7	0,034	51556,982	7,229	0,004	0,299	1,184	10,139	1,329	13,471	16,012	0,004	-20,689	102,801	0,043	8,257E-06	1,812E-05
8	-0,021	66468,271	4,513	0,006	0,682	1,576	7,223	1,274	9,200	10,723	0,006	-21,110	52,177	0,046	9,676E-06	4,136E-05
9	-0,014	-21943,645	9,666	0,012	2,500	2,017	7,915	1,446	11,443	14,196	0,012	-17,144	62,654	0,097	-5,609E-05	1,515E-04
10	0,337	-14348,368	89,495	0,010	1,748	1,760	22,928	1,574	36,089	45,120	0,010	-21,780	525,690	0,236	-7,173E-05	1,059E-04
11	0,059	133300,333	15,822	0,006	0,599	1,348	10,333	1,511	15,613	19,368	0,006	-22,666	106,762	0,062	4,520E-06	3,630E-05
12	-0,636	119050,080	80,265	0,006	0,624	1,399	22,707	1,464	33,254	39,770	0,006	-20,001	515,606	0,140	5,167E-06	3,784E-05
13	0,076	18910,190	9,234	0,006	0,503	1,319	7,928	1,450	11,498	14,286	0,006	-18,964	62,858	0,044	2,920E-05	3,049E-05
14	-0,150	-150786,255	18,001	0,010	1,500	1,660	10,908	1,601	17,465	22,910	0,010	-17,238	118,979	0,104	-6,322E-06	9,089E-05
15	-0,689	-35142,767	47,812	0,003	0,110	0,720	19,457	1,443	28,080	33,939	0,003	-23,126	378,558	0,050	-7,331E-06	6,637E-06
16	0,242	-45467,556	42,875	0,006	0,599	1,401	19,521	1,434	27,996	33,930	0,006	-20,195	381,072	0,118	-1,325E-05	3,630E-05
17	-0,013	220985,048	3,574	0,000	0,002	0,000	4,314	1,266	5,460	6,376	0,000	-22,320	18,607	0,002	1,708E-07	1,424E-07
18	0,018	762037,295	9,137	0,008	1,038	1,677	7,876	1,392	10,966	13,240	0,008	-21,822	62,032	0,062	1,041E-06	6,292E-05
19	-0,076	-161372,591	22,262	0,005	0,486	1,192	12,718	1,604	20,403	26,040	0,005	-16,897	161,753	0,069	-3,365E-06	2,948E-05
20	0,151	22399,087	13,529	0,007	0,875	1,541	9,556	1,478	14,124	17,415	0,007	-23,679	91,324	0,070	3,250E-05	5,300E-05

IMF-2

Pç	Sk (a)	Cv (b)	Kv (c)	σ (d)	En (e)	Enp (f)	Fc (g)	Sf (h)	Fi (i)	Mi (j)	RMS (k)	SNR (l)	PAPR (m)	Pk (n)	μ (0)	Var (p)
1	0,033	-82473,284	11,702	0,014	3,261	1,918	9,060	1,652	14,963	21,216	0,014	-20,958	82,077	0,127	-1,705E-05	1,977E-04
2	-0,016	-13601,943	11,602	0,006	0,679	1,415	11,645	1,472	17,146	21,857	0,006	-17,655	135,595	0,075	-4,717E-05	4,117E-05
3	0,138	-56118,765	9,266	0,007	0,855	1,567	9,210	1,410	12,987	16,081	0,007	-19,268	84,828	0,066	-1,282E-05	5,180E-05
4	0,038	22487,405	10,905	0,012	2,229	1,923	8,659	1,497	12,962	16,518	0,012	-18,236	74,982	0,101	5,169E-05	1,351E-04
5	1,078	18136,943	291,297	0,006	0,532	1,179	31,745	1,745	55,399	69,309	0,006	-20,738	1007,742	0,180	3,130E-05	3,223E-05
6	-0,018	32184,976	8,761	0,010	1,737	1,884	8,467	1,405	11,895	14,699	0,010	-18,874	71,697	0,087	3,188E-05	1,053E-04
7	0,017	157914,581	5,047	0,005	0,352	1,233	6,341	1,355	8,590	10,587	0,005	-16,655	40,211	0,029	2,925E-06	2,134E-05
8	-0,130	-11421,107	6,234	0,007	0,875	1,626	8,855	1,316	11,655	14,038	0,007	-19,655	78,405	0,064	-6,376E-05	5,302E-05
9	-0,010	-15677,039	8,807	0,012	2,249	1,964	8,653	1,425	12,330	15,457	0,012	-16,403	74,872	0,101	-7,447E-05	1,363E-04
10	-0,297	-420090,421	28,247	0,011	1,930	1,819	16,756	1,533	25,690	33,341	0,011	-9,962	280,749	0,181	-2,575E-06	1,170E-04
11	0,191	-41561,854	17,146	0,008	0,999	1,504	9,784	1,573	15,387	20,162	0,008	-19,097	95,721	0,076	-1,872E-05	6,053E-05
12	0,208	-49229,482	23,628	0,006	0,661	1,430	14,984	1,433	21,474	26,610	0,006	-15,067	224,509	0,095	-1,286E-05	4,006E-05
13	-0,047	-83787,243	6,653	0,006	0,521	1,351	6,149	1,417	8,712	10,958	0,006	-14,964	37,816	0,035	-6,707E-06	3,158E-05
14	0,039	30911,756	12,382	0,009	1,310	1,626	8,616	1,564	13,476	17,931	0,009	-16,793	74,231	0,077	2,882E-05	7,937E-05
15	0,457	20196,665	37,421	0,003	0,150	0,861	17,984	1,434	25,797	31,907	0,003	-16,291	323,435	0,054	1,493E-05	9,089E-06
16	0,039	26453,449	7,921	0,006	0,686	1,471	10,420	1,409	14,679	18,504	0,006	-17,823	108,571	0,067	2,437E-05	4,155E-05
17	0,040	15892,742	3,796	0,000	0,002	0,001	5,262	1,280	6,736	8,013	0,000	-18,523	27,690	0,002	2,433E-06	1,495E-07
18	-0,033	43684,782	9,826	0,008	1,159	1,707	8,710	1,412	12,297	15,214	0,008	-17,132	75,870	0,073	1,919E-05	7,027E-05
19	0,059	39729,504	15,301	0,006	0,676	1,293	8,675	1,654	14,351	19,331	0,006	-14,381	75,250	0,056	1,611E-05	4,098E-05
20	-0,070	-42081,923	14,046	0,009	1,402	1,720	12,074	1,492	18,016	22,936	0,009	-16,860	145,789	0,111	-2,191E-05	8,498E-05

IMF-3

Pç	Sk (a)	Cv (b)	Kv (c)	σ (d)	En (e)	Enp (f)	Fc (g)	Sf (h)	Fi (i)	Mi (j)	RMS (k)	SNR (l)	PAPR (m)	Pk (n)	μ (ο)	Var (p)
1	0,164	22149,061	17,745	0,012	2,440	1,817	13,620	1,658	22,585	31,771	0,012	-18,431	185,511	0,166	5,491E-05	1,479E-04
2	0,089	23741,854	7,852	0,007	0,773	1,503	7,075	1,443	10,208	12,975	0,007	-9,606	50,058	0,048	2,883E-05	4,685E-05
3	0,048	19415,203	4,179	0,006	0,667	1,529	4,989	1,321	6,592	8,009	0,006	-15,273	24,892	0,032	3,274E-05	4,041E-05
4	-0,002	-24216,890	5,079	0,008	1,025	1,697	5,226	1,334	6,970	8,430	0,008	-15,881	27,308	0,041	-3,255E-05	6,214E-05
5	0,044	41359,375	18,061	0,004	0,303	1,156	14,393	1,389	19,989	24,490	0,004	-12,604	207,145	0,062	1,037E-05	1,838E-05
6	-0,005	-66285,250	5,407	0,009	1,362	1,819	7,011	1,336	9,364	11,377	0,009	-13,053	49,148	0,064	-1,371E-05	8,255E-05
7	0,029	13706,644	3,956	0,005	0,367	1,271	4,736	1,330	6,297	7,735	0,005	-12,907	22,433	0,022	3,440E-05	2,224E-05
8	0,009	13748,635	8,728	0,008	0,937	1,675	10,052	1,328	13,350	16,039	0,008	-16,668	101,043	0,076	5,480E-05	5,677E-05
9	-0,014	-180207,148	6,188	0,011	2,035	1,967	6,446	1,375	8,860	10,920	0,011	-12,951	41,547	0,072	-6,162E-06	1,233E-04
10	0,005	-56385,866	5,783	0,009	1,331	1,736	5,975	1,417	8,464	10,763	0,009	-3,943	35,702	0,054	-1,593E-05	8,064E-05
11	-0,028	-100742,730	6,827	0,006	0,608	1,406	7,079	1,426	10,094	12,765	0,006	-16,358	50,119	0,043	-6,027E-06	3,687E-05
12	-0,018	-55574,579	6,032	0,006	0,556	1,419	8,030	1,355	10,883	13,376	0,006	-15,337	64,483	0,047	-1,045E-05	3,372E-05
13	0,014	-25510,142	5,873	0,006	0,526	1,372	6,548	1,390	9,101	11,326	0,006	-7,449	42,871	0,037	-2,213E-05	3,186E-05
14	-0,012	-45196,668	17,940	0,008	0,999	1,525	13,381	1,546	20,687	27,126	0,008	-13,075	179,062	0,104	-1,722E-05	6,055E-05
15	0,123	59425,752	10,888	0,003	0,126	0,816	10,616	1,393	14,784	18,266	0,003	-14,886	112,699	0,029	4,648E-06	7,628E-06
16	0,045	13000,443	6,262	0,007	0,778	1,523	5,714	1,420	8,115	10,275	0,007	-18,124	32,655	0,039	5,282E-05	4,715E-05
17	0,004	206357,129	3,112	0,000	0,002	0,000	3,792	1,265	4,795	5,694	0,000	-15,427	14,381	0,001	1,616E-07	1,112E-07
18	0,023	-51458,223	4,748	0,007	0,729	1,570	5,847	1,309	7,655	9,179	0,007	-16,376	34,185	0,039	-1,292E-05	4,420E-05
19	0,006	-45523,008	8,084	0,006	0,532	1,256	6,009	1,548	9,299	12,314	0,006	-8,109	36,109	0,034	-1,248E-05	3,226E-05
20	-0,073	47504,083	8,684	0,007	0,715	1,529	9,578	1,370	13,122	16,019	0,007	-17,529	91,733	0,063	1,386E-05	4,335E-05

IMF-4

-	1	1 1								l		1	1		i	1
Pç	Sk (a)	Cv (b)	Kv (c)	σ (d)	En (e)	Enp (f)	Fc (g)	Sf (h)	Fi (i)	Mi (j)	RMS (k)	SNR (l)	PAPR (m)	Pk (n)	μ (ο)	Var (p)
1	0,058	18497,684	7,505	0,011	2,077	1,761	5,417	1,610	8,720	12,510	0,011	-10,917	29,345	0,061	6,066E-05	1,259E-04
2	-0,020	878435,380	6,940	0,007	0,711	1,465	6,296	1,442	9,082	11,612	0,007	-3,154	39,644	0,041	7,470E-07	4,306E-05
3	-0,062	-10033,504	6,242	0,005	0,397	1,279	6,024	1,332	8,026	9,636	0,005	-13,355	36,293	0,030	-4,887E-05	2,404E-05
4	0,052	-18690,807	4,905	0,007	0,790	1,570	5,478	1,352	7,404	9,104	0,007	-11,544	30,008	0,038	-3,703E-05	4,789E-05
5	-0,159	-9594,308	13,279	0,004	0,207	0,992	10,192	1,387	14,141	17,226	0,004	-10,910	103,882	0,036	-3,691E-05	1,254E-05
6	-0,024	-19462,739	5,476	0,008	1,090	1,697	4,982	1,373	6,838	8,438	0,008	-12,485	24,819	0,040	-4,176E-05	6,606E-05
7	-0,002	211574,427	4,605	0,005	0,363	1,249	5,862	1,340	7,854	9,663	0,005	-3,177	34,365	0,028	2,218E-06	2,202E-05
8	-0,014	-21275,642	4,615	0,006	0,645	1,512	5,341	1,314	7,020	8,450	0,006	-13,088	28,531	0,033	-2,938E-05	3,907E-05
9	0,029	21260,601	4,457	0,009	1,332	1,797	4,977	1,354	6,738	8,328	0,009	-9,954	24,768	0,045	4,226E-05	8,074E-05
10	-0,007	52225,400	4,683	0,007	0,725	1,508	4,855	1,376	6,681	8,420	0,007	-8,567	23,570	0,032	1,269E-05	4,392E-05
11	0,029	146217,631	7,358	0,006	0,528	1,357	8,392	1,412	11,846	14,920	0,006	-15,946	70,422	0,047	3,867E-06	3,197E-05
12	-0,023	120107,572	4,287	0,005	0,457	1,339	4,940	1,350	6,671	8,262	0,005	-13,534	24,404	0,026	4,382E-06	2,770E-05
13	0,044	49898,463	5,422	0,005	0,428	1,304	5,924	1,378	8,163	10,144	0,005	-5,226	35,089	0,030	1,021E-05	2,597E-05
14	-0,057	-124523,972	14,572	0,007	0,785	1,391	9,525	1,588	15,123	20,366	0,007	-13,448	90,734	0,066	-5,538E-06	4,756E-05
15	0,009	-22321,956	15,970	0,003	0,160	0,868	11,830	1,448	17,125	21,657	0,003	-11,941	139,947	0,037	-1,396E-05	9,710E-06
16	0,019	-24223,379	5,675	0,006	0,569	1,403	5,410	1,380	7,468	9,280	0,006	-8,743	29,266	0,032	-2,423E-05	3,446E-05
17	-0,014	-18904,341	3,459	0,000	0,001	0,000	4,798	1,266	6,073	7,188	0,000	-12,116	23,017	0,001	-1,383E-06	6,839E-08
18	0,069	7993,871	5,099	0,006	0,638	1,518	6,848	1,321	9,048	10,935	0,006	-14,355	46,895	0,043	7,778E-05	3,866E-05
19	-0,085	-29981,554	7,166	0,005	0,449	1,237	5,942	1,488	8,842	11,540	0,005	-5,805	35,312	0,031	-1,740E-05	2,722E-05
20	-0,077	-13911,406	8,271	0,006	0,680	1,458	8,778	1,416	12,429	15,579	0,006	-15,408	77,061	0,056	-4,614E-05	4,121E-05

IMF-5

Pç	Sk (a)	Cv (b)	Kv (c)	σ (d)	En (e)	Enp (f)	Fc (g)	Sf (h)	Fi (i)	Mi (j)	RMS (k)	SNR (l)	PAPR (m)	Pk (n)	μ (0)	Var (p)
1	-0,007	22243,066	7,924	0,007	0,813	1,406	5,637	1,598	9,005	12,615	0,007	-13,868	31,776	0,040	3,156E-05	4,927E-05
2	-0,009	31114,905	4,514	0,005	0,465	1,320	4,376	1,384	6,054	7,650	0,005	-2,848	19,148	0,023	1,706E-05	2,819E-05
3	0,052	-9966,320	6,261	0,005	0,402	1,204	4,328	1,456	6,300	8,043	0,005	-10,541	18,733	0,021	-4,954E-05	2,438E-05
4	-0,044	-15183,137	5,084	0,005	0,448	1,316	4,266	1,379	5,881	7,268	0,005	-10,248	18,198	0,022	-3,431E-05	2,714E-05
5	-0,026	-47759,327	10,513	0,003	0,152	0,865	9,005	1,416	12,749	15,849	0,003	-12,767	81,084	0,027	-6,349E-06	9,195E-06
6	0,060	33059,133	6,958	0,007	0,922	1,551	5,319	1,473	7,833	10,068	0,007	-12,316	28,295	0,040	2,261E-05	5,585E-05
7	-0,014	4622,616	3,359	0,004	0,268	1,164	4,049	1,301	5,269	6,407	0,004	-2,665	16,397	0,016	8,722E-05	1,626E-05
8	0,061	42617,745	7,390	0,005	0,443	1,341	7,968	1,338	10,665	12,897	0,005	-11,527	63,488	0,041	1,216E-05	2,688E-05
9	-0,053	-4280,262	4,941	0,009	1,310	1,702	3,864	1,419	5,485	6,972	0,009	-0,546	14,933	0,034	-2,082E-04	7,938E-05
10	0,004	-26335,258	4,424	0,005	0,399	1,269	4,925	1,361	6,702	8,399	0,005	-10,854	24,254	0,024	-1,868E-05	2,421E-05
11	0,184	-38531,854	11,403	0,005	0,486	1,278	8,311	1,480	12,298	15,790	0,005	-11,045	69,076	0,045	-1,409E-05	2,947E-05
12	0,012	-44385,451	4,895	0,004	0,322	1,192	5,297	1,351	7,159	8,823	0,004	-10,723	28,063	0,023	-9,956E-06	1,953E-05
13	0,029	-8638,471	3,117	0,005	0,437	1,349	3,975	1,273	5,059	6,041	0,005	-1,782	15,800	0,020	-5,958E-05	2,649E-05
14	-0,040	25069,996	11,589	0,005	0,415	1,183	9,197	1,535	14,114	18,649	0,005	-10,646	84,588	0,046	2,000E-05	2,513E-05
15	0,145	7179,092	13,269	0,003	0,107	0,761	10,503	1,404	14,747	18,321	0,003	-9,796	110,307	0,027	3,542E-05	6,467E-06
16	-0,014	42934,749	3,752	0,004	0,251	1,128	4,629	1,293	5,983	7,204	0,004	-9,181	21,426	0,018	9,078E-06	1,519E-05
17	-0,020	109700,864	2,945	0,000	0,001	0,000	3,670	1,245	4,569	5,362	0,000	-13,824	13,470	0,001	1,672E-07	3,365E-08
18	-0,041	-8120,076	3,855	0,004	0,284	1,155	4,337	1,307	5,670	6,843	0,004	-11,846	18,811	0,018	-5,104E-05	1,718E-05
19	0,055	-2695,230	4,053	0,007	0,747	1,425	4,710	1,373	6,465	8,338	0,007	3,714	22,181	0,032	-2,494E-04	4,518E-05
20	0,077	5351,202	5,384	0,006	0,620	1,400	4,101	1,451	5,953	7,659	0,006	-10,769	16,821	0,025	1,145E-04	3,755E-05

IMF-6

Pç	Sk (a)	Cv (b)	Kv (c)	σ (d)	En (e)	Enp (f)	Fc (g)	Sf (h)	Fi (i)	Mi (j)	RMS (k)	SNR (I)	PAPR (m)	Pk (n)	μ (0)	Var (p)
1	-0,145	-11000,880	5,623	0,006	0,525	1,299	4,892	1,484	7,260	9,909	0,006	-7,368	23,934	0,028	-5,129E-05	3,184E-05
2	0,003	10255,360	5,372	0,003	0,139	0,840	5,249	1,415	7,428	9,445	0,003	-7,815	27,555	0,015	2,830E-05	8,423E-06
3	-0,093	-43529,338	8,047	0,003	0,161	0,883	5,665	1,446	8,191	10,248	0,003	-9,150	32,096	0,018	-7,174E-06	9,753E-06
4	-0,022	228749,172	4,174	0,003	0,182	0,973	4,553	1,344	6,118	7,536	0,003	-7,140	20,731	0,015	1,451E-06	1,102E-05
5	-0,076	-75386,795	3,529	0,002	0,064	0,624	4,071	1,297	5,278	6,380	0,002	-5,377	16,574	0,008	-2,619E-06	3,897E-06
6	-0,012	-57724,944	5,251	0,005	0,450	1,306	4,630	1,390	6,434	8,069	0,005	-8,332	21,436	0,024	-9,047E-06	2,728E-05
7	0,003	33695,858	3,625	0,002	0,095	0,761	3,837	1,300	4,987	6,041	0,002	-10,209	14,722	0,009	7,116E-06	5,750E-06
8	0,089	8475,291	7,401	0,003	0,140	0,867	6,034	1,376	8,301	10,170	0,003	-6,109	36,408	0,018	3,440E-05	8,500E-06
9	0,035	-20952,935	4,515	0,005	0,467	1,360	4,732	1,334	6,312	7,684	0,005	-5,863	22,389	0,025	-2,540E-05	2,833E-05
10	0,007	9213,095	4,386	0,003	0,144	0,890	4,906	1,343	6,589	8,132	0,003	-8,137	24,067	0,014	3,202E-05	8,705E-06
11	0,031	-23819,741	13,151	0,005	0,411	1,139	7,885	1,598	12,603	16,994	0,005	-10,310	62,169	0,039	-2,096E-05	2,493E-05
12	-0,047	22755,279	3,126	0,003	0,110	0,827	3,724	1,285	4,785	5,785	0,003	-3,197	13,869	0,010	1,136E-05	6,683E-06
13	-0,023	8838,499	3,704	0,003	0,134	0,882	4,044	1,320	5,338	6,573	0,003	-4,747	16,356	0,012	3,228E-05	8,138E-06
14	0,117	-54489,431	6,902	0,003	0,180	0,919	5,896	1,431	8,438	10,735	0,003	-10,402	34,764	0,019	-6,055E-06	1,089E-05
15	0,122	13216,384	9,004	0,001	0,027	0,261	6,865	1,416	9,723	12,090	0,001	-10,642	47,126	0,009	9,652E-06	1,627E-06
16	-0,017	20206,019	3,598	0,002	0,082	0,710	3,513	1,333	4,682	5,793	0,002	-9,542	12,338	0,008	1,104E-05	4,980E-06
17	-0,016	-9827,755	2,707	0,000	0,000	0,000	3,363	1,233	4,147	4,846	0,000	-5,045	11,311	0,001	-1,631E-06	2,568E-08
18	0,031	6433,839	3,822	0,003	0,168	0,997	5,400	1,275	6,887	8,185	0,003	-7,940	29,162	0,017	4,965E-05	1,020E-05
19	0,042	-25364,859	5,708	0,004	0,218	0,938	5,521	1,485	8,200	11,000	0,004	-4,732	30,479	0,020	-1,434E-05	1,322E-05
20	-0,033	34032,779	6,308	0,004	0,305	1,098	4,789	1,473	7,055	9,106	0,004	-10,038	22,931	0,021	1,263E-05	1,847E-05

Tabela E.2. Resultado dos recursos estatísticos no domínio do tempo para as IMFs de baixa frequência

IMF- (N-6)

11411 - (1	1 -0 <i>)</i>															
Pç	Sk (a)	Cv (b)	Kv (c)	σ (d)	En (e)	Enp (f)	Fc (g)	Sf (h)	Fi (i)	Mi (j)	RMS (k)	SNR (l)	PAPR (m)	Pk (n)	μ (0)	Var (p)
1	0,025	-31234,140	3,817	0,001	0,029	0,375	3,316	1,359	4,506	5,712	1,320E-03	-6,799	10,997	0,004	-4,226E-06	1,742E-06
2	-0,050	-76834,352	4,441	0,001	0,034	0,404	4,716	1,330	6,272	7,666	1,430E-03	-2,416	22,239	0,007	-1,861E-06	2,044E-06
3	0,032	6758,414	4,499	0,001	0,015	0,193	4,077	1,336	5,446	6,636	9,484E-04	-1,811	16,622	0,004	1,403E-05	8,993E-07
4	-0,066	-5103,190	7,897	0,001	0,018	0,140	5,317	1,396	7,422	9,125	1,037E-03	-0,627	28,266	0,006	-2,032E-05	1,076E-06
5	0,053	5316,743	4,357	0,001	0,006	0,023	3,593	1,319	4,738	5,714	5,782E-04	-2,506	12,913	0,002	1,087E-05	3,342E-07
6	0,061	1827731,252	4,370	0,002	0,038	0,407	3,587	1,356	4,864	5,979	1,522E-03	-1,656	12,864	0,005	8,328E-08	2,317E-06
7	0,308	-9958,168	8,714	0,001	0,017	0,171	5,085	1,468	7,464	9,419	1,030E-03	0,136	25,860	0,005	-1,034E-05	1,060E-06
8	0,039	3197,173	4,909	0,001	0,032	0,381	4,949	1,314	6,501	7,784	1,392E-03	-7,592	24,491	0,007	4,351E-05	1,935E-06
9	-0,075	-5113,579	4,118	0,001	0,018	0,218	3,510	1,332	4,675	5,741	1,043E-03	-2,953	12,323	0,004	-2,039E-05	1,087E-06
10	0,032	2286,395	3,511	0,001	0,030	0,404	3,640	1,302	4,737	5,742	1,338E-03	1,151	13,249	0,005	5,845E-05	1,786E-06
11	-0,129	11304,576	22,778	0,001	0,027	0,228	7,584	2,019	15,316	22,280	1,271E-03	5,371	57,519	0,010	1,124E-05	1,615E-06
12	-0,029	7346,730	3,620	0,001	0,011	0,080	3,793	1,300	4,930	5,962	8,027E-04	-1,562	14,387	0,003	1,093E-05	6,442E-07
13	0,004	9965,859	3,310	0,001	0,010	0,062	3,397	1,281	4,350	5,207	7,807E-04	-4,391	11,538	0,003	7,834E-06	6,095E-07
14	-0,144	20975,182	7,053	0,001	0,007	0,090	4,345	1,546	6,716	9,189	6,538E-04	0,100	18,878	0,003	3,117E-06	4,275E-07
15	-0,414	-2472,812	16,696	0,000	0,004	0,041	6,840	1,598	10,930	14,103	4,673E-04	-5,397	46,782	0,003	-1,888E-05	2,180E-07
16	-0,058	-89942,209	3,353	0,001	0,005	0,000	2,980	1,292	3,849	4,627	5,619E-04	-4,211	8,879	0,002	-6,247E-07	3,157E-07
17	-0,014	-18904,341	3,459	0,000	0,001	0,000	4,798	1,266	6,073	7,188	2,615E-04	-12,116	23,017	0,001	-1,383E-06	6,839E-08
18	0,033	92495,667	7,110	0,001	0,021	0,205	5,111	1,395	7,130	8,767	1,133E-03	-5,266	26,121	0,006	1,225E-06	1,285E-06
19	-0,117	3337,222	5,835	0,001	0,006	0,084	3,928	1,472	5,781	7,526	6,270E-04	-4,328	15,433	0,002	1,878E-05	3,928E-07
20	-0,033	12341,747	6,728	0,001	0,023	0,224	5,083	1,402	7,125	8,787	1,170E-03	-9,375	25,841	0,006	9,478E-06	1,368E-06
	•	•	•	•	•			•	•	•	•					•

IMF- (N-5)

Рç	Sk (a)	Cv (b)	Kv (c)	σ (d)	En (e)	Enp (f)	Fc (g)	Sf (h)	Fi (i)	Mi (j)	RMS (k)	SNR (I)	PAPR (m)	Pk (n)	μ (0)	Var (p)
1	0,042	19690,635	3,022	0,001	0,009	0,000	2,502	1,290	3,228	3,911	7,424E-04	0,506	6,261	0,002	3,770E-06	5,512E-07
2	0,038	-51735,119	3,531	0,001	0,013	0,108	3,564	1,312	4,677	5,745	8,756E-04	3,834	12,699	0,003	-1,693E-06	7,668E-07
3	-0,082	-41845,349	4,200	0,001	0,009	0,074	3,769	1,287	4,849	5,730	7,317E-04	-1,359	14,208	0,003	-1,749E-06	5,355E-07
4	0,602	993,691	5,701	0,001	0,009	0,172	3,737	1,440	5,381	6,790	7,491E-04	9,717	13,967	0,003	7,501E-05	5,555E-07
5	-0,222	-1380,453	8,649	0,001	0,004	0,046	4,438	1,640	7,278	9,811	5,052E-04	-1,093	19,695	0,002	-3,650E-05	2,539E-07
6	0,070	4765,199	5,461	0,001	0,024	0,296	3,522	1,414	4,979	6,214	1,213E-03	3,456	12,403	0,004	2,544E-05	1,470E-06
7	-0,304	1991,640	7,371	0,001	0,013	0,131	4,112	1,551	6,379	8,474	8,753E-04	-0,764	16,908	0,004	4,389E-05	7,642E-07
8	-0,041	-5359,579	2,959	0,001	0,008	0,035	3,240	1,243	4,028	4,737	7,148E-04	-2,049	10,496	0,002	-1,333E-05	5,108E-07
9	0,227	4191,161	3,141	0,001	0,006	0,000	2,759	1,297	3,579	4,334	5,787E-04	3,060	7,610	0,002	1,380E-05	3,347E-07
10	0,014	-1925,153	3,962	0,001	0,012	0,081	3,704	1,335	4,944	6,116	8,557E-04	2,257	13,719	0,003	-4,439E-05	7,303E-07
11	0,368	1138,674	8,011	0,001	0,011	0,236	4,065	1,766	7,178	10,650	8,330E-04	12,066	16,526	0,003	7,288E-05	6,886E-07
12	-0,022	5963,619	2,683	0,001	0,006	0,000	2,611	1,265	3,304	3,995	5,974E-04	-1,628	6,819	0,002	1,002E-05	3,568E-07
13	0,072	14316,628	2,546	0,001	0,005	0,000	2,668	1,239	3,306	3,905	5,244E-04	-0,222	7,120	0,001	3,663E-06	2,750E-07
14	-0,026	-67434,349	5,017	0,001	0,007	0,081	3,285	1,516	4,979	6,902	6,646E-04	16,095	10,790	0,002	-9,856E-07	4,417E-07
15	0,058	-5514,615	11,296	0,000	0,004	0,054	5,030	1,775	8,928	12,506	4,629E-04	1,979	25,296	0,002	-8,394E-06	2,143E-07
16	0,059	1762,547	3,029	0,001	0,005	0,000	2,922	1,272	3,718	4,470	5,287E-04	-1,174	8,538	0,002	2,995E-05	2,786E-07
17	-0,020	109700,864	2,945	0,000	0,001	0,000	3,670	1,245	4,569	5,362	1,834E-04	-13,824	13,470	0,001	1,672E-07	3,365E-08
18	0,085	-5808,949	4,342	0,001	0,009	0,134	3,463	1,343	4,652	5,684	7,580E-04	-3,484	11,992	0,003	-1,305E-05	5,744E-07
19	-0,043	-15670,821	3,111	0,000	0,004	0,000	2,966	1,256	3,725	4,374	4,631E-04	0,693	8,795	0,001	-2,955E-06	2,145E-07
20	0,035	-5325,752	7,249	0,001	0,013	0,212	4,406	1,565	6,897	9,294	9,019E-04	-6,216	19,415	0,004	-1,693E-05	8,132E-07

IMF- (N-4)

Рç	Sk (a)	Cv (b)	Kv (c)	σ (d)	En (e)	Enp (f)	Fc (g)	Sf (h)	Fi (i)	Mi (j)	RMS (k)	SNR (I)	PAPR (m)	Pk (n)	μ (0)	Var (p)
1	0,018	-30502,350	3,561	0,001	0,009	0,060	3,224	1,291	4,162	5,024	7,235E-04	2,230	10,393	0,002	-2,372E-06	5,234E-07
2	-0,032	3599,028	3,590	0,001	0,007	0,000	2,684	1,368	3,672	4,629	6,434E-04	12,801	7,205	0,002	1,787E-05	4,136E-07
3	-0,007	-5514,475	2,684	0,001	0,005	0,000	2,739	1,244	3,409	4,015	5,439E-04	11,729	7,504	0,001	-9,862E-06	2,957E-07
4	0,083	-6011,409	2,296	0,000	0,003	0,000	2,409	1,218	2,935	3,479	4,133E-04	20,305	5,804	0,001	-6,875E-06	1,708E-07
5	-0,123	-1556,750	5,308	0,000	0,003	0,000	3,131	1,544	4,835	6,610	4,285E-04	3,962	9,805	0,001	-2,747E-05	1,829E-07
6	0,316	1916,552	4,347	0,001	0,012	0,233	3,220	1,353	4,358	5,381	8,526E-04	10,486	10,369	0,003	4,443E-05	7,250E-07
7	-0,165	-3567,082	2,926	0,000	0,004	0,000	2,517	1,245	3,133	3,642	4,879E-04	33,868	6,335	0,001	-1,367E-05	2,379E-07
8	0,160	4553,284	3,027	0,001	0,008	0,046	2,977	1,259	3,750	4,445	7,110E-04	-5,276	8,865	0,002	1,561E-05	5,052E-07
9	-0,011	4843,440	2,320	0,001	0,010	0,000	2,078	1,272	2,643	3,299	7,732E-04	60,680	4,320	0,002	1,596E-05	5,976E-07
10	-0,043	-1639,395	2,604	0,001	0,009	0,000	2,460	1,236	3,040	3,552	7,410E-04	4,509	6,050	0,002	-4,512E-05	5,470E-07
11	0,265	880,882	6,579	0,001	0,015	0,335	3,574	1,734	6,198	9,454	9,550E-04	20,398	12,775	0,003	1,077E-04	9,006E-07
12	-0,005	22138,177	3,073	0,000	0,003	0,000	2,737	1,262	3,454	4,074	3,930E-04	1,133	7,491	0,001	1,775E-06	1,544E-07
13	0,067	-1057,684	2,815	0,000	0,003	0,000	2,462	1,266	3,115	3,729	4,183E-04	18,524	6,060	0,001	-3,937E-05	1,734E-07
14	-0,100	-2231,612	3,582	0,000	0,003	0,000	2,576	1,419	3,654	4,823	4,533E-04	54,732	6,635	0,001	-2,029E-05	2,051E-07
15	0,135	623,918	2,682	0,000	0,001	0,000	2,207	1,310	2,890	3,609	2,274E-04	19,500	4,871	0,001	3,599E-05	5,041E-08
16	0,142	9879,289	3,952	0,000	0,002	0,000	3,307	1,335	4,416	5,433	3,563E-04	0,171	10,935	0,001	3,606E-06	1,269E-07
17	-0,016	-9827,755	2,707	0,000	0,000	0,000	3,363	1,233	4,147	4,846	1,603E-04	-5,045	11,311	0,001	-1,631E-06	2,568E-08
18	-0,230	-14539,387	8,322	0,001	0,005	0,079	4,260	1,561	6,648	8,639	5,431E-04	1,174	18,149	0,002	-3,736E-06	2,950E-07
19	-0,028	10889,526	1,728	0,000	0,002	0,000	1,758	1,153	2,026	2,288	3,019E-04	42,091	3,089	0,001	2,773E-06	9,116E-08
20	-0,014	-5944,524	3,960	0,001	0,007	0,000	2,898	1,390	4,027	5,143	6,546E-04	13,965	8,397	0,002	-1,101E-05	4,285E-07

IMF- (N-3)

Рç	Sk (a)	Cv (b)	Kv (c)	σ (d)	En (e)	Enp (f)	Fc (g)	Sf (h)	Fi (i)	Mi (j)	RMS (k)	SNR (I)	PAPR (m)	Pk (n)	μ (0)	Var (p)
1	-0,106	-943,664	3,864	0,001	0,009	0,000	2,612	1,522	3,976	5,905	7,446E-04	50,066	6,821	0,002	-7,847E-05	5,483E-07
2	0,350	75525,403	3,686	0,000	0,004	0,000	3,143	1,276	4,012	4,714	4,686E-04	5,038	9,881	0,001	6,204E-07	2,196E-07
3	0,076	-5301,248	2,468	0,000	0,003	0,000	2,227	1,259	2,804	3,401	4,551E-04	40,612	4,958	0,001	-8,583E-06	2,070E-07
4	0,035	19600,619	1,961	0,001	0,005	0,000	1,938	1,171	2,269	2,568	5,603E-04	68,846	3,755	0,001	2,859E-06	3,139E-07
5	0,039	-800,070	2,839	0,000	0,003	0,000	2,130	1,361	2,898	3,892	4,509E-04	65,285	4,536	0,001	-5,592E-05	2,002E-07
6	-0,151	-6026,468	2,764	0,001	0,006	0,000	2,231	1,246	2,779	3,248	5,885E-04	4,963	4,976	0,001	-9,764E-06	3,462E-07
7	0,128	2394,128	3,554	0,000	0,002	0,000	2,579	1,430	3,688	5,024	3,848E-04	34,928	6,654	0,001	1,606E-05	1,478E-07
8	-0,100	-5087,414	2,594	0,000	0,002	0,000	2,599	1,208	3,139	3,593	3,749E-04	1,462	6,756	0,001	-7,368E-06	1,405E-07
9	0,013	-3599,219	2,549	0,001	0,006	0,000	2,176	1,246	2,711	3,225	5,856E-04	63,996	4,734	0,001	-1,626E-05	3,427E-07
10	0,136	-871,707	2,186	0,000	0,004	0,000	2,109	1,190	2,510	2,866	4,965E-04	38,887	4,449	0,001	-5,659E-05	2,433E-07
11	0,168	950,396	4,229	0,000	0,003	0,000	2,814	1,427	4,015	5,130	4,504E-04	46,495	7,920	0,001	4,713E-05	2,007E-07
12	-0,075	2605,895	2,940	0,000	0,003	0,000	2,514	1,260	3,169	3,746	4,024E-04	52,113	6,322	0,001	1,543E-05	1,617E-07
13	-0,005	17186,208	3,604	0,000	0,001	0,000	2,761	1,356	3,744	4,647	2,434E-04	62,081	7,621	0,001	1,417E-06	5,927E-08
14	-0,048	-43235,945	3,505	0,000	0,002	0,000	2,559	1,406	3,597	4,738	3,711E-04	49,191	6,546	0,001	-8,584E-07	1,378E-07
15	-0,033	3454,038	2,315	0,000	0,000	0,000	2,291	1,187	2,719	3,084	9,182E-05	41,511	5,249	0,000	2,657E-06	8,424E-09
16	-0,148	1591,280	2,310	0,000	0,002	0,000	2,335	1,193	2,785	3,175	3,110E-04	11,284	5,454	0,001	1,950E-05	9,632E-08
17	0,098	-10092,045	3,229	0,000	0,000	0,000	4,305	1,249	5,377	6,319	9,371E-05	-6,736	18,534	0,000	-9,286E-07	8,782E-09
18	-0,083	990,147	2,393	0,000	0,001	0,000	2,410	1,213	2,923	3,379	1,872E-04	21,933	5,809	0,000	1,881E-05	3,470E-08
19	0,094	888,018	2,103	0,000	0,003	0,000	2,037	1,209	2,462	2,904	3,936E-04	69,684	4,148	0,001	4,405E-05	1,530E-07
20	0,000	4499,119	4,422	0,001	0,004	0,000	2,839	1,474	4,183	5,714	5,045E-04	27,582	8,059	0,001	1,121E-05	2,544E-07

IMF- (N-2)

Рç	Sk (a)	Cv (b)	Kv (c)	σ (d)	En (e)	Enp (f)	Fc (g)	Sf (h)	Fi (i)	Mi (j)	RMS (k)	SNR (I)	PAPR (m)	Pk (n)	μ (0)	Var (p)
1	0,397	640,748	2,866	0,000	0,001	0,000	2,166	1,335	2,890	3,594	2,424E-04	53,908	4,691	0,001	3,738E-05	5,737E-08
2	-0,036	12257,739	2,452	0,000	0,003	0,000	2,174	1,268	2,756	3,446	4,218E-04	42,769	4,724	0,001	3,441E-06	1,780E-07
3	0,045	1683,160	2,120	0,000	0,001	0,000	1,994	1,189	2,372	2,708	1,850E-04	66,996	3,976	0,000	1,097E-05	3,412E-08
4	-0,011	-2105,389	3,277	0,001	0,004	0,000	2,524	1,286	3,247	3,848	5,138E-04	78,394	6,372	0,001	-2,438E-05	2,634E-07
5	0,066	1357,182	2,665	0,000	0,002	0,000	2,088	1,294	2,702	3,297	3,185E-04	31,368	4,359	0,001	2,341E-05	1,009E-07
6	-0,003	21903,437	2,032	0,000	0,003	0,000	1,887	1,166	2,201	2,471	4,604E-04	38,269	3,561	0,001	2,102E-06	2,120E-07
7	0,366	-7100,341	2,150	0,000	0,000	0,000	2,051	1,174	2,409	2,714	1,126E-04	8,873	4,207	0,000	-1,585E-06	1,267E-08
8	-0,194	-1745,863	2,922	0,000	0,002	0,000	2,591	1,238	3,208	3,725	3,185E-04	41,846	6,715	0,001	-1,822E-05	1,011E-07
9	-0,024	-374,787	2,261	0,001	0,005	0,000	1,987	1,232	2,449	2,872	5,348E-04	63,945	3,948	0,001	-1,379E-04	2,671E-07
10	-0,100	-145,265	1,735	0,001	0,019	0,000	1,730	1,284	2,221	2,763	1,066E-03	17,368	2,994	0,002	-6,047E-04	7,716E-07
11	0,189	1349,797	3,234	0,000	0,001	0,000	2,423	1,374	3,329	4,279	1,927E-04	66,726	5,869	0,000	1,424E-05	3,694E-08
12	0,150	15514,788	3,508	0,000	0,001	0,000	2,504	1,363	3,412	4,258	2,976E-04	58,559	6,268	0,001	1,918E-06	8,857E-08
13	-0,341	-1838,257	3,224	0,000	0,001	0,000	2,404	1,384	3,329	4,318	2,444E-04	89,293	5,780	0,001	-1,328E-05	5,956E-08
14	0,042	785,533	2,834	0,000	0,001	0,000	2,164	1,327	2,873	3,593	1,940E-04	64,213	4,685	0,000	2,450E-05	3,704E-08
15	-0,369	-589,643	2,707	0,000	0,001	0,000	2,272	1,352	3,072	4,027	1,827E-04	69,446	5,162	0,000	-3,054E-05	3,244E-08
16	-0,071	-1056,663	2,492	0,000	0,002	0,000	2,225	1,207	2,687	3,069	3,502E-04	64,469	4,952	0,001	-3,300E-05	1,216E-07
17	-0,256	-519,018	8,892	0,001	0,016	0,169	3,945	2,432	9,593	25,670	9,805E-04	2,107	15,560	0,004	-1,855E-04	9,271E-07
18	-0,016	-6050,540	1,637	0,000	0,001	0,000	1,659	1,128	1,872	2,069	2,885E-04	68,094	2,753	0,000	-4,768E-06	8,322E-08
19	0,231	-540,713	1,528	0,000	0,003	0,000	1,499	1,103	1,653	1,799	4,266E-04	76,437	2,246	0,001	-7,758E-05	1,760E-07
20	-0,020	8897,177	2,524	0,000	0,002	0,000	2,164	1,275	2,759	3,355	3,390E-04	54,792	4,681	0,001	3,810E-06	1,149E-07

IMF- (N-1)

11411 (1	v ±)															
Рç	Sk (a)	Cv (b)	Kv (c)	σ (d)	En (e)	Enp (f)	Fc (g)	Sf (h)	Fi (i)	Mi (j)	RMS (k)	SNR (I)	PAPR (m)	Pk (n)	μ (0)	Var (p)
1	-0,255	651,683	1,495	0,000	0,002	0,000	1,396	1,090	1,521	1,634	3,264E-04	18,932	1,948	0,000	4,951E-05	1,041E-07
2	-0,078	-1043,253	2,000	0,000	0,001	0,000	1,854	1,177	2,181	2,463	2,116E-04	62,596	3,436	0,000	-2,019E-05	4,436E-08
3	-0,097	-3436,700	1,660	0,000	0,000	0,000	1,751	1,124	1,969	2,165	1,214E-04	72,171	3,067	0,000	-3,531E-06	1,473E-08
4	0,365	-397,696	1,961	0,000	0,000	0,000	1,591	1,173	1,867	2,161	1,681E-04	76,148	2,530	0,000	-4,100E-05	2,659E-08
5	-0,326	-794,266	2,785	0,000	0,001	0,000	2,166	1,381	2,992	4,057	2,546E-04	72,454	4,692	0,001	-3,180E-05	6,381E-08
6	0,075	-1375,926	1,568	0,000	0,001	0,000	1,497	1,124	1,682	1,857	2,200E-04	17,709	2,240	0,000	-1,595E-05	4,814E-08
7	-0,018	-9290,070	1,745	0,000	0,000	0,000	1,724	1,134	1,955	2,160	1,075E-04	9,073	2,972	0,000	-1,157E-06	1,156E-08
8	-0,122	6185,811	2,014	0,000	0,001	0,000	1,995	1,161	2,316	2,593	2,872E-04	49,862	3,979	0,001	4,642E-06	8,247E-08
9	0,197	-661,507	1,522	0,000	0,000	0,000	1,521	1,103	1,677	1,823	1,543E-04	14,714	2,312	0,000	-2,307E-05	2,328E-08
10	-0,769	192,044	2,152	0,000	0,001	0,000	1,379	1,088	1,500	1,612	2,320E-04	10,358	1,902	0,000	1,072E-04	4,236E-08
11	0,032	11939,763	2,846	0,000	0,001	0,000	2,234	1,342	2,999	3,974	2,555E-04	21,429	4,992	0,001	2,140E-06	6,528E-08
12	-0,064	-1433,930	2,164	0,000	0,002	0,000	2,033	1,182	2,404	2,720	3,380E-04	76,884	4,135	0,001	-2,351E-05	1,137E-07
13	-0,486	305,714	1,670	0,000	0,001	0,000	1,330	1,089	1,448	1,562	2,023E-04	2,498	1,768	0,000	6,290E-05	3,698E-08
14	0,223	-471,410	1,644	0,000	0,001	0,000	1,530	1,122	1,717	1,889	2,849E-04	4,532	2,342	0,000	-5,912E-05	7,768E-08
15	-0,805	204,286	2,514	0,000	0,000	0,000	1,531	1,119	1,712	1,870	1,332E-04	13,678	2,343	0,000	5,856E-05	1,431E-08
16	-0,395	-299,309	1,763	0,000	0,001	0,000	1,884	1,229	2,315	2,702	2,717E-04	11,154	3,551	0,001	-8,609E-05	6,640E-08
17	1,522	40,023	4,165	0,015	28,563	2,963	2,008	1,077	2,163	2,236	4,160E-02	5,735	4,032	0,084	3,863E-02	2,390E-04
18	0,207	-1636,215	1,503	0,000	0,000	0,000	1,586	1,095	1,736	1,874	8,278E-05	21,628	2,514	0,000	-5,050E-06	6,827E-09
19	0,017	-1067,329	1,562	0,001	0,005	0,000	1,570	1,119	1,757	1,931	5,557E-04	-9,319	2,465	0,001	-5,184E-05	3,061E-07
20	-0,220	620,983	1,746	0,000	0,002	0,000	1,600	1,138	1,820	2,027	3,346E-04	74,747	2,559	0,001	5,320E-05	1,091E-07
	1	1	1		•	1	1	1	1		1	1			1	

Tabela E.3. Resultado dos recursos estatísticos no domínio da frequência para as IMFs de alta frequência

IMF-1					
Pç	Pse (a)	Cgf (b)	Kf (c)	RMSf (d)	Vf (e)
1	8,955	561,364	11,219	601,873	2,252
2	9,136	489,108	6,813	544,141	1,641
3	9,198	456,896	8,054	502,857	1,416
4	9,078	478,324	16,793	507,417	1,994
5	9,156	484,163	3,429	534,793	1,085
6	9,120	498,777	15,623	546,060	1,662
7	9,224	452,906	5,097	501,207	1,312
8	9,191	488,778	4,851	533,083	1,544
9	9,151	413,364	8,986	458,162	1,529
10	9,218	448,203	3,151	498,135	1,250
11	9,173	444,339	7,289	485,332	1,360
12	9,156	488,692	4,139	535,984	1,308
13	9,177	392,816	11,250	435,525	1,576
14	9,133	470,834	8,716	517,874	1,542
15	9,167	423,037	8,009	465,949	1,260
16	9,195	436,272	5,999	481,407	1,306
17	9,245	445,763	6,028	495,867	1,545
18	9,224	484,101	4,614	510,972	1,553
19	9,173	440,166	10,705	479,988	1,471
20	9,230	415,661	10,964	458,950	1,454

IMF-	(N-6)				
Pç	Pse (a)	Cgf (b)	Kf (c)	RMSf (d)	Vf (e)
1	3,092	4,723	250,783	5,152	212,178
2	4,063	12,887	141,915	13,389	110,686
3	3,586	6,609	176,751	7,092	167,515
4	2,940	4,597	273,673	4,874	293,972
5	2,828	3,961	345,706	4,200	446,254
6	3,431	6,523	234,742	6,611	197,907
7	3,256	4,731	266,047	5,358	199,915
8	3,730	11,629	90,581	12,036	89,273
9	2,938	3,119	369,127	3,210	355,784
10	3,484	7,575	273,050	7,819	317,551
11	2,696	6,189	307,319	6,482	179,247
12	2,951	6,520	238,943	6,722	234,874
13	3,355	6,462	178,284	6,585	217,891
14	2,627	2,817	540,731	2,967	525,865
15	3,088	5,006	288,496	5,413	185,217
16	3,100	4,860	409,041	5,020	340,294
17	6,358	72,552	23,687	76,313	18,437
18	3,298	6,248	198,395	6,710	194,787
19	2,505	2,988	582,153	3,404	412,502
20	3,107	7,884	167,020	8,177	121,508

IMF-2

11411 2	i	1			i
Pç	Pse (a)	Cgf (b)	Kf (c)	RMSf (d)	Vf (e)
1	8,612	297,967	8,089	322,808	2,735
2	8,311	253,708	11,062	274,107	4,372
3	8,247	216,779	6,623	236,055	4,351
4	8,419	251,890	10,518	269,087	4,237
5	8,388	254,799	7,519	274,236	3,507
6	8,338	256,348	41,029	275,861	4,224
7	8,206	226,968	8,564	244,509	4,809
8	8,336	232,150	6,860	251,949	4,219
9	8,147	227,000	8,733	242,059	4,972
10	8,236	214,831	104,939	233,138	6,905
11	8,200	228,473	15,081	248,262	4,804
12	8,366	253,745	6,531	274,384	4,068
13	8,072	205,620	12,513	221,311	5,442
14	8,253	254,098	18,492	272,571	4,715
15	8,092	216,999	15,217	232,988	4,988
16	8,282	237,575	5,903	253,979	4,670
17	8,211	221,112	5,563	240,245	4,328
18	8,244	241,440	7,025	246,279	4,340
19	8,264	224,504	14,083	245,214	4,862
20	8,083	221,089	34,099	237,256	5,478

IMF-(N-5)

IIVIF-(IV		1	1		1
Рç	Pse (a)	Cgf (b)	Kf (c)	RMSf (d)	Vf (e)
1	2,533	2,367	818,519	2,642	723,825
2	3,161	5,687	387,197	5,995	454,367
3	2,794	3,304	606,373	3,494	299,847
4	2,502	1,877	590,950	2,549	761,381
5	2,307	2,155	434,514	2,698	352,642
6	2,725	3,320	366,123	3,502	477,863
7	2,831	2,148	611,913	2,454	425,231
8	3,107	5,757	195,549	6,128	241,553
9	2,321	1,677	402,591	2,020	431,573
10	2,801	3,665	491,885	3,813	436,604
11	2,462	2,008	574,374	2,216	473,399
12	2,771	3,105	503,041	3,328	419,634
13	2,652	3,341	529,392	3,364	604,744
14	2,211	1,451	918,043	1,618	1142,606
15	2,464	2,386	295,725	2,615	261,128
16	2,411	2,478	395,415	2,683	386,784
17	5,612	40,092	36,050	42,827	34,416
18	2,624	2,988	407,135	3,186	322,853
19	2,195	1,467	834,489	1,785	850,386
20	2,790	4,086	202,145	4,290	224,848

IMF-3

IIVIT-3					
Pç	Pse (a)	Cgf (b)	Kf (c)	RMSf (d)	Vf (e)
1	7,678	161,354	12,785	173,481	5,801
2	7,296	141,394	134,546	151,508	18,065
3	7,295	124,972	24,614	132,416	10,787
4	7,359	140,478	13,744	148,176	10,598
5	7,297	139,718	26,292	149,541	8,585
6	7,429	150,894	101,369	160,995	9,005
7	7,205	121,167	46,746	129,343	12,775
8	7,189	126,446	11,011	137,093	9,486
9	7,245	135,178	25,195	141,952	11,345
10	7,151	129,011	435,237	135,704	40,645
11	7,417	149,922	82,048	159,524	10,664
12	7,414	137,950	11,447	149,480	8,751
13	7,135	127,879	81,887	134,238	18,846
14	7,326	145,780	29,438	154,384	10,272
15	7,171	128,178	52,578	135,373	12,418
16	7,312	129,139	24,338	139,500	9,951
17	7,256	127,333	11,971	135,778	8,713
18	7,372	142,485	12,356	141,029	9,405
19	7,229	133,664	48,775	147,290	23,967
20	7,140	144,593	28,630	151,830	10,272

IMF-(N-4)

11V1F-(1V-4)									
Pç	Pse (a)	Cgf (b)	Kf (c)	RMSf (d)	Vf (e)				
1	2,171	1,193	787,468	1,652	1201,414				
2	2,210	2,711	503,048	2,893	517,159				
3	2,207	1,739	427,122	2,137	816,580				
4	2,220	1,479	786,599	1,726	902,259				
5	1,913	0,893	622,099	1,581	510,743				
6	2,201	1,441	531,802	1,872	638,891				
7	2,052	1,108	840,894	1,664	865,729				
8	2,650	2,849	250,222	3,228	401,499				
9	1,904	0,938	1070,537	1,413	1614,571				
10	2,218	1,676	459,695	2,120	535,061				
11	2,304	1,079	480,819	1,530	504,460				
12	1,986	1,779	777,364	2,009	928,647				
13	1,902	1,156	854,738	1,371	863,584				
14	2,445	1,019	1369,035	1,351	1758,759				
15	1,931	0,876	559,072	1,263	747,945				
16	2,085	1,406	695,767	1,842	916,230				
17	4,743	20,683	111,117	22,829	90,327				
18	2,037	1,848	1054,600	2,133	952,328				
19	2,277	0,936	1265,000	1,414	2973,535				
20	2,418	2,488	499,516	2,723	785,356				

IMF-4

Pç	Pse (a)	Cgf (b)	Kf (c)	RMSf (d)	Vf (e)
1	6,757	96,817	259,010	102,784	29,708
2	6,347	78,274	648,047	82,041	115,892
3	6,336	72,430	58,470	75,790	18,606
4	6,682	82,589	20,121	87,937	17,549
5	6,408	80,328	156,212	85,261	15,584
6	6,787	85,490	151,968	92,122	15,752
7	6,016	64,564	588,024	67,655	89,106
8	6,474	71,027	34,716	76,509	16,261
9	6,589	83,783	37,841	88,084	19,887
10	6,319	73,729	327,882	77,648	46,785
11	6,731	92,207	35,792	98,981	14,044
12	6,466	76,231	247,425	81,392	17,656
13	6,209	69,322	391,997	73,615	66,444
14	6,525	85,614	150,114	89,919	21,993
15	6,065	70,831	698,093	73,747	41,787
16	6,376	71,323	416,075	75,398	49,965
17	6,358	72,552	23,687	76,313	18,437
18	6,536	78,204	19,343	79,698	16,226
19	6,468	78,257	121,528	85,492	63,664
20	6,507	84,252	211,548	89,207	18,903

IMF-(N-3)

•	Pç Pse (a)		Kf (c)	RMSf (d)	Vf (e)
ıţ	1 se (a)	Cgf (b)	Ki (t)	KWISI (u)	V1 (E)
1	2,303	0,708	1349,100	1,305	2167,611
2	1,927	1,180	507,658	1,700	572,510
3	2,596	0,870	1315,589	1,322	2143,413
4	2,429	0,653	920,893	1,253	1734,151
5	2,254	0,546	1088,156	1,024	1817,732
6	2,261	0,787	1024,712	1,192	1219,798
7	2,097	0,544	1068,585	1,170	1969,868
8	2,103	1,519	759,954	1,792	832,288
9	2,049	0,668	1300,945	1,267	4345,002
10	1,669	0,764	953,985	1,325	1227,258
11	2,226	0,663	1101,531	0,913	2043,437
12	2,678	0,881	1297,495	1,278	1800,876
13	2,197	0,638	996,634	1,074	2387,067
14	2,057	0,498	1298,076	1,147	2574,938
15	2,136	0,775	1267,410	1,064	2177,002
16	2,216	0,825	1097,357	1,387	1090,469
17	4,015	11,613	120,707	12,639	128,710
18	2,018	0,872	611,501	1,382	719,462
19	1,831	0,415	1305,715	1,199	3286,777
20	2,006	0,957	940,309	1,540	1070,994

IMF-5

D-	D (-)	C- c (b)	176 (-)	RMSf	V/F (-)
Pç	Pse (a)	Cgf (b)	Kf (c)	(d)	Vf (e)
1	6,007	59,479	581,915	62,491	59,731
2	5,265	42,084	796,092	44,129	187,079
3	5,595	35,073	752,199	37,018	51,626
4	5,697	42,977	213,371	45,869	36,231
5	5,883	50,256	31,443	54,433	23,471
6	5,911	46,016	649,250	49,218	48,831
7	5,243	33,798	891,366	35,698	176,603
8	5,570	39,486	89,532	42,129	37,178
9	5,586	36,775	871,988	39,108	235,237
10	5,451	40,779	573,607	42,915	77,006
11	6,003	49,748	128,079	55,567	20,901
12	5,367	39,519	590,675	41,176	46,155
13	5,182	34,777	973,972	36,946	461,066
14	5,721	48,930	48,820	51,561	32,058
15	5,524	39,720	404,197	41,615	31,853
16	5,261	39,290	594,677	40,887	70,305
17	5,612	40,092	36,050	42,827	34,416
18	5,617	40,843	67,550	41,269	33,289
19	4,866	37,016	1276,580	39,372	840,034
20	5,480	37,790	943,778	40,109	126,685

IMF-(N-2)

				1 1	
Рç	Pse (a)	Cgf (b)	Kf (c)	RMSf (d)	Vf (e)
1	1,515	0,548	1147,025	1,001	2213,106
2	2,260	0,748	1184,735	1,031	1807,322
3	2,090	0,662	1157,755	0,927	2411,593
4	1,552	0,669	1592,411	1,041	3150,960
5	1,638	0,341	1455,807	0,996	2823,973
6	1,820	0,650	1391,913	1,138	1913,233
7	1,561	0,329	1212,485	1,050	2210,089
8	2,082	1,073	1125,319	1,376	880,823
9	1,253	0,226	1021,191	0,922	3184,200
10	1,290	0,148	1186,973	0,982	1802,837
11	1,603	0,458	1403,595	1,084	2987,513
12	1,872	0,730	1709,139	0,949	2369,603
13	1,395	0,388	1022,820	1,085	2950,811
14	1,530	0,308	1167,954	0,929	3098,272
15	1,426	0,267	1036,053	0,809	1570,331
16	1,423	0,363	1484,306	1,097	4239,351
17	2,373	0,956	1080,295	1,334	1055,248
18	1,534	0,322	1455,605	0,998	3109,770
19	1,220	0,191	1053,346	0,997	3991,579
20	2,045	0,731	958,009	1,210	2525,211

IMF-6

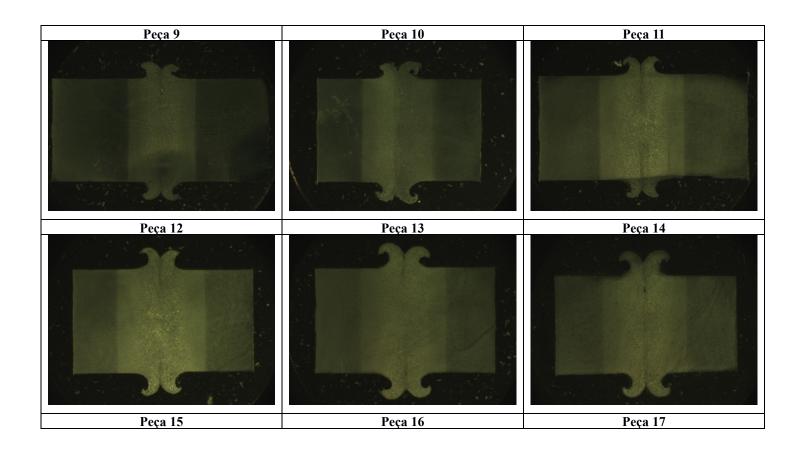
IIVIT-0					
Pç	Pse (a)	Cgf (b)	Kf (c)	RMSf (d)	Vf (e)
1	5,231	32,205	763,073	34,022	140,015
2	4,799	25,356	78,457	27,102	56,455
3	4,862	25,875	124,309	26,565	60,539
4	5,015	25,638	103,488	27,439	57,165
5	5,022	26,553	375,394	28,507	76,617
6	5,244	28,727	203,723	30,065	50,431
7	4,665	21,424	68,639	22,541	60,656
8	4,686	21,182	64,455	22,979	60,967
9	4,812	26,501	567,116	27,544	151,014
10	4,802	25,358	60,346	26,392	61,904
11	4,813	28,868	780,275	30,823	171,718
12	4,725	21,128	190,793	22,379	107,692
13	4,755	25,321	227,727	25,753	123,831
14	4,962	28,868	64,857	30,481	50,498
15	4,904	23,718	72,912	25,022	46,326
16	4,722	20,191	219,885	21,585	74,875
17	4,743	20,683	111,117	22,829	90,327
18	4,863	21,397	98,621	21,386	69,591
19	4,819	25,365	91,894	26,363	84,612
20	4,658	27,075	671,079	28,042	104,133

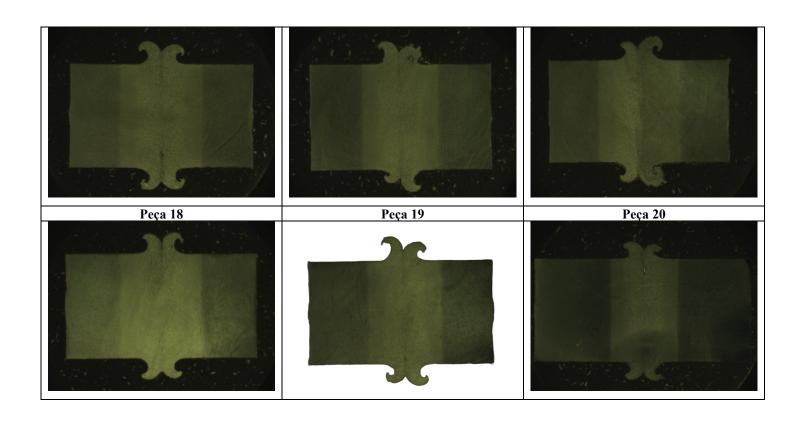
IMF-(N-1)

IIVIF-(IV	I-T)				
Pç	Pse (a)	Cgf (b)	Kf (c)	RMSf (d)	Vf (e)
1	0,765	0,129	1137,044	0,929	3925,295
2	1,365	0,291	1212,933	1,002	3235,116
3	1,335	0,593	1189,924	1,042	4772,391
4	1,087	0,255	1071,930	1,005	3823,403
5	1,349	0,321	1034,932	0,965	3353,691
6	0,953	0,288	1091,721	0,964	3703,327
7	1,165	0,231	1028,174	1,050	4497,367
8	1,737	0,387	1467,456	1,199	3160,928
9	1,057	0,340	1049,605	0,973	3933,121
10	0,799	0,097	1125,359	0,895	3862,279
11	1,343	0,425	1080,747	1,095	3711,293
12	1,119	0,260	1023,890	1,050	4084,095
13	0,817	0,093	1170,415	0,975	5108,472
14	1,039	0,264	1060,187	0,937	3988,231
15	0,796	0,119	1055,805	0,927	3843,822
16	0,734	0,160	1255,539	0,959	6180,853
17	0,265	0,051	1358,005	0,993	5411,128
18	1,010	0,347	1026,870	0,943	4403,216
19	0,783	0,103	1185,901	0,977	4247,137
20	1,500	0,280	1237,859	0,949	4216,970

APENDICE F

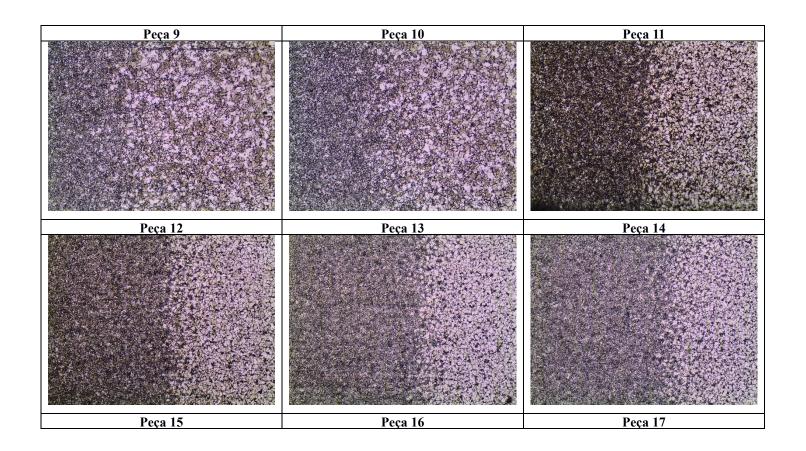
Macroestrutura.

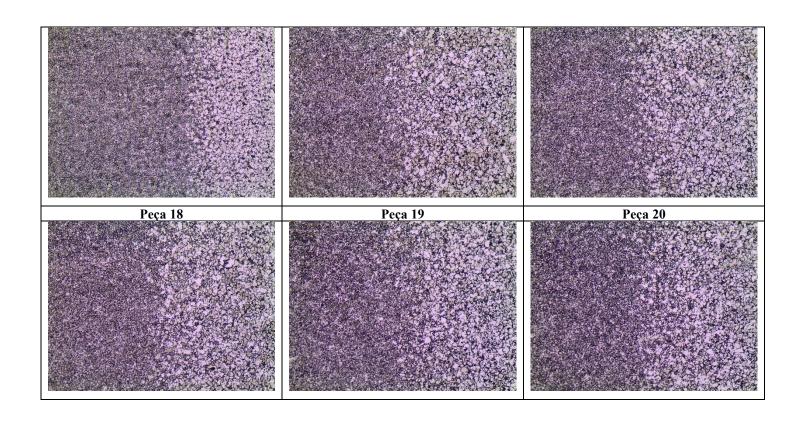




APENDICE G

Micrografias de seção transversal de microestruturas.





APENDICE HValor *pvalue* do teste DF para todas IMFs

									Ехре	rimento										
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
IMF-1	0,001	0,012	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001
IMF-2	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001
IMF-3	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001
IMF-4	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001
IMF-5	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001
IMF-6	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001
IMF-7	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001
IMF-8	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001
IMF-9	0,006	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001
IMF-10	0,137	0,001	0,001	0,015	0,047	0,001	0,037	0,001	0,002	0,996	0,002	0,996	0,030	0,047	0,001	0,037	0,001	0,001	0,002	0,996
IMF-11	0,320	0,001	0,198	0,280	0,290	0,061	0,241	0,108	0,046	0,338	0,046	0,338	0,191	0,290	0,061	0,241	0,001	0,108	0,046	0,338
IMF-12	0,481	0,001	0,521	0,447	0,417	0,182	0,410	0,248	0,205	0,488	0,205	0,488	0,376	0,417	0,182	0,410	0,001	0,248	0,205	0,488
IMF-13	0,535	0,080	0,422	0,564	0,485	0,345	0,990	0,350	0,468	0,516	0,468	0,516	0,474	0,485	0,345	0,990	0,001	0,350	0,468	0,516
IMF-14	0,260	0,266	0,348	0,562	0,221	0,459	0,999	0,549	0,549	0,542	0,549	0,542	0,132	0,221	0,459	0,999	0,001	0,549	0,549	0,542
IMF-15	0,999	0,171	0,595	0,999	0,999	0,548	0,001	0,592	0,608	0,596	0,608	0,596	0,590	0,999	0,548	0,001		0,592	0,608	0,596
IMF-16	0,001	0,489	0,144	0,001	0,001	0,001	0,999	0,483	0,001	0,307	0,001	0,307	0,001	0,001	0,001	0,999		0,483	0,001	0,307
IMF-17	0,999	0,330	0,001	0,999	0,999	0,001		0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,100	0,999	0,001			0,001	0,001	0,001
IMF-18		0,001	0,001			0,999		0,999	0,999	0,001	0,999	0,001	0,999		0,999			0,999	0,999	0,001
IMF-19		0,999	0,999							0,999		0,999			0,999			0,999		0,999

estationário não estacionário

APENDICE I

Matriz de correlação.

IMF2

							Heatma	p da Matı	riz de Coı	relação							
Sk		0.31	0.87	-0.3	-0.33	-0.33	0.78	0.47	0.8	0.79	-0.3	-0.42	0.84	0.26	0.31	-0.33	
Cv	0.31		0.03	-0.35	-0.35	-0.26	-0.21	-0.19	-0.19	-0.21	-0.35	-0.54	-0.11	-0.57	0.21	-0.35	
Kv	0.87	0.03	1	-0.11	-0.17	-0.16	0.89	0.58	0.93	0.92	-0.11	-0.26	0.97	0.56	0.26	-0.17	
σ	-0.3	-0.35	-0.11	1	0.95	0.91	-0.07	0.39	-0.04	-0		-0.01	-0.12	0.62	-0.09	0.95	
En	-0.33	-0.35	-0.17	0.95		0.77		0.33	-0.1	-0.07	0.95	-0.07	-0.18	0.56	-0.1	1	
Enp	-0.33	-0.26	-0.16	0.91	0.77		-0.07	0.27	-0.06	-0.03	0.91	0.05	-0.14	0.54		0.77	- 0
Fc	0.78	-0.21	0.89	-0.07		-0.07		0.55	0.99	0.99	-0.07	-0.02	0.97	0.69	0.18	-0.13	
Sf	0.47	-0.19	0.58	0.39	0.33	0.27	0.55		0.63	0.67	0.39	-0.05	0.55	0.66	0.26	0.33	
Fi	8.0	-0.19	0.93	-0.04	-0.1	-0.06	0.99	0.63			-0.04	-0.06	0.99	0.71	0.21	-0.1	
Mi	0.79	-0.21	0.92	-0	-0.07	-0.03	0.99				-0	-0.06	0.98	0.73	0.21	-0.07	
RMS	-0.3	-0.35	-0.11	1	0.95	0.91	-0.07	0.39	-0.04	-0		-0.01	-0.12	0.62	-0.09	0.95	- 0
SNR	-0.42	-0.54	-0.26	-0.01	-0.07	0.05	-0.02	-0.05	-0.06	-0.06	-0.01		-0.13	0.09	0.01	-0.07	
PAPR	0.84	-0.11	0.97	-0.12	-0.18	-0.14	0.97	0.55	0.99	0.98	-0.12	-0.13	1	0.63	0.23	-0.18	
Pk	0.26	-0.57	0.56	0.62	0.56	0.54	0.69		0.71	0.73	0.62	0.09	0.63		0.05	0.56	
μ	0.31	0.21	0.26	-0.09	-0.1		0.18	0.26	0.21	0.21	-0.09	0.01	0.23	0.05	1	-0.1	
Var	-0.33	-0.35	-0.17	0.95		0.77		0.33	-0.1	-0.07	0.95	-0.07	-0.18	0.56	-0.1	1	-
	Sk	Cv	Kv	σ	En	Enp	Fc	Sf	Fi	Mi	RMS	SNR	PAPR	Pk	μ	Var	

IMF3

							Heatma	p da Mat	riz de Coı	relação							
Sk		0.3	0.38	0.05	0.18	-0.07	0.31	0.42	0.37	0.41	0.05	-0.08	0.34	0.31	0.5	0.18	
Cv	0.3		0.06	-0.67	-0.51	-0.76	0.04	-0.19	0.03	0.02	-0.67	-0.23	0.11	-0.25	0.37	-0.51	
Kv	0.38	0.06	1	0.21	0.25	0.1	0.95	0.69	0.98	0.97	0.21	-0.1	0.97	0.73	0.19	0.25	
σ	0.05	-0.67	0.21	1	0.93	0.93	0.21	0.46	0.28	0.32	1	0.01	0.17	0.75	0.09	0.93	
En	0.18	-0.51	0.25	0.93		0.75	0.23	0.48	0.31	0.36	0.93	-0.05	0.21	0.79	0.13	1	
Enp	-0.07	-0.76	0.1	0.93	0.75		0.14	0.28	0.16	0.18	0.93	0.03	0.08	0.56	0.06	0.75	
Fc	0.31	0.04	0.95	0.21	0.23	0.14		0.54	0.99	0.96	0.21	-0.19	0.99	0.73	0.21	0.23	
Sf	0.42	-0.19	0.69	0.46	0.48	0.28	0.54		0.66	0.73	0.46	0.12	0.54	0.7	0.15	0.48	أبا
Fi	0.37	0.03	0.98	0.28	0.31	0.16	0.99	0.66		0.99	0.28	-0.18	0.98	0.79	0.22	0.31	
Mi	0.41	0.02	0.97	0.32	0.36	0.18	0.96	0.73	0.99		0.32	-0.17	0.96	0.83	0.24	0.36	
RMS	0.05	-0.67	0.21	1	0.93	0.93	0.21	0.46	0.28	0.32	1	0.01	0.17	0.75	0.09	0.93	
SNR	-0.08	-0.23	-0.1	0.01	-0.05	0.03	-0.19	0.12	-0.18	-0.17	0.01	1	-0.19	-0.2	-0.43	-0.05	
PAPR	0.34	0.11	0.97	0.17	0.21	0.08	0.99	0.54	0.98	0.96	0.17	-0.19		0.71	0.21	0.21	
Pk	0.31	-0.25	0.73	0.75	0.79	0.56	0.73	0.7	0.79	0.83	0.75	-0.2	0.71		0.28	0.79	
μ	0.5	0.37	0.19	0.09	0.13	0.06	0.21	0.15	0.22	0.24	0.09	-0.43	0.21	0.28	1	0.13	
Var	0.18	-0.51	0.25	0.93		0.75	0.23	0.48	0.31	0.36	0.93	-0.05	0.21	0.79	0.13	1	
	Sk	Cv	Kv	σ	En	Enp	Fc	Sf	Fi	Mi	RMS	SNR	PAPR	Pk	μ	Var	

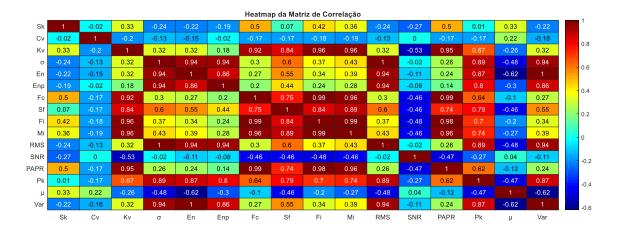
IMF4

							Heatma	p da Mat	riz de Cor	relação								
Sk		0.06	-0.42	0.32	0.38	0.28	-0.36	-0.08	-0.35	-0.32	0.32	0.03	-0.35	0.06	0.62	0.38		ľ
Cv	0.06		-0.15	0.1	-0	0.09	-0.11	0.01	-0.11	-0.11	0.1	0.53	-0.14	-0.03	0.13	-0		ı
Κv	-0.42	-0.15		-0.11	-0.14	-0.15	0.92	0.6	0.96	0.96	-0.11	-0.18	0.93	0.47	-0.2	-0.14	t	0
σ	0.32	0.1	-0.11		0.93	0.92	-0.25	0.49	-0.16	-0.08		0.02	-0.28	0.74	0.33	0.93		
En	0.38	-0	-0.14	0.93		0.73	-0.31	0.51	-0.21	-0.12	0.93	-0.05	-0.32	0.65	0.43	1	-	0
Enp	0.28	0.09	-0.15	0.92	0.73		-0.22	0.3	-0.16	-0.12	0.92	0.01	-0.25	0.68	0.2	0.73		
Fc	-0.36	-0.11	0.92	-0.25	-0.31	-0.22	1	0.37	0.99	0.96	-0.25	-0.29	0.99	0.4	-0.19	-0.31		0
Sf	-0.08	0.01	0.6	0.49	0.51	0.3	0.37		0.52	0.62	0.49	0.06	0.36	0.74	0.17	0.51		
Fi	-0.35	-0.11	0.96	-0.16	-0.21	-0.16	0.99	0.52	1	0.99	-0.16	-0.26	0.98	0.49	-0.16	-0.21		0
Mi	-0.32	-0.11	0.96	-0.08	-0.12	-0.12	0.96	0.62	0.99		-0.08	-0.24	0.95	0.56	-0.11	-0.12		U
RMS	0.32	0.1	-0.11		0.93	0.92	-0.25	0.49	-0.16	-0.08		0.02	-0.28	0.74	0.33	0.93		
SNR	0.03	0.53	-0.18	0.02	-0.05	0.01	-0.29	0.06	-0.26	-0.24	0.02		-0.28	-0.26	0.1	-0.05	1	0
PAPR	-0.35	-0.14	0.93	-0.28	-0.32	-0.25	0.99	0.36	0.98	0.95	-0.28	-0.28		0.36	-0.2	-0.32		
Pk	0.06		0.47	0.74	0.65	0.68	0.4	0.74	0.49	0.56	0.74	-0.26	0.36	1	0.19	0.65	-	-
μ	0.62	0.13	-0.2	0.33	0.43	0.2	-0.19	0.17	-0.16	-0.11	0.33	0.1	-0.2	0.19		0.43		l
Var	0.38	-0	-0.14	0.93	1	0.73	-0.31	0.51	-0.21	-0.12	0.93	-0.05	-0.32	0.65	0.43	1		
	Sk	Cv	Kv	σ	En	Enp	Fc	Sf	Fi	Mi	RMS	SNR	PAPR	Pk	μ	Var		

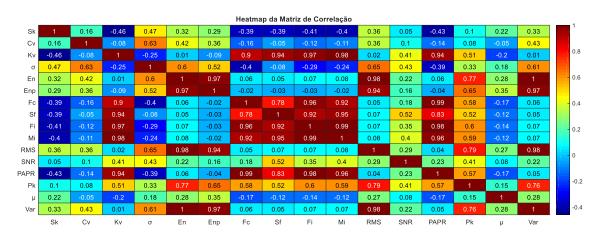
IMF5

							Heatma	p da Matı	riz de Coı	relação							4
Sk			0.48	0.02	-0.04	0.04	0.43	0.21	0.42	0.41	0.02	-0.07	0.43	0.34	0.15	-0.04	'
Cv			-0.22	-0.28	-0.1	-0.43	-0.18	-0.21	-0.19	-0.18	-0.28	-0.12	-0.16	-0.24	0.21	-0.1	0.8
Κv	0.48	-0.22		-0.02	-0.08	-0.06	0.94	0.64	0.97	0.97	-0.02	-0.38	0.93	0.64	0.23	-0.08	0.8
σ	0.02	-0.28	-0.02		0.94	0.92	-0.18	0.53	-0.1	-0.05		0.42	-0.22	0.63	-0.42	0.94	- 0.6
En	-0.04	-0.1	-0.08	0.94		0.79	-0.26	0.48	-0.18	-0.13	0.94	0.37	-0.29	0.55	-0.46	1	0.6
Enp	0.04	-0.43	-0.06	0.92	0.79		-0.17	0.41	-0.11	-0.07	0.92	0.39	-0.22	0.6	-0.27	0.79	- 0.4
Fc	0.43	-0.18	0.94	-0.18	-0.26		1	0.4	0.99	0.97	-0.18	-0.34	0.99	0.56	0.22	-0.26	0.4
Sf	0.21	-0.21	0.64	0.53	0.48	0.41	0.4	1	0.52	0.59	0.53	-0.26	0.36	0.76	0.11	0.48	- 0.2
Fi	0.42	-0.19	0.97	-0.1	-0.18	-0.11	0.99	0.52			-0.1	-0.36	0.98	0.63	0.23	-0.18	0.2
Mi	0.41	-0.18	0.97	-0.05	-0.13	-0.07	0.97	0.59		1	-0.05	-0.35	0.96	0.68	0.22	-0.13	-0
RMS	0.02	-0.28	-0.02	1	0.94	0.92	-0.18	0.53	-0.1	-0.05	1	0.42	-0.22	0.63	-0.42	0.94	0
SNR	-0.07	-0.12	-0.38	0.42	0.37	0.39	-0.34	-0.26	-0.36	-0.35	0.42	1	-0.31	-0.05	-0.6	0.37	-0.2
PAPR	0.43	-0.16	0.93	-0.22	-0.29	-0.22	0.99	0.36	0.98	0.96	-0.22	-0.31		0.51	0.22	-0.29	*0.2
Pk	0.34	-0.24	0.64	0.63	0.55	0.6	0.56	0.76	0.63	0.68	0.63	-0.05	0.51	1	-0.09	0.55	-0.4
μ	0.15	0.21	0.23	-0.42	-0.46	-0.27	0.22	0.11	0.23	0.22	-0.42	-0.6	0.22	-0.09		-0.46	-0.4
Var	-0.04	-0.1	-0.08	0.94	1	0.79	-0.26	0.48	-0.18	-0.13	0.94	0.37	-0.29	0.55	-0.46	1	-0.6
	Sk	Cv	Kv	σ	En	Enp	Fc	Sf	Fi	Mi	RMS	SNR	PAPR	Pk	μ	Var	-0.0

IMF6



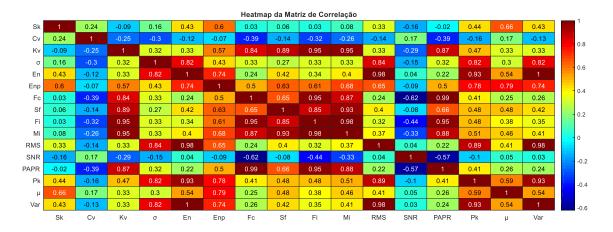
IMF (n-6)



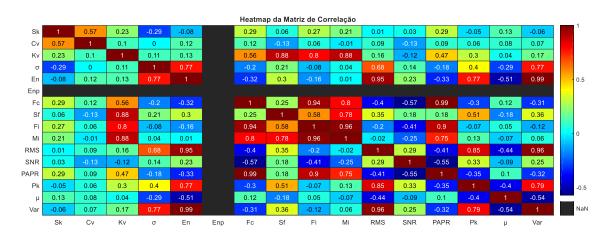
IMF (n-5)



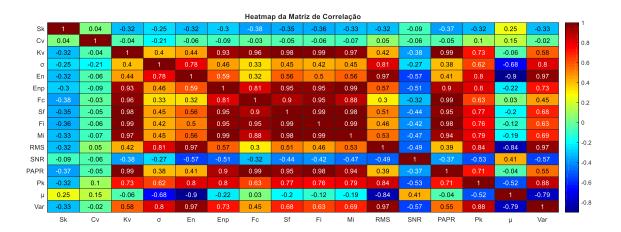
IMF (n-4)



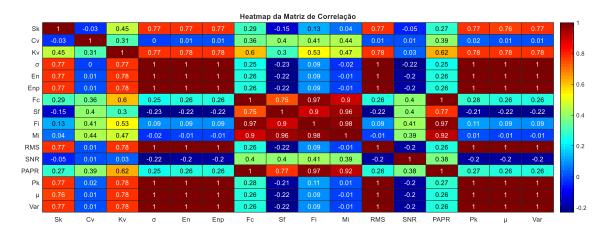
IMF (n-3)



IMF (n-2)



IMF (n-1)



APENDICE J

Valores estimados de *pvalue* para os recursos estatísticos para diferentes IMFs.

IMF1														
		P-Value		P-Value		P-Value		P-Value		P-Value		P-Value		P-Value
n		0,017		0,002		0,039		0,999		0,044		0,043		0,008
Pf	Sk (a)	0,995	Kv (c)	0	En (e)	0,021	PAPR (m)	0,029	Pk (n)	0,056	Var (p)	0,021	Vf (e)	0,006
Tf		0,022		0,001		0,016		0,79		0,064		0,016		0,109
Tn		0,118		0.001		0.057		0.105		0,174		0.057		0.014

IMF2												
		P-Value		P-Value		P-Value		P-Value		P-Value		P-Value
n		0,004		0,155		0,001		0,999		0,133		0,016
Pf	Sk (a)	0,477	Cv (b)	0,032	Kv (c)	0,001	PAPR (m)	0,029	Cgf (b)	0,083	RMSf (d)	0,009
Tf		0,018		0,13		0,001		0,79		0,222		0,024
Tn		0,165		0,032		0,002		0,105		0,03		0,002

IMF3							_	IMF4				
		P-Value		P-Value		P-Value				P-Value		P-V
n		0,648		0,648		0,01		n		0,006		0,0
Pf	En (e)	0,041	Var (p)	0,041	Kf(c)	0,004		Pf	Cv (b)	0,005	Pse (a)	0,0
Tf		0,059		0,059		0,13		Tf		0		0,0
Tn		0,55		0,55		0,13		Tn		0,001		0,

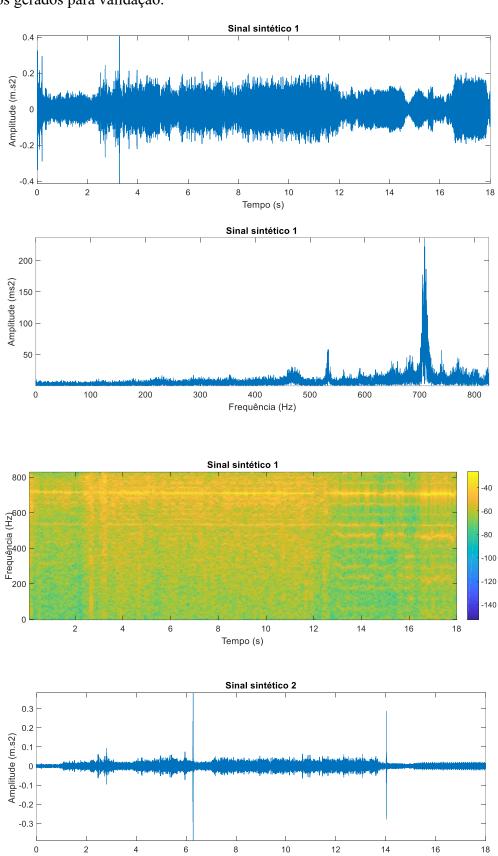
IMF5							_	IMF6				
		P-Value		P-Value		P-Value				P-Value		P-Value
n		0,124		0,017		0,468		n		0,012		0,057
Pf	Fc (g)	0,178	PAPR (m)	0,052	RMSf (d)	0,007		Pf	Vf(e)	0,304	Cv (b)	0,021
Tf		0,004		0,001		0,079		Tf		0,09		0,073
Tn		0,046		0,008		0,039		Tn		0,029		0,327

_	IMF(n-6)								
			P-Value		P-Value		P-Value		P-Value
	n		0,003		0,04		0,023		0,011
	Pf	Cv (b)	0,003	Kv(c)	0,04	Fi (i)	0,005	Mi (j)	0,003
	Tf		0,002		0,783		0,26		0,32
	Tn		0,003		0,047		0,06		0,021

111		0,003		0,017		0,00		0,021		
IMF(n-5)				IMF(n-4)				IMF(n-3)		
11011 (11-3)			_	11/11/(11-4)			_	11011 (11-3)		
		P-Value				P-Value				P-Value
n		0,102		n		0,093		n		0,312
Pf	Sk (a)	0,014		Pf	μ(o)	0,04		Pf	Cv (b)	0,55
Tf		0,007		Tf		0,04		Tf		0,048
Tn		0,066		Tn		0,161		Tn		0,028
			-				-			<u> </u>

APENDICE K

Sinais sintéticos gerados para validação.



Tempo (s)

