

PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA DE MINAS GERAIS
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica

Samuel Soares Ferreira

**AVALIAÇÃO DE SINAIS DE EMISSÃO ACÚSTICA COMO FERRAMENTA PARA
MONITORAMENTO DE DESEMPENHO NO PROCESSO DE ELETROEROSÃO**

Belo Horizonte
2025

Samuel Soares Ferreira

**AVALIAÇÃO DE SINAIS DE EMISSÃO ACÚSTICA COMO FERRAMENTA PARA
MONITORAMENTO DE DESEMPENHO NO PROCESSO DE ELETROEROSÃO**

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais, como requisito parcial para obtenção do título de Doutor em Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. Dr. Luís Henrique Andrade Maia

Coorientador: Prof. Dr. Fred Lacerda Amorim

Belo Horizonte

2025

FICHA CATALOGRÁFICA

Elaborada pela Biblioteca da Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais

F383a Ferreira, Samuel Soares
Avaliação de sinais de emissão acústica como ferramenta para monitoramento de desempenho no processo de eletroerosão / Adriano Nicholls Couto. Belo Horizonte, 2025.
140 f. : il.

Orientador: Luís Henrique Andrade Maia
Coorientador: Fred Lacerda Amorim
Tese (Doutorado) - Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais.
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica

1. Acústica. 2. Entropia (Teoria da informação). 3. Usinagem por eletroerosão. 4. Metais - Corte. 5. Processos de fabricação. 6. Processamento de sinais. 7. Eletrodos. I. Maia, Luís Henrique Andrade. II. Amorim, Fred Lacerda. III. Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica. IV. Título.

SIB PUC MINAS

CDU: 621.7

Ficha catalográfica elaborada por Fabiana Marques de Souza e Silva - CRB 6/2086

Samuel Soares Ferreira

**AVALIAÇÃO DE SINAIS DE EMISSÃO ACÚSTICA COMO FERRAMENTA PARA
MONITORAMENTO DE DESEMPENHO NO PROCESSO DE ELETROEROSÃO**

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais, como requisito parcial para obtenção do título de Doutor em Engenharia Mecânica.

Prof. Dr. Luís Henrique Andrade Maia – PUC Minas (Orientador)

Prof. Dr. Fred Lacerda Amorim – PUC Paraná (Coorientador)

Prof. Dr. Gilmar Cordeiro da Silva – PUC Minas (Banca Examinadora)

Prof. Dr. Janes Landre Júnior – PUC Minas (Banca Examinadora)

Prof. Dr. Márcio Bacci da Silva – UFU (Banca Examinadora)

Prof. Dr. Gustavo Lacerda – UFMG (Banca Examinadora)

Belo Horizonte, 13 de junho de 2025.

*A minha família por todo incentivo,
em especial minha Vovó Márcia que se dedicou para
o sucesso e realizações acadêmicas de seus netos.*

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, a Deus, por me guiar em cada passo desta jornada, concedendo-me saúde, discernimento, força e coragem para alcançar grandes conquistas.

Aos meus pais, Lúcia e Helton, por sempre acreditar em mim, incentivar a estudar, trabalhar e progredir para alcançar meus objetivos.

Aos meus avós, Ivete, Antônio e Mercês, por estarem sempre ao meu lado dando bons conselhos.

À minha irmã Sara, exemplo de integridade e competência, cuja trajetória me inspira.

Ao meu irmão Silas, companheiro fiel em todos os momentos, por sua dedicação e prontidão em sempre me ajudar.

À Iara por me apoiar, compreendendo os sacrifícios que fiz para esta realização e permanecendo presente em todos os momentos.

Aos meus Tios Luciano, Adriana e Carlos, que sem saber foram personagens dessa conquista me transmitindo entusiasmo.

Ao Prof. Dr. Luís Maia pela paciência e motivação genuína para a conclusão desta conquista.

Ao Prof. Dr. Fred Amorim por colocar-se à disposição para direcionamentos e orientações deste trabalho.

Aos técnicos do laboratório de usinagem e eletrônica da PUC Minas, campus Coração Eucarístico, André, Ítalo, Fabio. Lindomar e Marcio, pela disposição incondicional quando procurados.

À VLI Multimodal S.A., em especial meus gestores ao longo desse tempo, Luis Aguiar, Saulo Lana e Thiago Braga, pela flexibilidade na jornada de trabalho, me possibilitando alcançar mais esta conquista pessoal.

À Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais e o Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica pela disponibilização de recursos e organização deste programa de ensino.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pela concessão da bolsa de estudos para obtenção do meu título de Doutor em Engenharia Mecânica.

RESUMO

O domínio dos processos de fabricação é fundamental para o desenvolvimento tecnológico sustentável e o uso eficiente dos recursos de matéria prima e tempo. O entendimento dos fenômenos são alvos de constantes trabalhos na engenharia contemporânea. Nesse sentido, este trabalho objetiva identificar e mapear o comportamento dos fenômenos físicos relacionados à remoção de material durante o processo de usinagem por eletroerosão (EDM), por meio da análise dos sinais de Emissão Acústica (EA) capturados durante o processo. Para isso utiliza-se de variações dos parâmetros de usinagem, corrente elétrica e duração de pulso de tensão, com eletrodos de cobre eletrolítico e grafite, aplicados à usinagem de aço AISI H13 em dois dielétricos distintos: hidrocarboneto hidrogenado e água deionizada. Os ensaios de EDM resultaram em indicadores de taxa de remoção de material (V_w) e de desgaste dos eletrodos (V_e), simultaneamente à aquisição dos sinais de EA. A análise concentrada nos intervalos efetivos de remoção de material, onde se aplicaram a Transformada Rápida de Fourier (FFT) para caracterizar as faixas de frequência associadas aos fenômenos de erosão em cada material. Observa-se que as bandas de frequência de 50–90 kHz correspondem à erosão de material de cobre, a faixa entre 135–185 kHz está relacionada à erosão do aço, e a banda de 215–250 kHz foi atribuída à erosão do material de grafite. Após a aplicação de filtros de passa-banda no sinal de EA, aplica-se a análise de Entropia Espectral e o Valor Eficaz (RMS). Os resultados indicam que a entropia espectral apresenta comportamento inversamente proporcional à V_w , refletindo maior organização do sinal em condições de erosão mais eficientes. O eletrodo de grafite demonstrou menor desgaste, até 74% inferior ao do cobre, e maior estabilidade nos sinais. Já o valor RMS não se mostrou adequado como métrica direta de remoção ou desgaste, exceto em situações específicas envolvendo o grafite. A utilização da água deionizada como dielétrico foi fundamental para minimizar fenômenos referente ao carbono, contribuindo para a identificação das bandas características de cada material. A abordagem adotada permitiu o monitoramento ativo e em tempo real dos fenômenos de erosão, abrindo caminho para a integração de sistemas inteligentes na usinagem por EDM. Dessa forma, a metodologia proposta não apenas contribui para o entendimento dos fenômenos físicos, como também fornece subsídios para estratégias mais precisas de controle do processo.

Palavras-chave: Eletroerosão. Emissão Acústica. Valor Eficaz. Entropia Espectral.

ABSTRACT

Mastering manufacturing processes is essential for sustainable technological development and efficient use of raw materials and time. Understanding these phenomena is a constant focus of contemporary engineering. In this sense, this study aims to identify and map the behavior of physical phenomena related to material removal during the Electrical Discharge Machining (EDM) process by analyzing Acoustic Emission (AE) signals captured during the process. For this purpose, variations in machining parameters, electric current and voltage pulse duration are used, with electrolytic copper and graphite electrodes applied to the machining of AISI H13 steel in two different dielectrics: hydrogenated hydrocarbon and deionized water. The EDM tests resulted in indicators of material removal rate (V_w) and electrode wear (V_e), simultaneously with the acquisition of AE signals. The analysis focused on the effective material removal intervals, where the Fast Fourier Transform (FFT) was applied to characterize the frequency bands associated with the erosion phenomena in each material. It was observed that the frequency bands of 50–90 kHz correspond to the erosion of copper material, the band between 135–185 kHz is related to the erosion of steel, and the band of 215–250 kHz was attributed to the erosion of graphite material. After the application of bandpass filters to the AE signal, the Spectral Entropy and Root Mean Square (RMS) analysis were applied. The results indicate that the spectral entropy presents behavior inversely proportional to the V_w , reflecting greater signal organization under more efficient erosion conditions. The graphite electrode demonstrated less wear, up to 74% less than that of copper, and greater signal stability. The RMS value did not prove to be suitable as a direct metric for removal or wear, except in specific situations involving graphite. The use of deionized water as a dielectric was essential to minimize carbon-related phenomena, contributing to the identification of the characteristic bands of each material. The adopted approach allowed active and real-time monitoring of erosion phenomena, paving the way for the integration of intelligent systems in EDM machining. Thus, the proposed methodology not only contributes to the understanding of physical phenomena, but also provides support for more precise process control strategies.

Keywords: Electrical Discharge Machining. Acoustic Emission. Root Mean Square. Spectral Entropy.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Componentes do processo de eletroerosão	28
Figura 2 – Gap de trabalho	29
Figura 3 – Esquema dos processos de (a) eletroerosão por penetração e (b) a fio.....	32
Figura 4 – Fases de uma descarga elétrica no processo de EDM.....	35
Figura 5 – Representação esquemática da fase de ignição	36
Figura 6 – Representação esquemática da formação do canal de plasma	37
Figura 7 – Representação esquemática da fusão de material no ânodo e no cátodo	38
Figura 8 – Fim da descarga, extinção do canal de plasma e remoção do material.....	39
Figura 9 – Uma cratera produzida em EDM	40
Figura 10 – Evolução da tensão e corrente elétricas durante a descarga de uma faísca.....	41
Figura 11 - Períodos de usinagem (U) e de retração do eletrodo (R).....	42
Figura 12 – Taxa de Remoção de Material (Vw) e Desgaste Volumétrico Relativo (ϑ) em eletrodos com polaridade positiva	45
Figura 13 – Diferença entre as taxas de erosão do ânodo e cátodo	47
Figura 14 – Demonstração do Gap de trabalho e rugosidade em torno do eletrodo e peça	48
Figura 15 - Transdutor piezoelétrico convertendo sinal EA em representação elétrica.....	51
Figura 16 – Transformação do sinal analógico (linha pontilhada) em discreto (pontos).....	57
Figura 17 – Sinais discretizados para diferentes taxas de amostragem.....	59
Figura 18 – Regressão por Processo Gaussiano	68
Figura 19 – Fluxograma da metodologia aplicada neste trabalho	71
Figura 20 – Corpo de prova da peça de trabalho em aço AISI H13.....	72
Figura 21 – Eletrodo de Cobre Eletrolítico	73
Figura 22 - Eletrodo de Grafite.....	73
Figura 23 – Porta-Eletrodo (a) e sua montagem na máquina de EDM (b).....	75
Figura 24 - Balança de precisão	76
Figura 25 – Estufa para secagem dos eletrodos de Grafite.....	77
Figura 26 – Máquina EDM 440 NC	78
Figura 27 – Sensor Piezoelétrico R15i fixado no tanque de usinagem da máquina EDM.....	80
Figura 28 – Cuba instalada na máquina de EDM para usinagem com água deionizada.....	80
Figura 29 – Amplificador de sinal (a) e Condicionador de sinal (b).....	81
Figura 30 – Fluxograma do processamento dos sinais EA.....	84

Figura 31 – Sinal EA do teste com cobre e hidrocarboneto após 15 minutos de ensaio	85
Figura 32 – Sinal EA do último trem de pulso (U) da Figura 34.....	86
Figura 33 – Fluxograma do tratamento dos sinais EA.....	88
Figura 34 – Peça AISI H13 e eletrodo de cobre eletrolítico após EDM em hidrocarboneto...	90
Figura 35 – Taxa de remoção de material com cobre e hidrocarboneto	91
Figura 36 - Taxa de desgaste do eletrodo de cobre com dielétrico em hidrocarboneto.....	93
Figura 37 – Peça AISI H13 e eletrodo de grafite após EDM em hidrocarboneto.....	94
Figura 38 - Taxa de remoção de material com grafite e hidrocarboneto	95
Figura 39 - Taxa de desgaste do eletrodo de grafite com dielétrico em hidrocarboneto	96
Figura 40 – Peça AISI H13 e eletrodo de cobre após EDM em água deionizada	98
Figura 41 - Peça AISI H13 e eletrodo de grafite após EDM em água deionizada.....	98
Figura 42 - Transformada Rápida de Fourier (FFT) do um sinal EA	100
Figura 43 – Base de dados da amplitude atingida em cada faixa de frequência por ensaio ..	101
Figura 44 - Distribuição normalizada das amplitudes em função das frequências dos sinais EA dos experimentos em hidrocarboneto	102
Figura 45 - Distribuição normalizada das amplitudes em função das frequências dos sinais EA dos experimentos em água deionizada.....	104
Figura 46 - Fluxograma treinamento do Modelo GPR	106
Figura 47 – Resumo dos RMSE absoluto por modelo GPR.....	107
Figura 48 - Ferramenta de predição da resposta acústica de EDM.....	108
Figura 49 - Histogramas do resultado dos modelos GPR	108
Figura 50 - Processamento do sinal (recorte, filtragem e análise de entropia espectral)	110
Figura 51 - Entropia espectral com filtro 135-185 kHz (banda do aço) – Cobre	111
Figura 52 - Entropia espectral com filtro 135-185 kHz (banda do aço) – Grafite.....	111
Figura 53 - Entropia espectral com filtro 135-185 kHz (banda do aço) em função da taxa de remoção de material - Cobre.....	112
Figura 54 - Entropia espectral com filtro 135-185 kHz (banda do aço) em função da taxa de remoção de material - Grafite	112
Figura 55 - Entropia espectral com filtro 50-90 kHz (banda do Cobre) – Cobre	114
Figura 56 - Entropia espectral com filtro 215-250 kHz (banda do Grafite) – Grafite	115
Figura 57 - RMS com filtro 135-185 kHz (banda do aço) – Cobre.....	117
Figura 58 - RMS com filtro 135-185 kHz (banda do aço) – Grafite	117
Figura 59 - RMS com filtro 50-90 kHz (banda do cobre) – Cobre.....	118
Figura 60 - RMS com filtro 215-250 kHz (banda do grafite) – Grafite.....	119

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Polaridades de eletrodos para materiais de peças diferentes	46
Tabela 2 – Composição em porcentagem (%) de peso do aço AISI H13	72
Tabela 3 – Parâmetros utilizados nos testes para cada dielétrico	83

LISTA DE SIGLAS

V_e	Taxa de desgaste do eletrodo
V_w	Taxa de remoção de material (<i>Material Removal Rate</i>)
ABINFER	Associação Brasileira da Indústria de Ferramentais
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
AISI	Instituto Americano do Ferro e do Aço (<i>American Iron and Steel Institute</i>)
ASM	Sociedade Americana de Metais (<i>American Society for Metals</i>)
CNC	Controle Numérico Computadorizado
CNN	Rede Neural Convolucional (<i>Convolutional Neural Network</i>)
DC	Corrente Contínua
DF	Fator de Serviço (<i>Duty Factor</i>)
E	Tensão Elétrica
EA	Emissão Acústica
EDM	Eletroerosão (<i>Electrical Discharge Machining</i>)
EDS	Espectroscopia de Energia Dispersiva (<i>Energy Dispersive Spectroscopy</i>)
FFT	Transformada Rápida de Fourier (<i>Fast Fourier Transformation</i>)
GPR	Regressão de Processo Gaussiano (<i>Gaussian Process Regression</i>)
HSWEDM	Eletroerosão a Fio de Alta Velocidade (<i>High-Speed Wire Electrical Discharge Machining</i>)
IQR	Intervalo Interquartil (<i>Interquartile Range</i>)
J	Joule (Unidade de energia)
MAE	Erro Quadrático Médio (<i>Mean Squared Error</i>)
NBR	Norma Brasileira
Pa	Pascal (Unidade de Pressão)
PFE	Eficiência de Lavagem do Plasma (<i>Plasma Flushing Efficiency</i>)
Ra	Rugosidade Aritmética Principal
RC	Circuito Resistivo-Capacitivo
RF	Radiofrequência
RMS	Valor Eficaz (<i>Root Mean Square</i>)
RMSE	Erro Quadrático Médio (<i>Root-Mean-Square Error</i>)

Rz	Rugosidade Total
SAE	Sociedade de Engenheiros Automotivos (<i>Society of Automotive Engineers</i>)
SDE	Energia de Descarga Específica (<i>Specific Discharge Energy</i>)
Se	Entropia Espectral (<i>Spectral Entropy</i>)
STFT	Transformada de Fourier de Tempo Curto (<i>Short Time Fourier Transform</i>)
SVM	Máquina de Vetores de Suporte (<i>Support Vector Machine</i>)
TS	Transistor Standard
VDI	Norma Alemã DEM, definição e terminologia (<i>Verien Deutscher Ingenieure</i>)
WEDM	Eletroerosão a Fio (<i>Wire Eletrical Discharge Machining</i>)
ZTA	Zona Termicamente Afetada

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	21
1.1 Objetivos.....	22
<i>1.1.1 Objetivo Geral.....</i>	<i>22</i>
<i>1.1.2 Objetivos Específicos.....</i>	<i>23</i>
1.2 Justificativa	23
1.3 Escopo do Trabalho.....	25
 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	 27
2.1 Eletroerosão	27
2.1.1 Fenomenologia.....	33
<i>2.1.1.1 Fase de ignição da faísca.....</i>	<i>35</i>
<i>2.1.1.2 Formação de canal de plasma.....</i>	<i>36</i>
<i>2.1.1.3 Fusão e evaporação de material nos eletrodos.....</i>	<i>37</i>
<i>2.1.1.4 Ejeção do material fundido</i>	<i>39</i>
2.1.2 Parâmetros de controle do processo EDM	40
2.1.3 Influências Dinâmicas no EDM.....	47
2.2 Emissão acústica	50
2.3 Processamento de sinais	55
<i>2.3.1 Teorema da amostragem</i>	<i>58</i>
<i>2.3.2 Transformadas.....</i>	<i>60</i>
<i>2.3.3 Valor Eficaz</i>	<i>62</i>
<i>2.3.4 Entropia Espectral.....</i>	<i>63</i>
2.4 Métricas Estatísticas na Análise de Dados	65
<i>2.4.1 Média e Variabilidade.....</i>	<i>65</i>
<i>2.4.2 Identificação e Remoção de Outliers</i>	<i>66</i>
<i>2.4.3 Aprendizado Estatístico com Regressão por Processo Gaussiano.....</i>	<i>67</i>
 3 METODOLOGIA.....	 71
3.1 Materiais.....	71
<i>3.1.1 Peça de Trabalho</i>	<i>71</i>
<i>3.1.2 Eletrodos</i>	<i>72</i>
<i>3.1.3 Porta-Eletrodo</i>	<i>74</i>
<i>3.1.4 Balança de precisão.....</i>	<i>75</i>
<i>3.1.5 Estufa para secagem do eletrodo de Grafite.....</i>	<i>76</i>
3.2 Métodos	77
<i>3.2.1 Usinagem por Eletroerosão.....</i>	<i>77</i>
<i>3.2.2 Aquisição dos sinais de emissão acústica</i>	<i>79</i>
<i>3.2.3 Procedimentos.....</i>	<i>82</i>
<i>3.2.4 Processamento dos sinais de emissão acústica.....</i>	<i>84</i>
 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	 89
4.1 Usinagem EDM.....	89
<i>4.1.1 Testes EDM com dielétrico de Hidrocarboneto.....</i>	<i>89</i>
<i>4.1.1.1 Teste EDM com eletrodo de cobre eletrolítico.....</i>	<i>89</i>
<i>4.1.1.2 Teste EDM com eletrodo de Grafite.....</i>	<i>93</i>
<i>4.1.2 Testes EDM com dielétrico de Água Deionizada</i>	<i>97</i>
4.2 Resultados da Emissão Acústica	99
<i>4.2.1 Banda de frequências</i>	<i>99</i>

<i>4.2.1.1 Teste EDM com dielétrico com hidrocarboneto</i>	101
<i>4.2.1.2 Teste EDM com dielétrico em água deionizada</i>	103
<i>4.2.1.3 Processo de Regressão</i>	106
<i>4.2.2 Entropia Espectral</i>	109
<i>4.2.3 Valor Eficaz</i>	116
5 CONCLUSÃO	121
6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	125
REFERÊNCIAS	127
APÊNDICE A – RESULTADOS DO EDM	137
APÊNDICE B – RESULTADOS DA EA	138
ANEXO A – TABELA TÉCNICA AISI H13 FORNECEDOR FAVORIT	140

1 INTRODUÇÃO

Os processos industriais de manufatura transformam matérias-primas em produtos de alto valor agregado, seguindo planos detalhados que incluem etapas como usinagem, fundição, soldagem e conformação. Dentre esses, a usinagem destaca-se por conferir à peça forma, dimensão ou acabamento superficial, ou uma combinação desses aspectos, produzindo cavacos. Enquanto a usinagem convencional e abrasiva remove material por cisalhamento ou abrasão, como nos processos de torneamento e brunimento, a usinagem não convencional utiliza energia direta para remover material, como ocorre na usinagem química ou por eletroerosão. O cavaco, independentemente da operação, é caracterizado por ser uma porção de material retirada da peça sob usinagem com forma geométrica irregular.

A eletroerosão, também conhecida pela sigla EDM (*Electrical Discharge Machining*), é um processo de usinagem que remove material das superfícies dos eletrodos por meio de sucessivas descargas elétricas de alta frequência. Essas descargas, não estacionárias e altamente repetitivas, são geradas por um sistema de tensão e corrente em um gap de trabalho, fenda entre os eletrodos, preenchido por um dielétrico líquido. A erosão em um dos eletrodos pode ser mais acentuada em relação ao outro; o eletrodo com menor desgaste é usado como ferramenta, enquanto o outro atua como peça de trabalho. A descarga provoca temperaturas extremamente altas em uma porção de ambos os materiais sob eletroerosão, levando à fusão ou até mesmo à evaporação. Ao término da descarga, pressões suficientemente grandes removem parte do material fundido da superfície dos eletrodos, formando crateras proporcionais à energia liberada. Em seguida, o dielétrico que flui pelo gap transporta os cavacos recém-arrancados para fora da fenda de trabalho, mantendo o gap limpo para a próxima descarga elétrica, além de resfriar o material fundido das superfícies dos materiais não removido, formando a camada refundida.

A eletroerosão tornou-se popular por superar limitações da usinagem convencional, como a produção de peças complexas, a remoção controlada de materiais de alta dureza e a ausência de tensões mecânicas e vibrações. A abrangência do EDM inclui a usinagem de qualquer material, desde que conduza eletricidade. Na eletroerosão, alterações superficiais da peça, como rugosidade, camada termicamente afetada e tolerâncias dimensionais e geométricas, podem ser ajustadas com alta precisão.

Nas últimas décadas, o EDM evoluiu, tornando-se uma operação amplamente utilizada na fabricação de peças de alta complexidade e materiais de difícil usinabilidade, como aços temperados e ligas de alta dureza. Suas principais aplicações incluem a produção de matrizes

para forjamento, estampagem, extrusão, fieiras, moldes e na confecção de componentes para as indústrias aeroespacial, automotiva e cirúrgica. Os moldes e matrizes produzidos pelo processo são ferramentas essenciais para conformar plásticos, cerâmicos e metais, destacando-se pela alta precisão dimensional e excelente acabamento superficial.

Os desafios dos processos não convencionais incluem suprir demandas cada vez maiores, altos padrões de eficiência de produção, tolerâncias dimensionais, acabamento superficial e geometrias complexas. Para explorar a capacidade do EDM, é necessário determinar as melhores combinações possíveis dos parâmetros controláveis para cada necessidade. Atualmente, a tecnologia, o maquinário e os materiais de ferramentas permitem a usinagem de uma ampla variedade de elementos e tamanhos. No entanto, os fenômenos complexos da eletroerosão ainda podem ser explorados devido à sua natureza dinâmica e intrincada.

Devido à complexidade dos fenômenos envolvidos na eletroerosão, muitos ainda não são totalmente compreendidos. O esforço contínuo de pesquisa visa aprofundar o entendimento do processo de centelhamento no EDM, permitindo explorar diferentes abordagens de otimização das diversas variáveis do processo, contribuindo para reduzir as características estocásticas e melhorar a eficiência, precisão e abrangência da eletroerosão.

Este trabalho tem como principal contribuição a análise dos sinais de Emissão Acústica (EA) captados durante o processo de usinagem por eletroerosão, por meio de técnicas de processamento em frequência, entropia espectral e valor eficaz. A partir dos sinais obtidos, estabelecem-se correlações experimentais com os parâmetros de usinagem, como corrente e tempo de pulso, bem como com diferentes materiais de eletrodos e líquidos dielétricos. Essa abordagem visa identificar padrões de resposta acústica associados à remoção de material da peça e ao desgaste do eletrodo, contribuindo para o entendimento e o monitoramento do processo de EDM em tempo real.

1.1 Objetivos

Os objetivos deste trabalho são divididos em duas categorias: o objetivo geral, que aborda de forma abrangente a finalidade deste projeto, e os objetivos específicos, que estabelecem de maneira detalhada os aspectos a serem explorados.

1.1.1 Objetivo Geral

Identificar o comportamento entre as características dos sinais de Emissão Acústica, por meio de técnicas de processamento em frequência, entropia espectral e valor eficaz, e as respostas de remoção de material e desgaste dos eletrodos no processo de eletroerosão, considerando distintos parâmetros de usinagem, materiais de eletrodo e líquidos dielétricos.

1.1.2 Objetivos Específicos

- a) Determinar um padrão estimado para as taxas de remoção de material do eletrodo de cobre e grafite para uma gama de parâmetros de Eletroerosão (EDM) com fluido dielétrico de hidrocarboneto;
- b) Obter a curva da taxa de desgaste dos eletrodos de cobre e grafite para os mesmos parâmetros de EDM com fluido dielétrico de hidrocarboneto;
- c) Obter o perfil de excitações pelas frequências dos sinais EA gerados pelo EDM com os diferentes materiais em eletrodo, dielétricos e parâmetros de usinagem;
- d) Relacionar os sinais de EA dos testes de EDM com seus respectivos parâmetros de usinagem e material do eletrodo por meio de técnicas de processamento de sinais como Transformada de Fourier (FFT), Entropia Espectral e Valor Eficaz (RMS);
- e) Identificar padrão de resposta dos sinais EA processados por entropia espectral e valor eficaz com as performances de remoção de material e desgaste dos eletrodos.

1.2 Justificativa

A área de materiais e processos de fabricação mecânica tem avançado significativamente em termos de tecnologia e escala para atender às demandas crescentes da indústria impulsionadas pelo crescimento econômico. Projetos modernos requerem formas complexas e componentes micromecânicos com tolerâncias reduzidas, onde métodos convencionais de usinagem frequentemente se mostram ineficazes. Assim, torna-se necessário o desenvolvimento de métodos não convencionais, como a eletroerosão.

O avanço tecnológico na indústria mundial contribuiu para obsolescência e perda de *market share* das ferramentarias nacionais. Contudo, segundo a ABINFER (Associação Brasileira da Indústria de Ferramentais), dados de 2023 apontam um crescimento médio de 2% no setor, impulsionado pela digitalização industrial e incentivos fiscais. Isso inclui a adoção crescente de sistemas de monitoramento online, como sensores para prever resultados do processo e otimizar parâmetros.

O desenvolvimento sustentável das empresas visa aumentar a competitividade dos fabricantes de moldes e matrizes, enquanto reduz custos de insumos provenientes de processos de usinagem. A crescente demanda por produtos de alta qualidade, aliada à necessidade de processos produtivos eficientes e preocupação ambiental, intensifica os desafios da indústria de fabricação, como os curtos ciclos de desenvolvimento e a pressão por redução de custos.

Nesse contexto, o monitoramento e controle inteligente do processo de eletroerosão emergem como soluções essenciais. Investigações recentes demonstram que estratégias híbridas, como o EDM combinado a outros processos, e a expansão para novos campos de aplicação, têm mostrado resultados promissores. A digitalização holística de máquinas e processos é uma tendência crescente, e o monitoramento online, embora desafiador, oferece uma abordagem inovadora para controle em tempo real.

A detecção do status do processo é um tema central na pesquisa de monitoramento inteligente, essencial para melhorar métricas como taxa de remoção de material (V_w), rugosidade superficial (R_a) e desgaste do eletrodo (V_e). A eletroerosão apresenta desafios adicionais para análise devido à natureza estocástica do fenômeno de centelhamento, que envolve uma interação complexa entre parâmetros de processo elétricos e não elétricos. A compreensão dessa inter-relação é fundamental para otimizar a eficiência geral da usinagem. Assim, há um forte interesse de pesquisa dedicado às propriedades metalúrgicas das peças, visando melhorar métricas como V_w , V_e e R_a .

A busca do aproveitamento de qualquer procedimento considerando o grau de entendimento do processo e das variáveis que estão presentes, permite um maior aproveitamento do recurso disponível com melhores resultados. Por isso, o maior conhecimento na usinagem por eletroerosão, antecipadamente, possibilita identificar e prever as condições do processo e seu resultado, corroborando para a redução do desperdício de material, energia e hora máquina deste processo.

Embora o processo de EDM seja consolidado na indústria, muitos de seus aspectos produtivo ainda permanecem como objeto de estudo experimental. Predições abrangentes de comportamentos neste processo podem possibilitar a antecipação de resultados dimensionais, acabamento superficiais e mesmo falhas. O uso de estratégias de monitoramento, como a emissão acústica (EA), que não afetam ou interferem no processo prometem superar os desafios de previsão de resultados dimensionais, qualidade superficial e detecção precoce de falhas, fortalecendo a sustentabilidade e a eficiência da eletroerosão.

A adoção de métodos mais eficientes tem contribuído para reduzir descartes na produção, resultando em menor consumo de matérias-primas e promovendo uma manutenção

econômica e ambiental mais sustentável. A melhoria na qualidade e nos custos de produção beneficia tanto as ferramentarias quanto seus clientes, fortalecendo a indústria e impulsionando a geração de renda.

Apesar dos avanços tecnológicos das últimas décadas, a usinagem ainda enfrenta limitações. Por outro lado, as demandas crescentes por novos materiais e métodos motivam pesquisas que busquem atender às necessidades industriais de maneira sustentável.

1.3 Escopo do Trabalho

O texto deste trabalho se organiza em capítulos que são apresentados na respectiva ordenação:

- a) Capítulo 1: Introdução, determina-se o tema abordado seguido dos objetivos, justificativas e abrangência do trabalho.
- b) Capítulo 2: Revisão Bibliográfica, apresenta-se o processo de usinagem por eletroerosão abordando seus parâmetros e algumas particularidades, além de emissão acústicas, aquisição de dados, tratamento de sinais e a técnicas estatísticas.
- c) Capítulo 3: Metodologia, aborda-se os materiais, procedimentos e desenvolvimento do presente trabalho.
- d) Capítulo 4: Resultados e Discussão, apresenta-se os resultados obtidos e também discussões a partir dos métodos adotados.
- e) Capítulo 5: Conclusão, apresenta-se o desfecho dos assuntos que foram discutidos ao longo do desenvolvimento da pesquisa.
- f) Capítulo 6: Sugestão de Trabalhos Futuros, onde são colocadas sugestões de alguns assuntos e temas que podem produzir novos trabalhos acadêmicos em engenharia sobre EDM.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Este capítulo apresenta uma revisão bibliográfica sobre os temas abordados no trabalho, com base em referências da literatura científica e no estado da arte. A apresentação desses tópicos contribui para uma melhor compreensão da abrangência, metodologia e resultados apresentados.

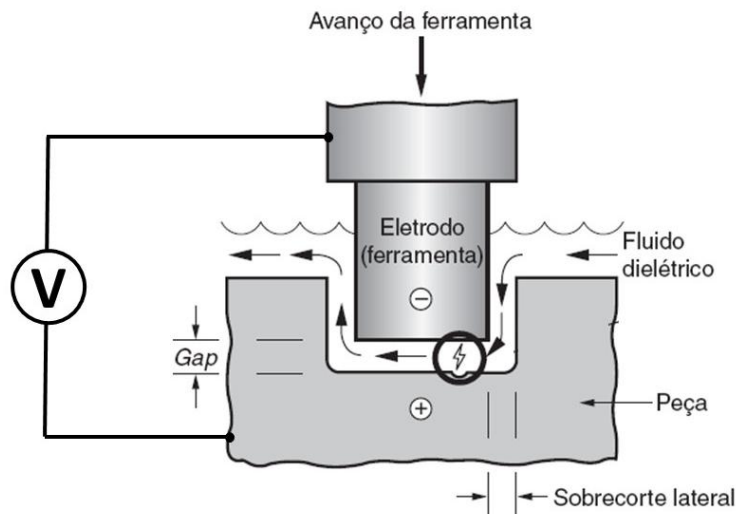
Inicialmente, explora-se a usinagem por eletroerosão, abordando os princípios físicos fundamentais e são analisados os parâmetros de controle que influenciam o processo. Em seguida, discutem-se as técnicas de aquisição de sinais, com foco na Emissão Acústica e no processamento de informações, destacando suas aplicações específicas no contexto da eletroerosão.

2.1 Eletroerosão

A usinagem por descargas elétricas (EDM - *Electrical Discharge Machining*), ou eletroerosão, é um processo de fabricação não convencional de usinagem. O método utiliza descargas elétricas de microssegundos a milissegundos de duração para remover material entre eletrodos imersos em um dielétrico líquido. As descargas, ou faíscas elétricas, são geradas em um pequeno espaço entre o eletrodo ferramenta e a peça de trabalho, conhecido como *gap* de trabalho, cuja largura varia de aproximadamente 5 a 1.000 μm , dependendo dos parâmetros empregados. O fluido dielétrico presente no gap, entre outras funções, regula as descargas elétricas desempenhando uma resistência elétrica adequada durante todas as etapas do processo (BENEDICT, 1987).

O processo de EDM envolve componentes essenciais que trabalham em conjunto para sua execução. Esses componentes incluem o eletrodo, que avança em direção à peça respeitando o gap; a peça de trabalho; o fluido dielétrico; e a fonte de tensão. A organização e a interação desses elementos no processo estão ilustradas na Figura 1.

No processo de eletroerosão, as descargas elétricas são geradas por uma fonte de tensão e corrente elétrica, que pode ser alternada ou pulsada contínua. A peça de trabalho é conectada a um pólo da fonte, enquanto o eletrodo é conectado ao pólo oposto. Este arranjo cria um campo elétrico no gap, pela diferença de potencial aplicada. À medida que o eletrodo avança em direção à peça, reduzindo a distância entre as superfícies, o campo elétrico aumenta até romper a resistência elétrica do dielétrico. Isso permite a ocorrência pontual da descarga elétrica entre as superfícies do par de materiais (FERREIRA *et al.*, 2022).

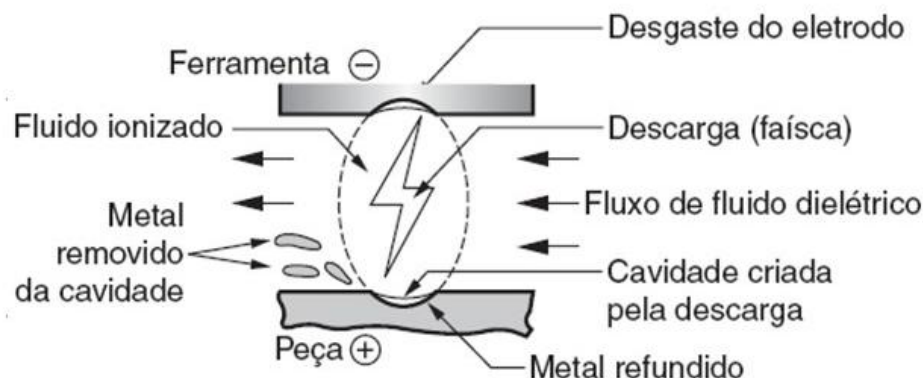
Figura 1 – Componentes do processo de eletroerosão

Fonte: Adaptado de Groover (2012).

A formação desse campo elétrico surge geralmente nos picos de rugosidade do eletrodo ferramenta e peça de trabalho, pontos de máxima proximidade entre eles. No entanto, as faíscas podem ocorrer de forma aleatória em qualquer ponto entre as duas superfícies, influenciadas pelo sistema de lavagem no gap, temperatura do fluido dielétrico, entre outras variáveis (AHMED *et al.*, 2022).

A descarga elétrica localizada incide sobre as superfícies do par de eletrodos, aumenta a temperatura de uma porção de material neste local, levando-o à fusão ou mesmo a vaporização. Após algumas frações de segundo, a interrupção abrupta do fluxo de corrente elétrica gera uma pressão suficiente para expulsar parte do material líquido da poça fundida. O material removido é então transportado para fora do gap pelo fluido dielétrico, enquanto o restante solidifica, formando a camada refundida na cratera recém-gerada. A Figura 2 ilustra o que ocorre no gap de trabalho.

Esse processo se repete milhares de vezes por segundo, promovendo a remoção uniforme de material do eletrodo ferramenta e da peça de trabalho. À medida que o material é removido, a distância entre o eletrodo e a peça aumenta, e a máquina de EDM avança o eletrodo em direção à peça para manter o gap constante, assegurando a continuidade das descargas elétricas (FERREIRA, 2020).

Figura 2 – Gap de trabalho

Fonte: Adaptado de Groover (2012).

As altas temperaturas da faísca que fundem a peça e o eletrodo, criam uma cavidade na superfície do eletrodo oposta à cavidade produzida na peça. Tanto os eletrodos como as peças sofrem o efeito da erosão, porém, é ajustado os parâmetros de usinagem e selecionado o próprio material do eletrodo para buscar uma remoção de material menor nele (variam entre 5% a 50%). A maior vida útil da ferramenta tem um impacto positivo na obtenção de pequenas variações dimensionais do produto final desejado. O desgaste do eletrodo é normalmente medido como a Taxa de Desgaste da Ferramenta (V_e) [mm^3/mim ou kg/mim] e a performance de usinagem da peça pela Taxa de Remoção de Material (V_w) [mm^3/mim ou kg/mim] (GROOVER, 2012).

A dureza e a resistência do material da peça não são fatores determinantes em EDM, pois o processo não depende de uma competição de dureza entre a ferramenta e a peça. No entanto, o ponto de fusão do material é uma propriedade fundamental, diretamente relacionada à V_w . Essa característica permite a usinagem de aços temperados e, de maneira geral, de materiais com baixa usinabilidade convencional, desde que possuam condutividade elétrica suficiente. A eletroerosão é amplamente utilizada para usinar aços, metais, ligas duras e materiais refratários, que apresentam dificuldades em processos convencionais de cisalhamento ou abrasão (HO; NEWMAN, 2003).

Por não haver contato físico entre o eletrodo e a peça, a eletroerosão elimina vibrações significativas durante o processo, além de não gerar tensões mecânicas ou forças de corte na peça, exceto pela pressão do plasma. Essas características contrastam com os processos convencionais de usinagem, que geram vibrações e aplicam tensões de cisalhamento ou abrasão. A ausência de tensões mecânicas torna o processo ideal para a usinagem de peças extremamente frágeis ou resistentes, sem causar danos, superando as limitações dos métodos convencionais de remoção de material. Além de remover materiais de alta resistência mecânica,

a eletroerosão possibilita a obtenção de geometrias complexas e alta precisão dimensional (YAO *et al.*, 2025).

A peça de trabalho, que pode ser de qualquer material condutor elétrico, mesmo que duro ou de difícil usinagem, submersa em fluido dielétrico sofre usinagem de modo a obter a geometrias imposta pelo eletrodo. Estudos recentes têm revelado resultados satisfatórios na usinagem de materiais cerâmicos, mesmo com alta resistência elétrica, como demonstrado nos trabalhos de Singh Thakur, Pradhan e Sharma (2022) e Shanmugam, Annamalai e Thangaraj (2025). A alta resistividade elétrica das cerâmicas influencia significativamente a eficiência de usinagem, tolerâncias e qualidade superficial, sendo essa relação frequentemente avaliada em pesquisas científicas.

O material do eletrodo deve atender a requisitos específicos para aplicação no processo de EDM, como alta condutividade elétrica, baixa taxa de desgaste, facilidade de usinagem e capacidade de proporcionar acabamentos superficiais adequados na peça de trabalho. São comumente empregados materiais como grafite, cobre, latão, cobre-tungstênio e prata-tungstênio. A escolha do eletrodo depende, entre outros fatores, do tipo de circuito de alimentação da máquina, do material da peça a ser usinada e do regime de operação, seja desbaste ou acabamento (GROOVER, 2012).

O grafite tende a ser preferido como eletrodos para muitas aplicações devido a sua versatilidade, facilidade a ser usinado e menores taxas de desgaste durante o processo de EDM. Sua alta temperatura de vaporização em relação aos metais contribui para uma taxa extremamente baixa de desgaste como eletrodo. Em aplicações gerais, o seu uso é destinado à fabricação de moldes plásticos, matrizes de forjar e estampar, entre outras aplicações. No entanto, uma desvantagem do uso de grafite é sua fragilidade, gerando riscos de quebrar durante o manuseio (SELVARAJAN *et al.*, 2021).

Na indústria de equipamentos médicos, o cobre eletrolítico apresenta vantagens significativas sobre o eletrodo de grafite devido à sua capacidade de polimento, permitindo um acabamento superficial mais refinado, menor contaminação superficial da peça e menor geração de partículas durante o processo de usinagem. Também, o cobre promove alta escala de produção e são aplicados na fabricação de geometrias complexas a baixo custo (OLINIKI, 2009).

O fluido dielétrico é essencial para o sucesso da usinagem por EDM. Desempenha funções como isolante elétrico entre os eletrodos, limpeza do gap de trabalho removendo os cavacos gerados a cada descarga e controle da trajetória das descargas elétricas à medida que se ioniza no gap. Além disso, regula a potência das descargas elétricas, atuando

simultaneamente como refrigerante, dissipando o calor gerado pelas faíscas nos materiais em usinagem. Essas propriedades são fundamentais para garantir as características físicas e químicas desejadas na superfície da peça (LUZIA *et al.*, 2019).

Diversos fluidos dielétricos podem ser utilizados no EDM, incluindo querosene comum, querosene desodorizado, hidrocarbonetos aditivados, água deionizada, óleo mineral, óleos sintéticos e soluções aquosas, escolhidos conforme as necessidades específicas do processo. Para cumprir suas funções, o dielétrico deve possuir alta força dielétrica para permanecer eletricamente isolante até que a tensão de ruptura seja atingida, além de ionizar rapidamente após o início da descarga elétrica. Sua propriedade isolante é essencial para evitar a eletrólise do eletrodo, minimizando o desgaste da ferramenta. Além de estar habilitado a suportar repetição das centelhas estabelecidas na descarga, o dielétrico deve possuir uma boa capacidade de refrigeração com baixa viscosidade, o que permite a retirada dos resíduos de usinagem para fora do gap ferramenta-peça (JEONG; MIN, 2007).

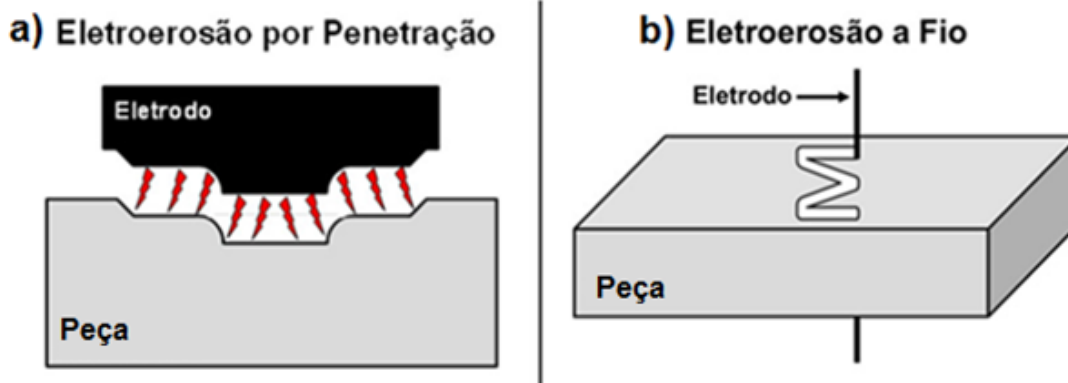
Independentemente do fluido dielétrico utilizado, a eficiência do processo de EDM depende fortemente de um sistema de lavagem eficaz, responsável pela remoção contínua dos cavacos do gap de trabalho e pela estabilidade das descargas elétricas. O sistema de lavagem em ciclo fechado remove cavacos do fluido dielétrico por filtragem, garantindo sua pureza e a estabilidade das descargas. Uma filtragem ineficiente, compromete o controle do processo com acúmulo de partículas no gap, reduz a taxa de remoção de material e afeta a qualidade da peça usinada (BENEDICT, 1987).

Os métodos mais comuns de lavagem incluem jato, pressão e sucção, cuja escolha depende da geometria do eletrodo e da área usinada. Contudo, o uso de furos centrais no eletrodo facilita o escoamento, mas pode gerar imperfeições geométricas na peça, o que pode ser contornado com eletrodos sólidos e lavagem externa por jateamento (ARANTES, 2001).

Estudos recentes apontam que fluidos dielétricos vegetais e biodegradáveis, como os investigados por Silva (2007) e Yadav *et al.* (2021), apresentam desempenho comparável aos óleos minerais, promovendo boas taxas de remoção, menor desgaste do eletrodo e bom acabamento superficial. Outras vantagens desses fluidos é a redução de emissões de monóxido de carbono no ambiente e redução de produção de óxidos de carbono na superfície das peças usinadas (carbonetização).

Com o avanço da eletroerosão, as operações foram divididas em dois tipos principais. O primeiro tipo é conhecido como eletroerosão por penetração, que é o método mais tradicional. O segundo tipo é a eletroerosão a fio (WEDM - *Wire Electrical Discharge Machining*). A Figura 3 ilustra esses dois tipos de operações.

Figura 3 – Esquema dos processos de (a) eletroerosão por penetração e (b) a fio



Fonte: Ferramental (2018).

Na EDM por penetração (Figura 3 - a), o eletrodo avança adentro da cavidade a ser usinada durante o processo, transmitindo sua imagem simétrica na peça de trabalho. A eletroerosão a fio (Figura 3 - b) possui o eletrodo como um fio bobinado, normalmente com diâmetro de 0,05 a 0,3 mm. Esse fio é desenrolado continuamente em direção à área a ser usinada, proporcionando à peça um novo eletrodo de diâmetro constante. No WEDM, os fenômenos de remoção de material são iguais aos da eletroerosão por penetração, no entanto, a peça é avançada para obter o contorno programado. O eletrodo na forma de fio realiza de maneira contínua o corte desejado na peça, de forma semelhante a uma operação de serra de fita (WU; LI, 2018).

O processo WEDM é usado para materiais difíceis de se usinar, promovendo formas complexas e obtenção de excelente qualidade superficial da peça de trabalho. Assim, esse processo é empregado quando o EDM por penetração se torna inviável para a usinagem devido ao alto desgaste do eletrodo.

Outras variações do processo de eletroerosão foram surgindo ao longo do tempo, como Micro-EDM (produção de micro cavidades 3D, micro furos e micro veios de até 5 μm de diâmetro), EDM misturado a pó (material na forma de pó é misturado ao fluido dielétrico para promover uma erosão mais rápida na superfície da peça), EDM a seco (eletrodo com forma de tubo de parede fina contendo gás ou ar de alta pressão que resfria e remover os detritos do gap entre os eletrodos) entre outras variações (GARG *et al.*, 2010).

Diversos estudos discutem os mecanismos de eletroerosão e a modelagem do processo. Wang et al. (2018) propuseram um modelo matemático não linear para descrever o fenômeno de descarga elétrica em EDM. Os resultados teóricos indicam que a usinagem pode gerar pequenos processos caóticos durante as faíscas elétricas na evolução das descargas. Além disso,

o grau de caos no EDM varia conforme a evolução do processo, evidenciando que a remoção de material na eletroerosão é um sistema dinâmico, não linear, não autônomo e complexo.

Sistemas não-lineares, complexos e caóticos, possuem evolução não trivial. O caos é um dos comportamentos que uma pequena perturbação nas condições iniciais pode resultar numa grande diferença em tempos posteriores. A denominação de "sensibilidade às condições iniciais" caracteriza o comportamento caótico de fenômenos não-lineares, como os que estão presentes em EDM (HILBORN, 2000).

Conforme a técnica de eletroerosão continua a evoluir, a questão do desgaste do eletrodo, um fator de extrema importância, ganha destaque para mantê-lo o mínimo possível, a fim de produzir produtos de alta precisão. Nesse contexto, Ferreira et al. (2022) desenvolveram uma nova técnica para acompanhamento de desgastes em eletrodos de cobre eletrolítico por meio de sinais de Emissão Acústica (EA). O trabalho apresentou forte correspondência na relação dos sinais de EA com o desgaste dos eletrodos e acabamento superficial da peça de aço AISI H13 em EDM em função dos parâmetros de usinagem.

Outros aspectos importantes em EDM são os parâmetros do eletrodo. Nguyen et al. (2023) exploraram a relação entre a velocidade de rotação do eletrodo em torno de seu eixo longitudinal, a pressão do dielétrico no gap, e características geométricas como o comprimento e o diâmetro do furo interno do eletrodo. Esses fatores foram analisados com foco na melhoria da conicidade do furo, redução de emissão de ruídos e particulados, além do aumento do coeficiente de fator de potência na usinagem do Ti6Al4V. Quando devidamente parametrizadas, essas variáveis contribuem para a redução de custos e recursos na fabricação de produtos e aprimorando a qualidade.

Nos últimos anos, estudos sobre a tecnologia de EDM têm demonstrado de forma consistente que os resultados e fenômenos da eletroerosão são fortemente influenciados pelo tipo de dielétrico, pelos parâmetros de usinagem e pelos materiais da peça e do eletrodo. Esses achados reforçam a busca de aprofundar a compreensão das relações entre os fenômenos do processo e suas variáveis de maneira abrangente.

2.1.1 Fenomenologia

O processo de remoção de material por eletroerosão fundamenta-se na conversão de energia elétrica em energia térmica por meio de sucessivas descargas elétricas. À medida que o eletrodo avança em direção à peça, a tensão aplicada ioniza o fluido dielétrico presente no gap de trabalho, rompendo sua resistividade e iniciando descargas elétricas de curta duração.

Durante a descarga, forma-se um canal de plasma entre o cátodo (–) e o ânodo (+), atingindo temperaturas extremas entre 8.000 °C e 25.000 °C. Essas condições provocam a fusão ou vaporização do material superficial dos eletrodos (BOUJELBENE *et al.*, 2009). Ao final da descarga, a rápida queda de temperatura gera pressões que expulsam parte do material fundido, formando cavacos transportados pelo fluxo do dielétrico. A fração de material não removida solidifica-se, originando a camada refundida (ou "camada branca" em aços) (CRUZ JUNIOR, 2015).

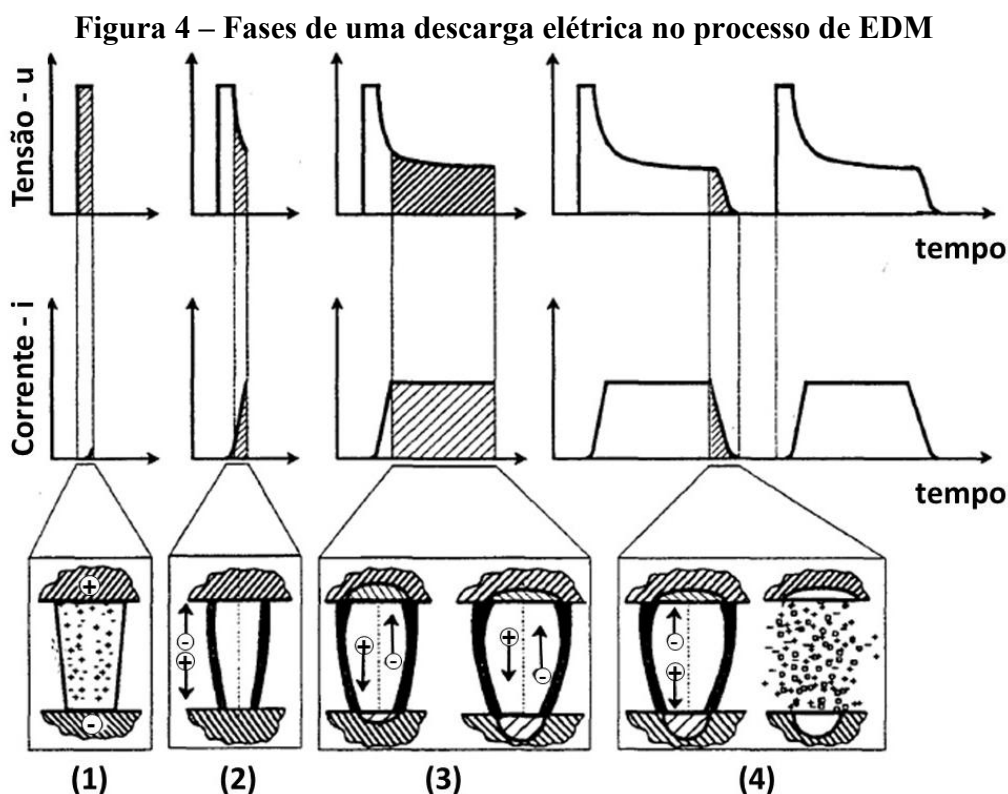
O material expelido pode se apresentar como esferoides sólidos (fusão) ou ocos (vaporização). A remoção térmica altera as propriedades químicas, físicas e microestruturais da superfície usinada, impactando sua resistência, dureza e susceptibilidade a trincas. A camada refundida caracteriza-se por alta dureza devido à formação de martensita, austenita retida e absorção de carbono, especialmente em processos com dielétricos à base de carbono ou eletrodos de grafite (LUZIA *et al.*, 2019). No entanto, tensões residuais elevadas geradas pelo rápido resfriamento em contato com o dielétrico líquido favorecem a formação de microfissuras, que podem comprometer a integridade do material, especialmente em peças sujeitas a esforços mecânicos ou corrosão (AMORIM; WEINGAERTNER, 2004).

Abaixo da camada refundida, a Zona Termicamente Afetada (ZTA) sofre transformações estruturais sem fusão, modificando a composição e propriedades mecânicas do material. A espessura da camada refundida e da ZTA é diretamente influenciada pelos parâmetros de usinagem, como energia do pulso e duração da descarga (REBELO *et al.*, 1998).

Da mesma forma que os tamanhos das crateras erodidas aumentam com a energia do pulso, a densidade das fissuras superficiais também aumenta. Além disso, as fissuras penetram na camada refundida e se estendem a profundidades que dependem da energia do pulso elétrico, podendo penetrar nas zonas inferiores, fragilizando a peça de trabalho. A ZTA pode enfraquecer prematuramente e causar fraturas por estresse no material, resultando desde problemas leves de funcionamento até falhas catastróficas na peça de trabalho (VORA *et al.*, 2021).

O fenômeno da eletroerosão é extremamente complexo, envolvendo simultaneamente efeitos eletrodinâmicos, termodinâmicos, hidromecânicos e eletromagnéticos que ocorrem em estados sólido, líquido, gasoso e de plasma, em espaços confinados de algumas centenas de micrômetros e em escalas de tempo que variam de microssegundos a nanossegundos (KOYANO *et al.*, 2017). Diversas teorias foram propostas para explicá-lo, mas a mais aceita é a teoria termoelétrica que Dibitonto *et al.* (1989) e Klocke e König (2007) também apresentam. Teoria que descreve o ciclo da descarga em quatro fases (Figura 4): (i) ignição da faísca, (ii) formação do canal de plasma, (iii) fusão e evaporação do material, e (iv) ejeção do material

fundido.



Fonte: Amorim (2002).

Embora modelos mais recentes, como o de Rahul et al. (2018), que explorem aspectos como comportamento caótico e dinâmica não linear das descargas, ainda não existe uma teoria unificada que explique integralmente o EDM (RAZEGHIYADAKI *et al.*, 2019).

2.1.1.1 Fase de ignição da faísca

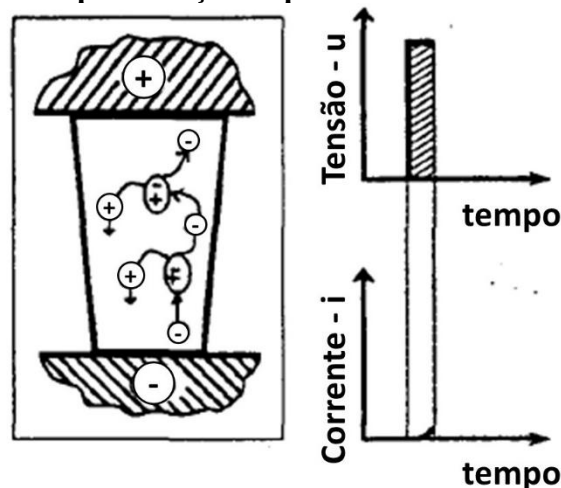
Inicialmente, os eletrodos são posicionados de forma a ficarem separados por uma distância entre 0,5 e 1mm, deixando que o dielétrico circule por este espaço. Uma tensão em aberto u_i fornecida pelo gerador que pode operar entre 60 a 300 V é aplicada entre eles. Com essa tensão, ainda não existe uma passagem de corrente elétrica entre a peça e eletrodo devido à resistência elétrica oferecida pelo fluido dielétrico.

Em seguida, o servomecanismo da máquina avança o eletrodo ferramenta em direção à peça até atingir o gap de trabalho, que causa o aumento do campo elétrico entre as superfícies. A distância de trabalho entre eletrodo e peça está em função dos respectivos materiais, pelo dielétrico e pelos parâmetros de usinagem. A intensidade do campo elétrico é diretamente proporcional à razão entre a tensão aplicada e a distância entre os eletrodos (KLOCKE;

KÖNIG, 2007).

Ao aproximarem-se do gap de trabalho, o campo elétrico aumenta até atingir uma intensidade suficiente para romper a resistência elétrica do dielétrico. Esse rompimento provoca a primeira emissão de elétrons do cátodo em direção ao ânodo, onde o deslocamento dessas partículas é acelerado pelo campo elétrico. Dentro desse campo elétrico gerado, os elétrons se chocam contra as moléculas do dielétrico intensificando a liberação de elétrons e íons positivos, que se movimentam em direção ao cátodo e ânodo, respectivamente (SILVA, 2007). Essa sequência de eventos marca o início do fenômeno de ionização por impacto, conforme ilustrado na Figura 5.

Figura 5 – Representação esquemática da fase de ignição



Fonte: Amorim (2002).

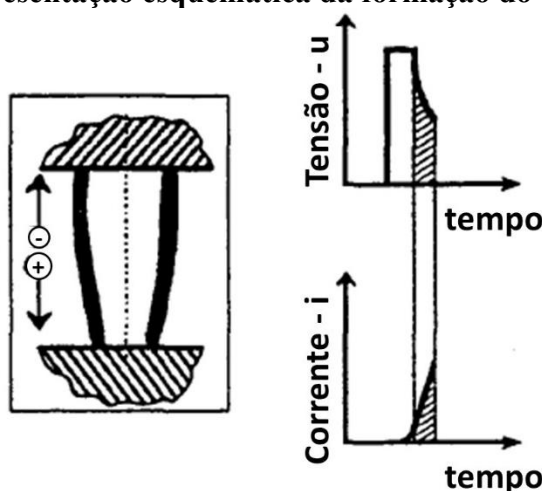
2.1.1.2 Formação de canal de plasma

Com a quebra do isolamento elétrico do dielétrico entre eletrodos, inicia-se o processo de formação de canal de plasma. Esse fenômeno ocorre quando os íons positivos, originados do dielétrico, colidem com o cátodo e liberam mais elétrons que são atraídos para o ânodo, constituindo a chamada emissão secundária. Esse evento intensifica a rápida multiplicação do fenômeno de ionização por impacto em alta velocidade. Como resultado, ocorre o superaquecimento, seguido da evaporação de uma pequena quantidade do dielétrico.

A aceleração dos íons e elétrons na região pontual entre as superfícies do par de eletrodos provoca, simultaneamente, a redução da resistência elétrica do dielétrico, o aumento da corrente elétrica até o nível especificado pelo operador ($\hat{i}_e$) e a queda da tensão em aberto ($\hat{u}_i$) até alcançar a tensão de ruptura do dielétrico.

Com o estabelecimento da corrente elétrica, forma-se o canal de plasma, que concentra a energia liberada em um pequeno volume, limitado pela bolha de vapor e pelo líquido dielétrico que o restringe, conforme ilustrado na Figura 6. O plasma assume uma forma semelhante a um barril devido aos efeitos da viscosidade do dielétrico. Ele é composto por gás formado pela evaporação do dielétrico e, à medida que sua energia aumenta, ocorre a ionização dos átomos e moléculas do vapor. Esse estado comporta-se como uma nuvem de prótons, nêutrons e elétrons livres em grande velocidade e agitação térmica (KUMAR; BAJPAI; SINGH, 2021).

Figura 6 – Representação esquemática da formação do canal de plasma



Fonte: Amorim (2002).

O intervalo de tempo entre a aplicação da tensão $\hat{u}_i$ e a formação do canal de plasma é o tempo de retardo t_d , que pode ser utilizado para análise da abertura da fenda de trabalho entre os eletrodos. O nível energético inicial do plasma formado no gap pode atingir $3 J/mm^3$, produzindo picos de temperatura na faixa de $39.500 ^\circ C$ e pressão dinâmica de $300 MPa$ (KLOCKE; KÖNIG, 2007).

Essa descrição é aplicada para a situação de dielétrico limpo. Contudo, o dielétrico pode conter cavacos de emissões anteriores, partículas causadas pela decomposição do próprio fluido por altas temperaturas ou partículas de pó adicionadas propositalmente no dielétrico. Nesse caso, as partículas no fluido formam caminhos de descarga, aumentando o gradiente de tensão entre eletrodos, facilitando a ocorrência de descargas, permitindo gaps de trabalho maiores (ZHAO; MENG; WANG, 2002).

2.1.1.3 Fusão e evaporação de material nos eletrodos

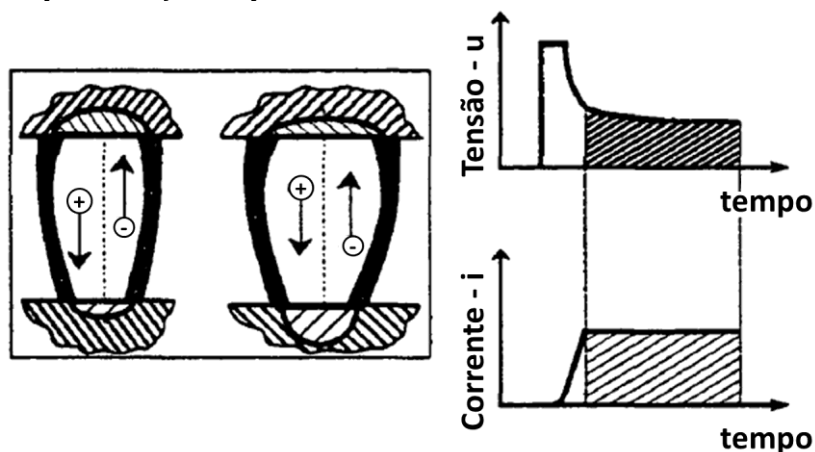
Na fase de fusão e evaporação de material nos eletrodos, o canal de plasma recém-formado é mantido por um intervalo de tempo especificado pelo operador, denotado como t_e . Nessa etapa, o sistema de controle da máquina de EDM gerencia e mantém equilibrado o gap de trabalho, evitando a formação de arcos e curtos-circuitos. O controle do gap está relacionado ao nível de energia da corrente de descarga, representado como $\hat{i}_e$.

Durante o tempo de descarga t_e , as superfícies do ânodo e do cátodo são intensamente bombardeadas, respectivamente, por elétrons e íons positivos. Os elétrons penetram no ânodo, assim esse movimento transforma a energia cinética em calor, resultando na fusão do material. Da mesma forma ocorre com os íons positivos, transformando sua energia cinética em calor ao colidirem com o cátodo. Como resultado, o plasma de alta energia forma uma pequena poça de material líquido na superfície em ambos os eletrodos através da condução térmica e funde continuamente uma quantidade de material em cada um deles (KLOCKE; KÖNIG, 2007).

O volume de material fundido depende de vários aspectos, incluindo o número e a velocidade de elétrons e íons que atingem as superfícies dos eletrodos. Essa quantidade e velocidade são diretamente relacionadas às propriedades físicas do par de eletrodos, a intensidade de corrente $\hat{i}_e$, ao tempo da descarga t_e e o dielétrico. A capacidade de alcançar maiores volumes de material fundido está relacionada a durações de descarga t_e adequadas e correntes elétricas $\hat{i}_e$ maiores.

À medida que o tempo da descarga elétrica aumenta, a irradiação de energia do plasma provoca a vaporização, a dissociação e a ionização de uma pequena quantidade do dielétrico líquido que o cerca, proporcionando um aumento contínuo da massa e do diâmetro do canal de plasma, ao mesmo tempo em que reduz a pressão e a temperatura atuantes sobre as cavidades fundidas do par de eletrodos. A Figura 7 ilustra a evolução do tempo de descarga.

Figura 7 – Representação esquemática da fusão de material no ânodo e no cátodo



Fonte: Amorim (2002).

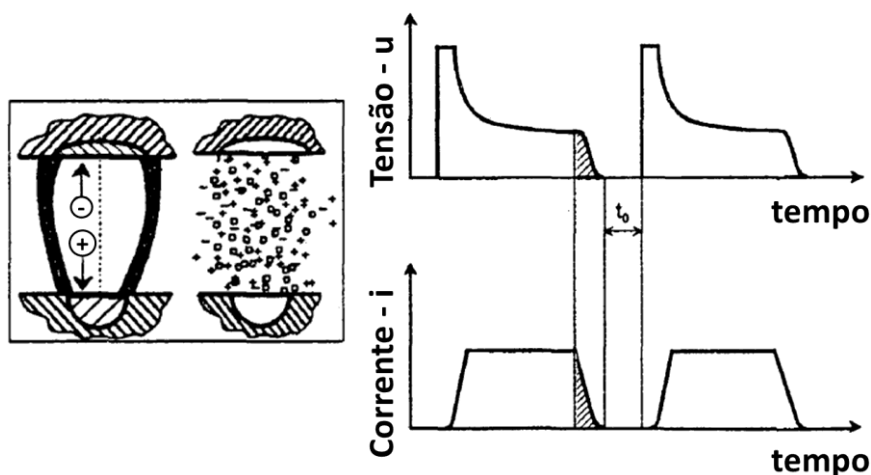
Com o aumento do diâmetro do canal de plasma à medida que a duração da descarga se estende, o diâmetro da poça no cátodo permanece praticamente constante, sendo significativamente menor do que o diâmetro da poça fundida no ânodo. Acredita-se que o menor diâmetro do cátodo se deve à emissão de elétrons por ele, ao passo que o diâmetro do ânodo aumenta continuamente durante a evolução da duração da descarga. À medida que o canal de plasma se expande, a energia dissipada sobre o ânodo diminui, o que leva à solidificação da cavidade fundida nessa região. Por outro lado, a cavidade do cátodo tende a se tornar mais profunda com o avanço da descarga t_e (KLOCKE; KÖNIG, 2007).

Em processos com dielétricos à base de carbono ou eletrodos de grafite, ocorre a carbonetização superficial dos eletrodos, que é a deposição de carbono dissociado do dielétrico sobre as superfícies dos eletrodos pela ação do plasma (FERREIRA *et al.*, 2022). Essa camada de carbono atua como proteção, reduzindo o desgaste do eletrodo e concentrando as faíscas, o que otimiza a eficiência do processo de eletroerosão (FERREIRA; MAIA; AMORIM, 2024).

2.1.1.4 Ejeção do material fundido

No final do tempo de descarga t_e , o sistema de controle do gerador da máquina interrompe instantaneamente a corrente elétrica, estabelecendo um tempo de intervalo t_0 até o início do próximo ciclo de descarga. O colapso do canal de plasma, causado pela interrupção da descarga elétrica, resulta em uma queda abrupta de pressão e na formação de bolhas de vapor no fluido dielétrico, como ilustrado na Figura 8.

Figura 8 – Fim da descarga, extinção do canal de plasma e remoção do material

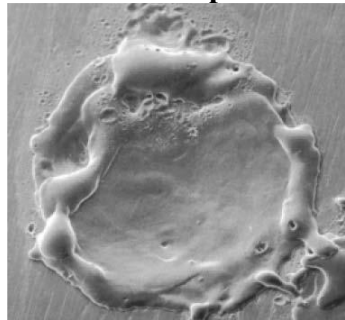


Fonte: Amorim (2002).

Esse fenômeno cria forças térmicas e mecânicas associadas ao superaquecimento, com intensidade para separar uma porção do material fundido das paredes das cavidades. O colapso das bolhas e a rápida queda de pressão no dielétrico causam um efeito semelhante ao da cavitação, removendo o material fundido das superfícies do eletrodo e da peça de trabalho.

Esse processo resulta na formação de pequenas crateras nas superfícies dos eletrodos, como ilustrado na Figura 9. Além disso, a criação da camada refundida sob a cratera também forma bordas ao redor dela. Essas bordas são explicadas pelo efeito Marangoni, um fenômeno de convecção impulsionado pela tensão superficial, conforme descrito por Revaz, Witz e Flukiger (2007).

Figura 9 – Uma cratera produzida em EDM

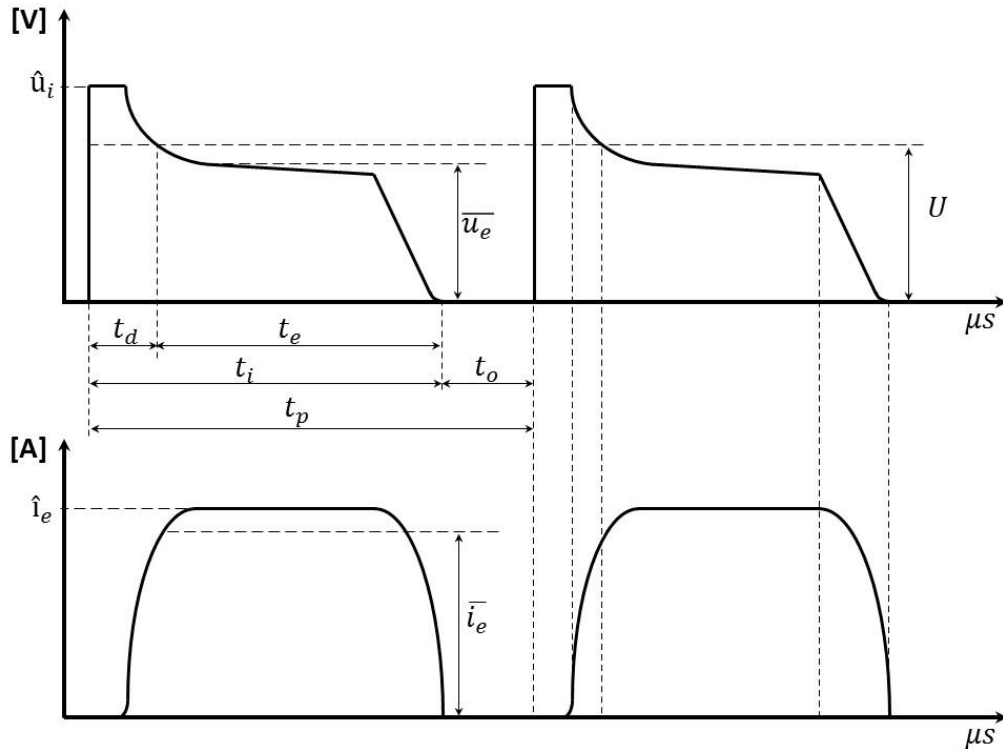


Fonte: Silva (2007).

2.1.2 Parâmetros de controle do processo EDM

A frequência com que a fonte liga e desliga, gerando todo o ciclo da teoria termoeletrica, pode variar entre 10 *kHz* e 30 *kHz*, a depender dos parâmetros utilizados na máquina de EDM e o resultado superficial da peça que se deseja obter (HO; NEWMAN, 2003). A norma alemã VDI 3402 de 1990 descreve os principais parâmetros elétricos de controle do processo de eletroerosão. A Figura 10 apresenta esses principais parâmetros do ciclo de usinagem conforme essa norma.

Figura 10 – Evolução da tensão e corrente elétricas durante a descarga de uma faísca



Fonte: Adaptado de Amorim (2002).

Definições dos parâmetros:

$\hat{u}_i$ – Tensão em aberto [V] – tensão no gap quando não há fluxo de corrente;

$\bar{u}_e$ – Tensão média da descarga [V] – tensão no gap ao longo de uma faísca elétrica;

U – Tensão média de trabalho [V] – média aritmética da tensão no gap durante uma operação de usinagem;

t_d – Tempo de retardo de ignição [μs] – intervalo de tempo desde a aplicação da tensão em aberto $\hat{u}_i$ até o início da descarga;

t_e – Duração da descarga [μs] – período de tempo decorrido após o rompimento da rigidez do dielétrico quando ocorre o fluxo efetivo de corrente;

t_i – Duração do pulso de tensão [μs] – tempo de aplicação de tensão na fenda de trabalho, correspondendo à soma do tempo de ignição t_d e a duração da descarga elétrica t_e ;

t_o – Tempo de intervalo entre dois sucessivos pulsos de tensão t_i [μs];

t_p – Tempo do período do ciclo de uma descarga [μs] – soma da duração do pulso de tensão t_i mais o tempo de intervalo t_o ;

$\hat{i}_e$ – Corrente máxima durante a descarga [A];

$\bar{i}_e$ – Corrente média durante a descarga [A] e;

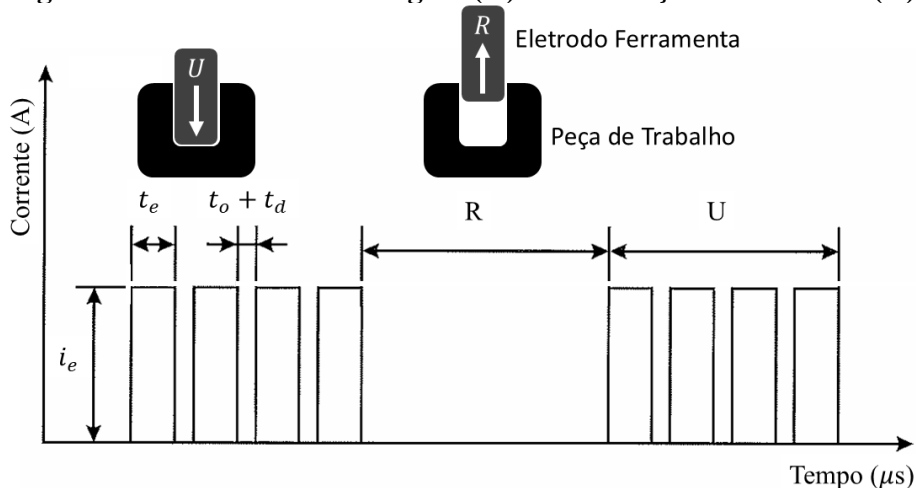
τ – Relação de contato ou “Duty Factor” – razão entre o tempo de pulso t_i e o tempo de

período do ciclo da descarga t_p [μs].

Para garantir uma lavagem eficiente dos detritos e partículas acumuladas no gap e evitar a formação de arcos elétricos, a máquina de EDM pode ser configurada para alternar entre trens de pulsos (U [s]) e períodos de retração do eletrodo (R [s]). Durante o período de retração, o eletrodo é afastado a uma distância da superfície da peça, previamente definida pelo operador, e nenhuma descarga elétrica é realizada.

Esse mecanismo permite que o fluxo do fluido dielétrico limpe o gap, removendo partículas indesejadas. A alternância entre os trens de pulsos U e retração R é essencial para manter a estabilidade do processo e prevenir defeitos na peça usinada. Essa sequência é ilustrada na Figura 11.

Figura 11 - Períodos de usinagem (U) e de retração do eletrodo (R)



Fonte: Elaborado pelo Autor.

Os arcos elétricos, caracterizados por descargas repetidas no mesmo local ou por uma única descarga contínua e prolongada, podem ocorrer devido à alta concentração de partículas no gap ou quando o tempo de intervalo entre dois pulsos sucessivos (t_0) não é suficiente para dissipar essas partículas. Esse fenômeno afeta negativamente a qualidade superficial da peça, produzindo marcas de queimadura ao invés de uma erosão controlada.

Os parâmetros podem ser ajustados em uma ampla faixa de variação, dependendo da capacidade operacional da máquina de EDM e da aplicação específica. Isso permite obter resultados finais desejados, pois o conjunto desses parâmetros influencia a intensidade e a forma como a energia da descarga é aplicada. A potência da energia fornecida por uma faísca no gap de trabalho é dada por $W_e \approx \bar{u}_e \cdot \bar{i}_e \cdot t_e$ [J]. Essa grandeza relaciona com o volume de material removido por descarga e também a qualidade do acabamento superficial da peça (KLOCKE;

KÖNIG, 2007).

A energia de descarga W_e tem uma relação intrínseca com a magnitude do gap de trabalho. Quanto maiores forem os valores de $\bar{u}_e$ e $\bar{t}_e$, maior será a energia da descarga, permitindo que os eletrodos operem a uma maior distância durante a formação da faísca. Isso ocorre porque a resistividade elétrica do dielétrico é superada em níveis mais altos de energia, possibilitando o início da descarga elétrica a distâncias maiores. Por outro lado, energias menores exigem que o eletrodo se aproxime mais da peça para romper a resistência elétrica e iniciar o processo de descarga.

Em operações de desbaste, uma prática comum é definir $\bar{u}_e$ em níveis mais baixos, entre 80 e 120 V, para evitar gaps extremamente grandes em função de altos $\bar{t}_e$, que são empregados para maiores taxas de remoção de material. O equilíbrio de corrente e tensão mantém o plasma da descarga estável, controla a energia e a dispersão das faíscas entre eletrodos, bem como mantém uma lacuna de trabalho adequada para a expulsão dos detritos. À medida que a energia W_e diminui, também diminui a magnitude do gap de trabalho. Assim, nas operações de acabamento, utilizam-se valores mais elevados de $\bar{u}_e$, a fim de promover um gap de trabalho mais adequado para a lavagem dos detritos (AMORIM; WEINGAERTNER, 2005, 2007).

A taxa de remoção de material (V_w) da peça no processo de eletroerosão é um importante parâmetro de desempenho acompanhando na indústria e nas bibliografias. Dados práticos sobre V_w são colocados em catálogos de fabricantes da máquina EDM, com resultados de pesquisa específica para cada equipamento, materiais, parâmetros e dielétricos (SINGH; SINGH; TREHAN, 2021).

Ao ajustar adequadamente as variáveis do processo, é possível alcançar uma remoção de material assimétrica e eficiente entre o ânodo e o cátodo, bem como manter um equilíbrio na fenda de trabalho. Isso resulta em condições estáveis de eletroerosão, melhorando o desempenho da usinagem e reduzindo ou eliminando a ocorrência de arcos e curtos-circuitos (KAHNG; RAJURKAR, 1977).

Para avaliação do rendimento tecnológico do processo, são quantificados alguns aspectos:

V_w – Taxa de remoção de material [m^3/mim ou kg/mim] – que caracteriza o volume de material removido da peça ao longo do tempo de usinagem;

V_e – Taxa de desgaste [m^3/mim ou kg/mim] – que representa o volume de material desgastado do eletrodo durante o tempo de usinagem;

ϑ – Desgaste relativo [%] – que expressa o desgaste volumétrico relativo entre os

eletrodos e a peça de trabalho. Esse valor é obtido calculando a razão entre V_e e V_w , apresentado em porcentagem.

A correlação entre os parâmetros do processo e o desempenho da usinagem em EDM é desafiadora, dada a variabilidade das propriedades térmicas e físicas dos materiais. Uma abordagem para lidar com essa complexidade é o conceito de Energia de Descarga Específica (SDE – *Specific Discharge Energy*), proposto por Liao e Yu (2004). Valores reduzidos de SDE indicam processos mais eficientes, com menor desgaste relativo e maior taxa de remoção de material.

Outro fator determinante é a Eficiência de Lavagem do Plasma (PFE – *Plasma Flushing Efficiency*), definida como a razão entre o volume efetivamente removido por pulso e o volume teoricamente fundido (MING *et al.*, 2022). Devido às perdas energéticas associadas à fusão do dielétrico e à ocorrência de arcos e curtos-circuitos, o PFE é inevitavelmente inferior a 100%. Estudos de Shabgard *et al.* (2013) na usinagem de aço AISI H13 com eletrodo de cobre demonstraram que o aumento da corrente e a redução do tempo de pulso (t_i) elevam o PFE da peça, enquanto para o eletrodo, a diminuição de t_i é o principal fator de incremento, com influência menos pronunciada da corrente elétrica.

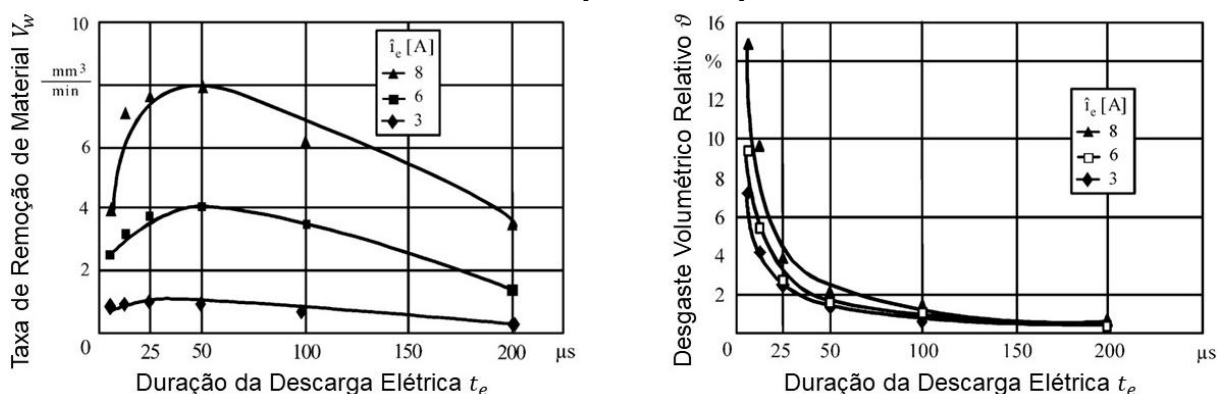
Em EDM, pulsos de maior duração (t_i) reduzem a eficiência energética e formam camadas refundidas mais espessas, evidenciando que, sob energia excessiva, a fração efetiva da energia aplicada na remoção de material diminui (MING *et al.*, 2021; SHABGARD *et al.*, 2013). De modo semelhante, o aumento da corrente (i_e) exige a ampliação do tempo de pulso para maximizar a taxa de remoção, já que plasmas de baixa energia não geram pressão suficiente para expulsar o material fundido (DIBITONTO *et al.*, 1989).

A eficiência do processo depende também do fator de distribuição (F_c), que representa a fração da energia absorvida pela peça de trabalho. Como a capacidade de absorção varia entre materiais, F_c não é universal, sendo sua determinação fundamental para materiais como o aço AISI H13, amplamente utilizado em moldes e matrizes. Huang *et al.* (2017) demonstraram experimentalmente que materiais com valores semelhantes de SDE apresentam desempenho de usinagem comparável: taxas de remoção mais elevadas estão associadas a SDE menores, embora com qualidade superficial inferior.

Amorim e Weingaertner (2005) elucidam em seus resultados o comportamento da eficiência da eletroerosão em função dos parâmetros do processo com eletrodo de cobre positivo e peça de aço AISI P20 negativa. Conforme apresentado na Figura 12, a taxa de remoção de material (V_w) aumenta com o aumento da corrente, devido à proporcionalidade entre

V_w e a energia de descarga (W_e). Além disso, verifica-se que V_w atinge um máximo com o aumento da duração da descarga (t_e), seguido de uma redução. Isso ocorre porque, para pequenos valores de t_e , há pouca fusão de material, enquanto para valores maiores de t_e , a densidade de energia diminui com o aumento do diâmetro do canal de plasma, resultando em menor pressão sobre o material fundido no momento do colapso da faísca.

Figura 12 – Taxa de Remoção de Material (V_w) e Desgaste Volumétrico Relativo (ϑ) em eletrodos com polaridade positiva



Fonte: Adaptado de Amorim e Weingaertner (2005).

Por outro lado, o desgaste volumétrico relativo (ϑ) aumenta com o aumento da corrente, o que pode ser atribuído à baixa resistência do cobre ao desgaste térmico. A redução de ϑ com o aumento de t_e está ligada ao aumento do diâmetro do canal de plasma em descargas mais longas. Esse aumento reduz a densidade de energia concentrada no eletrodo, diminuindo a intensidade do desgaste térmico no cobre. Além disso, o aumento do diâmetro do canal reduz a pressão no material fundido, resultando em menor desgaste do eletrodo ao longo do tempo, contribuindo para uma redução do desgaste relativo.

Nas operações de acabamento de EDM, um dos objetivos é alcançar a melhor rugosidade da peça com um baixo nível de desgaste volumétrico relativo (ϑ). Amorim e Weingaertner (2007) apresentam que a razão entre a duração do pulso (t_i) e o tempo de ciclo do pulso (t_p) deve ser escolhida de forma a gerar estabilidade nas descargas elétricas. Para $t_i < t_o$, são geradas frequências de descargas muito baixas, diminuindo a taxa de remoção de material da peça, sem ganhos expressivos em outros parâmetros de performance. Contudo, para $t_i > t_o$, observa-se a propensão de concentração excessiva de detritos no gap de trabalho, levando a uma remoção não uniforme de material ao longo das superfícies frontais da ferramenta e da peça, bem como a um possível aumento da rugosidade. Uma boa estabilidade é observada no EDM para condições $t_i = t_o$, pouca ocorrência de curtos-circuitos e arcos

elétricos, e tempo para a remoção adequada das partículas erodidas para longe do gap de trabalho antes do próximo ciclo de descargas.

A qualidade da textura superficial das peças usinadas por eletroerosão é geralmente analisada pelos parâmetros de rugosidade $R_a[\mu m]$ e $R_z[\mu m]$, conforme descrito na norma alemã VDI 3402 de 1990. Esses parâmetros medem as variações do relevo das superfícies, sendo amplamente utilizados para caracterizar o acabamento superficial (RIFFEL, 1992).

Os aspectos superficiais são influenciados por diversos ajustes operacionais da máquina EDM, como o tempo de duração dos períodos de trabalho e intervalo, a intensidade da corrente, a magnitude da voltagem, a frequência, a polaridade, o tamanho do gap, os materiais do eletrodo e da peça, além do tipo de fluido dielétrico utilizado. Os melhores acabamentos superficiais na eletroerosão são alcançados ao operar com valores reduzidos de ciclo de descarga t_p e baixas correntes elétricas (EL-HOFY, 2005; ZEILMANN; IVANINSKI; WEBBER, 2018).

A escolha da polaridade em EDM é um parâmetro fundamental, influenciando as taxas de remoção de material da peça e o desgaste do eletrodo. As combinações ideais de polaridade para diferentes pares de materiais são apresentadas na Tabela 1, conforme a ASM (Sociedade Americana de Metais).

Tabela 1 – Polaridades de eletrodos para materiais de peças diferentes

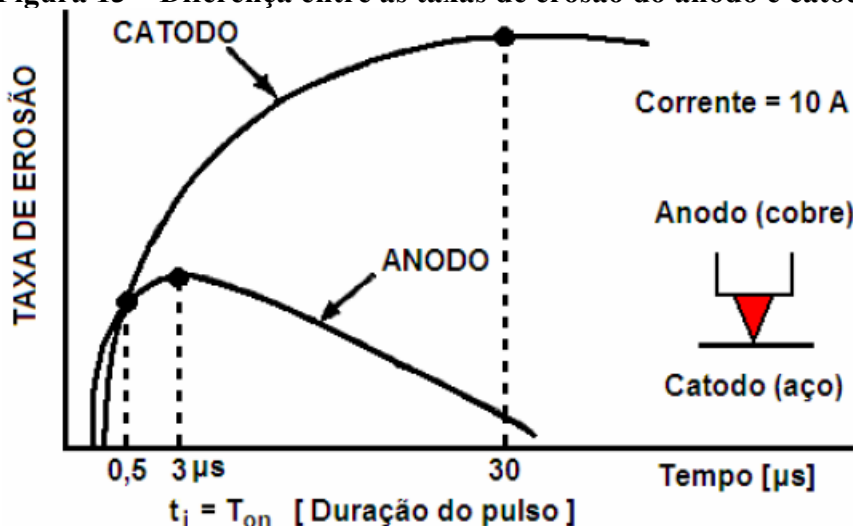
Material do Eletrodo	Material da Peça				
	Aço	Tungstênio	Cobre	Alumínio	Ligas Ni-base
Grafite	+, -	-	-	+	+, -
Cobre	+	+, -	-	+	+
Cu-W	+	+, -	-	+	+
Aço	+, -	+	-	-	-
Latão	-	-	NA	+	-

Fonte: ASM Handbook (1989).

A variação da taxa de remoção de material em função da polaridade está relacionada à dinâmica das partículas no plasma. Elétrons, devido à sua baixa massa, possuem alta mobilidade, promovendo intenso bombardeamento no ânodo logo no início da descarga. Já os íons positivos, por sua maior massa e inércia, demoram a atingir velocidade suficiente para impactar significativamente o cátodo (SANTOS, 2010). Assim, em descargas curtas (pequenos t_i), a fusão de material predomina no ânodo, enquanto em pulsos mais longos, o aumento do bombardeamento iônico favorece a fusão também no cátodo.

Dibitonto et al. (1989) ressaltam o fenômeno de mobilidade dos elétrons e íons positivos na eletroerosão, utilizando eletrodo de cobre e peça de aço. Para tempos de duração de pulso t_i menores que $0,5\mu s$, a taxa de remoção do cátodo (peça de aço) tende a ser menor que o desgaste do ânodo (eletrodo de cobre). Para t_i curtos, como de $0,5\mu s$, ocorrem taxas de erosão similares nas duas superfícies. Porém, para tempos maiores que $0,5\mu s$ e mais longos, como $30\mu s$, a taxa de remoção do cátodo tende a ser maior que o desgaste do ânodo, cenário desejado. Isso é válido para a condição de usinagem com polaridade positiva no eletrodo e a peça com polaridade negativa, ilustrado na Figura 13.

Figura 13 – Diferença entre as taxas de erosão do ânodo e cátodo



Fonte: Dibitonto et al. (1989).

As diferenças decorrem da formação assimétrica do canal de plasma: no ânodo, a rápida expansão do plasma reduz a densidade de energia e favorece a ressolidificação parcial do material ainda durante a descarga (PATEL *et al.*, 1989). No cátodo, o canal de plasma permanece mais concentrado, favorecendo a ejeção eficiente do material fundido. Como consequência, superfícies obtidas no cátodo exibem maior rugosidade em altos t_i , enquanto o ânodo apresenta texturas mais lisas (DIBITONTO *et al.*, 1989).

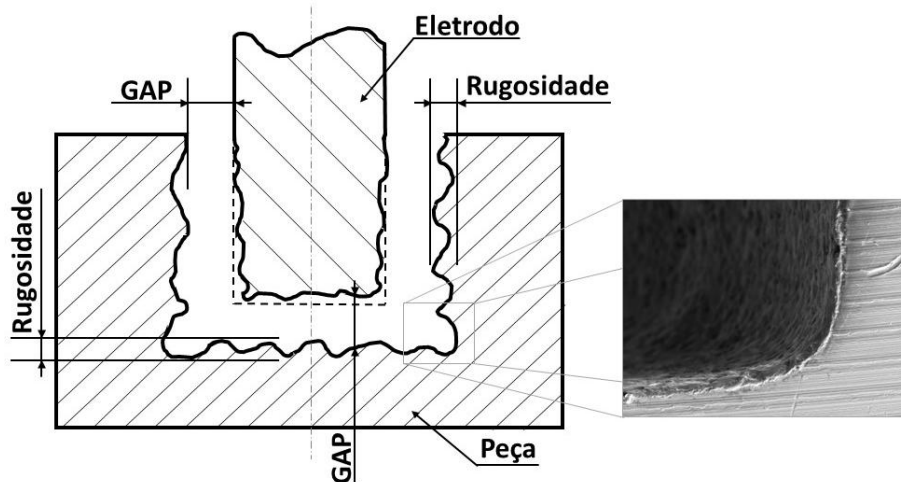
Karthikeyan, Kathiresan e Suja (2024) destacam que, em pulsos curtos ($< 5\mu s$), a remoção no cátodo é influenciada predominantemente pela força eletrostática, que redistribui tensões superficiais e facilita a expulsão do material. Em pulsos longos ($100 > \mu s$), o derretimento térmico passa a ser o mecanismo dominante na formação da cratera.

2.1.3 Influências Dinâmicas no EDM

Em teoria, a descarga deveria sempre ocorrer no ponto mais estreito do gap de trabalho, possibilitando que a forma da ferramenta fosse copiada para a peça com a precisão desejada. Contudo, durante o processo de EDM, Zhang et al. (2015a) destacam que a presença de detritos e bolhas no líquido dielétrico aumenta o gap entre eletrodos, além de afetar a localização das descargas no processo real de EDM.

A aleatoriedade das descargas elétricas permite que faíscas ocorram em diferentes gaps entre os eletrodos. Os cavacos gerados no interior do orifício usinado por descargas anteriores, ao serem empurrados do fundo da cavidade para fora pelo gap, podem provocar descargas adicionais e indesejadas nas superfícies laterais já usinadas da peça. Esse fenômeno remove material de forma não intencional, comprometendo o dimensionamento e o acabamento superficial desejados. É, portanto, crucial selecionar adequadamente o processo de lavagem para garantir a remoção eficiente dos cavacos e minimizar esse efeito indesejado, especialmente à medida que a profundidade na peça ou o rigor dimensional aumentam. O gap de trabalho, assim, é formado tanto nas laterais quanto no ponto mais fundo da peça em contato com o eletrodo, à medida que ocorre a remoção de material, conforme apresentado na Figura 14.

Figura 14 – Demonstração do Gap de trabalho e rugosidade em torno do eletrodo e peça



Fonte: Adaptado de Sabo (2008).

No processo de EDM, a energia térmica gerada pela faísca é distribuída entre o eletrodo-ferramenta, a peça de trabalho e o gap de trabalho. Em cada processo de descarga pulsada, apenas uma fração da energia total de entrada é alocada à peça de trabalho, resultando no aumento da temperatura desta e na remoção de material. Para melhorar a eficiência energética, é desejável que uma alta proporção da energia seja distribuída para a peça de trabalho no processo de EDM. Na eletroerosão, a energia total de descarga (F) deve satisfazer a seguinte Equação (1):

$$F = F_C + F_T + F_G = 100\% \quad (1)$$

Onde F_C e F_T são as proporções de distribuição de energia para a peça de trabalho e o eletrodo-ferramenta, respectivamente, e F_G é a fração de energia consumida no gap de trabalho. Em simulações de múltiplas centelhas, alguns autores aplicam uma proporção de distribuição de energia transferida para o cátodo de 3% a 34%, enquanto para o ânodo, essa proporção pode variar entre 8% e 48%. O restante da energia, de 18% a 89%, é perdido durante as descargas (MING *et al.*, 2022).

Em estudos sobre eletroerosão, é comum utilizar simulações e ensaios experimentais com um único pulso de descarga elétrica. Contudo, é amplamente reconhecido que, quando se trata de uma sequência de pulsos, a interação entre eles, juntamente com a presença de bolhas de gás, detritos e a variação dinâmica da temperatura durante o processo, influencia significativamente os comportamentos e os resultados do processo. A sequência de pulsos cria um ambiente mais complexo, afetando o resfriamento, a remoção de material e a formação da camada refundida. Considerar todas essas influências é essencial para compreender de forma precisa o processo de EDM, possibilitando melhorias na qualidade das peças usinadas e no entendimento dos mecanismos envolvidos.

Embora as máquinas de EDM cada vez mais ofereçam tabelas tecnológicas baseadas em normas técnicas, entregando aspectos de desempenho esperados, como taxa de remoção de material e textura superficial, é importante destacar que esses testes são realizados em condições ideais, utilizando materiais padronizados. Na prática industrial, as condições de usinagem podem variar amplamente. Portanto, para obter resultados confiáveis em condições de usinagem realistas, os fabricantes ou usuários da máquina devem desenvolver testes adicionais para cada tipo de trabalho específico, considerando a geometria da cavidade, o tipo de dielétrico, o material da peça e outros parâmetros não elétricos (AMORIM; WEINGAERTNER, 2005).

Observado que o processo de EDM envolve uma série de fenômenos de diferentes naturezas que ocorrem continuamente durante a usinagem, como aquecimento, fusão, evaporação, arrancamento, solidificação de materiais, formação de trincas na camada refundida, além de transformações térmicas e difusão na Zona Termicamente Afetada (ZTA). Esses eventos, que ocorrem de forma discreta, em alta frequência e cujas intensidades e quantidades variam conforme os parâmetros de usinagem, o dielétrico e os materiais envolvidos, são fontes significativas de Emissão Acústica (EA). A riqueza de informações

contida nesses sinais apresenta enorme potencial para o monitoramento do processo, permitindo o acompanhamento em tempo real sem interferir na operação.

2.2 Emissão acústica

A Emissão Acústica se tornou uma técnica de ensaio não destrutivo no monitoramento de falhas estruturais e em diversos processos de fabricação com alto padrão de qualidade. Com a combinação de tecnologia e automação, a EA surge como uma estratégia promissora na prevenção e predição de falhas e fenômenos durante processos, identificando-os em estágios muito iniciais, antes que uma estrutura venha a fragilizar ou falhar completamente, permitindo intervenções preventivas (ANAHID; NIKNAM, 2024).

Várias formas de sinais acústicos podem ser geradas por excitações, por um ou mais evento em um material ou processo. Os espectros provenientes dos sinais coletados dependem de diversos fatores, como por exemplo a distância entre a localização do evento e os sensores. É importante entender que sinais de emissão acústica podem levar a interpretações equivocadas caso não se utilize um método robusto para identificação e classificação das suas fontes. Uma vez que técnicas de distinção e de associação do fenômeno estudado ao correto sinal observado é dominada, a aceitabilidade e a assertividade no uso de técnicas de emissão acústica aumentam significativamente (RAJENDRA *et al.*, 2011).

As fontes de emissões acústicas podem ter características amplamente variáveis. Essas diferenças ficam nítidas com o correto processamento e análise dos dados, permitindo identificar se as fontes são artificiais ou naturais, com origens internas ou externas ao objeto testado. Emissões contínuas, produzidas, por exemplo, durante o corte de um metal ou por fricção em rolamentos rotativos, apresentam características de sinal muito diferentes quando comparadas aos sinais gerados por uma ruptura, resultantes da liberação espontânea de energia durante a propagação de trincas ou rachaduras (MILLER; MCINTIRE, 1987).

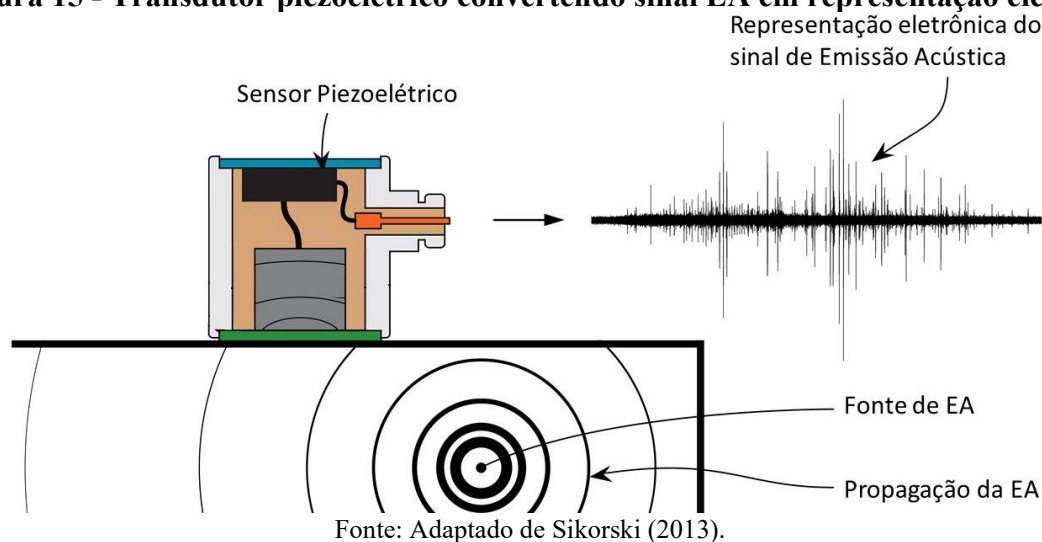
A emissão acústica é frequentemente usada para inspeção, monitoramento e detecção de falhas em materiais e estruturas, como metais, concreto, compósitos, entre outros. Além disso, o monitoramento de emissões acústicas contínuas pode ser aplicado no controle da operação de máquinas, estruturas sob carregamento e no diagnóstico de equipamentos do setor elétrico. Entretanto, a localização e o isolamento da fonte da emissão podem ser desafios significativos. Outra aplicação promissora é o monitoramento do desgaste de ferramentas, contribuindo para melhorias na eficiência do processamento e redução dos custos de produção (HUANG *et al.*, 2023).

As emissões se dão por ondas elásticas que são geradas devido a uma variação espontânea de energia em um estado sólido liberada em função de uma mudança local, dinâmica e irreversível da microestrutura do material. Ou seja, ondas de energia ou, mais propriamente, uma onda de tensão que viaja através do material como resultado de alguma repentina liberação de energia (YAO *et al.*, 2025).

A EA ocorre por sinais acústicos (ondas elásticas) emitidos durante a propagação de discontinuidades e deformações plásticas acentuadas no material. Essas ondas são geradas quando discontinuidades ativas na estrutura, sob aplicação de carga, liberam energia devido ao rearranjo do campo de tensões na ponta das discontinuidades (GÉA, 2015).

Quando ocorre uma deformação no material, seja por corte, atrito, trincas ou outros fatores, sua estrutura sofre um desarranjo que tende a se rearranjar. Esse rearranjo gera ondas vibracionais que se propagam à velocidade do som. Os sinais podem ser captados por meio de transdutores (sensores) que convertem sinais mecânicos em elétricos, como apresenta a Figura 15. As técnicas de emissão acústica são geralmente aplicadas para distâncias entre o receptor e a fonte de até várias dezenas de metros, mas a amostra também pode ser menor, de milímetros (AGUIAR, 2004).

Figura 15 - Transdutor piezoelétrico convertendo sinal EA em representação elétrica



Fenômenos naturais como terremotos, avalanches, deslizamentos de terra e propagação de trincas no gelo podem ser monitorados por meio da análise de EA. Esta técnica é uma das mais antigas para monitoramento de componentes aplicado por engenheiros práticos, onde o ruído audível produzido quando alguns materiais são deformados, especialmente sob condições de trabalho, fornece aviso avançado de falha.

Em 1950, o alemão Joseph Kaiser já observava que a atividade de emissão acústica era em grande parte irreversível. Uma vez que um pedaço de metal tenha sido carregado para um determinado nível de tensão, as emissões não serão geradas no recarregamento subsequente a menos que o nível máximo de tensão anterior seja excedido. Este fato, então denominado como "efeito Kaiser", tem considerável valor prático na interpretação da resposta de emissão acústica (AMARAL, 2015).

No início de 1960, estudos de EA dos metais avançaram nos Estados Unidos. Schofield (1961) realizou ensaios em várias ligas com o objetivo de determinar a fonte da emissão. Ele diferenciou as emissões do tipo 'contínuo' e 'transiente'. A emissão contínua foi associada à dinâmica de deslocamento de defeitos, embora esta emissão seja um nome impróprio, dado a um grande número de eventos discretos que ocorrem em um curto período de tempo. Já a emissão transiente foi associada a falhas de empilhamento ou maclação. No entanto, a nucleação e a propagação de trincas também podem gerar este segundo tipo de emissão.

A abertura e crescimento de trincas, coalescência de vazios, maclação, movimentos de discordâncias, mudanças de fase, fusão ou solidificação do material são todas fontes de emissão acústica em aços. A maioria dessas fontes está relacionada ao dano, sendo a detecção e o monitoramento dessas emissões comumente usados para prever falhas (LEDECZI *et al.*, 2009).

Em sua maioria, as emissões acústicas em metais podem ser agrupadas em três principais fontes geradoras. A primeira abrange mecanismos que induzem deformação plástica, associados a processos como movimento de deslocamentos, deslizamento de contornos de grão e maclação. A segunda envolve mecanismos relacionados a transformações de fase de primeira e segunda ordem, como transformações polimórficas que incluem modificações martensíticas; formação de partículas de segunda fase pela decomposição de soluções sólidas supersaturadas; transições de fase em materiais magnéticos e supercondutores; além de fenômenos magnéticos e mecânicos causados por mudanças de contornos e reorientação de domínios magnéticos sob variação de campos magnéticos externos. A terceira fonte está ligada a mecanismos de dano, incluindo a origem e acúmulo de microdefeitos, surgimento e crescimento de trincas e danos corrosivos, como trincas induzidas por corrosão (MAIA, 2015).

Uma das principais vantagens das técnicas de EA é a possibilidade de observar os fenômenos de dano nos materiais testados durante o processo em análise, sem causar qualquer interferência no mesmo. Outras vantagens da técnica incluem a faixa de frequência produzida pela excitação, que ultrapassa 10 kHz, excedendo diversos ruídos oriundos de interferências. Além disso, a flexibilidade de aplicação da técnica permite sua utilização em diferentes áreas, como em equipamentos de engenharia (MARNET *et al.*, 2018).

Uma desvantagem é que um teste particular não é perfeitamente reproduzível devido à natureza da fonte do sinal, por exemplo, a formação repentina e aleatória de uma fissura. Embora as amostras com o mesmo formato e as mesmas propriedades do material devam causar atividades EA semelhantes sob operação, nem sempre é possível. Materiais com heterogeneidades dispersas em dimensões específicas, como concreto, não apresentam resultados de emissão semelhantes quando o comprimento de onda dos sinais é comparável ao tamanho dessas heterogeneidades (GROSSE; OHTSU, 2008).

Um método que possibilite monitorar o espectro de onda e determinar o instante exato da produção do evento seria ideal para o acompanhamento dos sinais de emissão acústica nos mais diversos processos. Ademais, como a EA é uma avaliação não destrutiva, ela pode ser utilizada para monitorar as operações de usinagem, fornecendo informações do processo ao operador. O benefício de utilizá-la como monitor de processo é que a faixa de frequência da emissão acústica é muito maior do que a das vibrações da máquina e do som acústico ambiente (KUMAR *et al.*, 2018).

Ao considerar a aplicação da EA em outro processo de fabricação, como a eletroerosão, destaca-se que a forma geométrica do eletrodo ou da peça de trabalho não influencia os fenômenos e, consequentemente, as emissões geradas pelo processo. Dessa forma, a aplicabilidade e a reprodutibilidade de estudos de EA em EDM podem ser amplamente analisadas e comparadas, mesmo em diferentes contextos de parâmetros, máquinas ou localidades de usinagem (AMORIM; WEINGAERTNER; BASSANI, 2010).

Vários fatores impactam significativamente a emissão acústica no processo de eletroerosão, como o fluido dielétrico, a configuração do sistema de lavagem, os materiais da peça e do eletrodo, além dos parâmetros de usinagem, incluindo tempo de descarga, corrente elétrica, tensão e polaridade. Essas variáveis influenciam diretamente a duração e a intensidade dos fenômenos de remoção de material e, consequentemente, as emissões acústicas geradas (FERREIRA; MAIA; AMORIM, 2024).

Smith e Koshy (2013) demonstraram que a distribuição espacial das descargas na usinagem EDM fornece informações valiosas, que não são acessíveis com precisão por sinais elétricos, amplamente utilizados para monitoramento e controle do processo. A aplicação de emissão acústica foi explorada para mapear essas descargas, considerando o intervalo de tempo acústico. Contudo, em condições comuns de EDM, descargas sucessivas geram interferências no sinal acústico, dificultando a estimativa precisa do atraso de tempo.

A pesquisa destaca a evolução temporal do conteúdo de frequência, utilizando a intensidade máxima no espectrograma do sinal de EA como referência para determinar o

intervalo de tempo acústico. A prova de conceito reforça o potencial do mapeamento de descargas por EA na identificação detalhada das dimensões físicas do par de eletrodos, como o comprimento do eletrodo e a altura da peça, além de fornecer informações sobre o estado do sistema durante a usinagem, contribuindo para maior precisão e controle do processo.

Klink et al. (2016) apresentam em um trabalho que a EA fornece um complemento de sinais para o monitoramento e controle de processos de EDM. Foram investigadas formas de onda da EA em descargas únicas e sequenciais, considerando parâmetros de pulso, materiais das ferramentas e dielétricos, com o objetivo de mapear os comportamentos do sinal. Esses sinais foram interpretados em termos das forças de descarga e da dinâmica das bolhas de gás, observadas por meio de imagens de alta velocidade no gap entre eletrodo e peça.

O sinal de EA foi identificado como um reflexo da energia disponível dentro das bolhas de gás, contendo características associadas à pressão gerada pela rápida expansão da bolha, seguido por vários ciclos de colapso e rebote. Experimentos com descargas sequenciais sustentaram a teoria da deposição de carbono pirolítico no eletrodo, cuja ocorrência depende da polaridade, do fluido dielétrico e do tempo de pulso ativo. Este trabalho destacou o potencial significativo da EA em ampliar o entendimento teórico sobre o processo de usinagem por eletroerosão.

Agregando, Kozochkin et al. (2016) também apresentam um estudo sobre a usinagem por eletroerosão acompanhada por sinais de emissão acústica. O estudo demonstra, experimentalmente, que os sinais acústicos permitem avaliar a eficiência dos pulsos de corrente fornecidos e o ajuste tecnológico ótimo. Além disso, apontam que o monitoramento dos sinais de EA e da corrente elétrica oferece a base para a criação de um sistema de controle multiparamétrico no EDM, cujo desempenho supera o dos sistemas de controle baseados apenas nos parâmetros elétricos.

No estudo de Yang et al. (2022), foi proposto um modelo de rede neural convolucional temporal de relevância de batch (BRTCN) para identificar e prever diferentes estados de descarga, como descargas normais e anormais, na eletroerosão a fio (WEDM) com base na emissão acústica. A importância dos sinais de EA no monitoramento dos processos de WEDM é destacada, devido à sua capacidade de fornecer informações detalhadas e em tempo real sobre o estado da máquina. Resultados experimentais demonstraram a estabilidade da convergência do modelo, com uma acurácia de 58,08%, destacando o modelo BRTCN como uma abordagem promissora para a detecção do status de descarga no EDM com base em sinais de EA.

Ferreira et al. (2022) compartilham um trabalho sobre o uso de sinais de emissão acústica como identificadores de mecanismos de desgaste de eletrodos de cobre eletrolítico e

da qualidade superficial em peças de aço AISI H13 na eletroerosão para diferentes parâmetros de usinagem. Nesse contexto, os sinais foram analisados por meio das técnicas de Transformada de Fourier de Tempo Curto (STFT), Valor Eficaz (RMS) e Entropia de Shannon (também chamada de Entropia Espectral), demonstrando que os sinais de EA apresentam alta sensibilidade aos parâmetros de usinagem, à taxa de desgaste e, consequentemente, à qualidade superficial das peças de trabalho.

O estudo de Yao et al. (2025) investiga a assinatura do processo de micro-EDM no domínio de radiofrequência (RF) como uma alternativa não invasiva e de baixo custo para o monitoramento do estado de descarga. O trabalho explora as fontes de emissão de RF e os fatores que influenciam a radiação eletromagnética durante o processo de EDM, propondo modelos equivalentes de radiação para diferentes fases da descarga. Os resultados demonstraram que a intensidade da radiação de RF está diretamente relacionada à tensão de ruptura e à corrente de gap, enquanto os parâmetros de usinagem não afetam significativamente o espectro de radiação. Além disso, foi evidenciado que a escolha do dielétrico e do material da peça influencia o comportamento da radiação devido à variação da resistência equivalente do circuito de descarga. Assim, o estudo amplia o conhecimento sobre o EDM ao introduzir um novo método não invasivo de monitoramento que se soma às abordagens baseadas em emissão acústica (EA) e sinais elétricos, contribuindo para o desenvolvimento de sistemas de controle multiparamétricos e monitoramento inteligente do processo.

Grande parte da pesquisa em tecnologia de EA concentra-se no desenvolvimento de sistemas inteligentes para controle de ferramentas e processos. Estudos sobre fluxos de energia, utilizando sinais de emissão acústica, demonstram que esses sinais podem ser registrados de forma confiável tanto na peça quanto no eletrodo durante a eletroerosão. Com base na variação das respostas dos sinais de emissão acústica, é possível avançar com controle dos parâmetros do processo, aumentando a taxa de remoção de material, reduzindo desgaste do eletrodo e promovendo a qualidade projetada da peça. No entanto, ainda há necessidade de avanços no processamento de sinais EA para viabilizar a supervisão e o controle em tempo real do processo de usinagem.

2.3 Processamento de sinais

O processamento digital de sinais, ou simplesmente processamento de sinais, refere-se à extração de recursos e informações de sinais medidos. Essa abordagem teve início na década de 1950, com o advento da tecnologia dos computadores digitais, e foi consolidada nos anos

1970 e 1980, com a introdução de circuitos integrados, como semicondutores e microprocessadores (AKAN; KARABIBER CURA, 2021).

Ao longo dos anos, as técnicas, códigos e algoritmos para processamento de sinais evoluíram continuamente, atendendo às demandas de análises e processos, além de possibilitar resultados inéditos. Esse desenvolvimento abrange diversos tipos de sinais, como imagens, vibrações, emissões acústicas, ondas de rádio e sinais de voz, entre outros. Para isso, foi desenvolvida uma ampla variedade de métodos de processamento, tanto no âmbito teórico quanto na aplicação prática, voltados para diferentes tipos de sinais.

Dessa maneira, os requisitos computacionais para o processamento de sinais aumentam proporcionalmente à crescente demanda por soluções mais eficiente. Em contrapartida, os custos de implementação de métodos avançados de processamento têm sido compensados pela tendência de aumento do desempenho computacional nos últimos anos, juntamente com a simultânea redução nos custos de hardware (BOLLEN; GU, 2006).

De modo geral, sinais representam informações que podem ser transmitidas ou processadas. Fisicamente, eles são captados por sensores ou transdutores, que os transformam em sinais de tensão ou corrente, permitindo sua manipulação por processadores. Uma visão matemática indica que todo sinal pode ser representado como uma função em um domínio, como o tempo, frequência ou outros domínios possíveis. Essa característica faz com que seja chamado de sinal contínuo ou, mais comumente na engenharia, de sinal analógico (NALON, 2009).

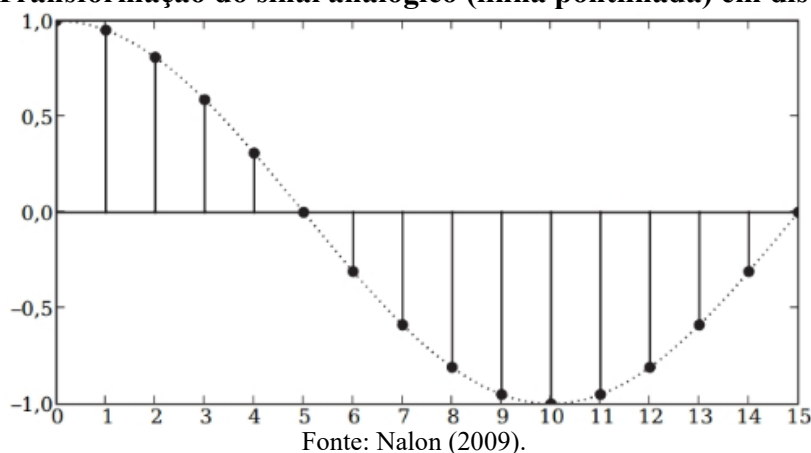
Outra definição para sinal, de modo geral, é a de uma grandeza física variável no tempo, como tensão, corrente, aceleração de um corpo ou pressão em um ponto do espaço. Essas grandezas carregam informações, geralmente sobre o estado ou comportamento de um sistema físico (SAMPAIO; CATALDO; BRANDÃO, 2006).

Vaseghi (2008) ressalta que um sinal é um meio de transmitir informações sobre o passado, o estado atual ou o futuro de uma variável. Assim, a informação transmitida em um sinal pode ser usada por humanos ou máquinas, como computadores ou robôs para comunicação, previsão, tomada de decisão, controle, exploração geofísica, diagnóstico médico, entre outros.

Os sinais de engenharia são por natureza contínuos no tempo, consistindo teoricamente em uma sequência infinita de pontos. Para seu processamento, esses sinais são digitalizados, se passando por um processo conhecido por amostragem e são transformados numa sequência finita de pontos discretos (Conversão Analógicos / Digitais ou simplesmente conversores A/D). Pode-se observar um exemplo do processo de transformação do sinal analógico contínuo (linha

pontilhada) em um sinal discretizado na Figura 16 (NALON, 2009).

Figura 16 – Transformação do sinal analógico (linha pontilhada) em discreto (pontos)



O efeito decorrente devido à amostragem do sinal é visível, o sinal discretizado é uma reprodução grosseira do sinal original. A qualidade da discretização além de ser influenciada pelo aparato tecnológico utilizado, também sofre pela quantidade de pontos coletados para o mesmo intervalo de tempo coletado. Desta forma, é fundamental ter conhecimento do sinal em estudo e as limitações do equipamento utilizado para obter resultados válidos.

Uma das vantagens de transformar um sinal contínuo em um sinal discreto é adequar o tamanho do sinal à capacidade de memória dos processadores. A memória do processador, por maior que seja, é sempre finita, assim como sua capacidade de processamento (PINHEIRO; MACHANDO; FERREIRA, 2017).

Cada grandeza possui o método ou a instrumentação mais adequada para sua captação, tratativa e, posteriormente, a análise dos dados obtidos. Um sinal pode ser uma função de uma única dimensão, definida por uma única variável. Alternativamente, pode ser multidimensional, representando uma função de variáveis como tempo, localização no espaço, temperatura, entre outras.

Os métodos de processamento de sinal são fundamentais para a comunicação e o desenvolvimento de interfaces. Em geral, o processamento digital de sinais está relacionado a duas grandes áreas da teoria da informação. A primeira envolve codificação, transmissão, recepção, armazenamento e reprodução eficientes e confiáveis de sinais em sistemas de comunicação, como telefones, rádio e TV. A segunda está ligada à teoria da informação, que abrange a extração de informações de sinais ruidosos e/ou incompletos para reconhecimento de padrões, detecção, previsão, tomada de decisão, aprimoramento de sinal, controle, automação e mecanismos de busca.

Esses métodos de processamento viabilizam a aplicação de diversas ferramentas para modelagem, análise, codificação e reconhecimento de padrões. Entre esses métodos, destacam-se as transformadas, que permitem transcrever sinais entre diferentes domínios, ampliando as possibilidades de interpretação e análise. A seguir, serão apresentados temas fundamentais do processamento de sinais, abrangendo desde conceitos de aquisição de dados até análises frequentemente empregadas para promover e comparar resultados válidos e fundamentados no contexto de emissão acústica (PINHEIRO; MACHANDO; FERREIRA, 2017).

2.3.1 Teorema da amostragem

O físico e engenheiro sueco Harry Nyquist apresentou, em 1928, os fundamentos iniciais do que viria a ser conhecido como teorema da amostragem. Duas décadas depois, entre 1948 e 1949, o matemático e engenheiro americano Claude E. Shannon publicou artigos revolucionários que consolidaram a teoria da informação e formalizaram o teorema, que passou a ser conhecido como “Teorema da Amostragem de Nyquist-Shannon” (NEMIROVSKY; SHIMRON, 2015).

Esse teorema, aplicado ao campo do processamento de sinais, funciona como uma ponte essencial entre sinais contínuos no tempo e sinais discretos no tempo. Ele estabelece a condição suficiente para a taxa de amostragem de uma aquisição que preserve todas as informações de um sinal contínuo de largura de banda finita.

A aquisição de dados, ou taxa de aquisição de dados, refere-se ao número de coletas realizadas em um sinal contínuo ao longo de um período de tempo. Na maior parte das vezes, a taxa de aquisição é expressa como o número de amostras coletadas por segundo, com unidade em Hertz (Hz). Quanto maior for essa taxa, maior será o número de amostras adquiridas no mesmo intervalo de tempo, proporcionando maior fidelidade do sinal digital (discretizado) em relação ao sinal analógico (contínuo).

O Teorema da Amostragem introduz o conceito de taxa de amostragem suficiente para garantir a fidelidade da discretização do sinal, assegurando que nenhuma informação relevante seja perdida durante o processo de amostragem. Além disso, teorema apresenta uma fórmula que permite a reconstrução mínima do sinal contínuo original a partir das amostras coletadas (NYQUIST, 1928).

A aplicação do teorema estabelece que uma taxa de amostragem f_s [Hz] suficiente é qualquer valor maior que o dobro da maior frequência presente no sinal a ser analisado, representada por f_N [Hz], que é frequentemente chamada de frequência de Nyquist. Assim, para

uma determinada taxa de amostragem, a reconstrução perfeita do sinal original é garantida desde que o limite de frequências obedeça à Equação (2) (SHANNON, 1949).

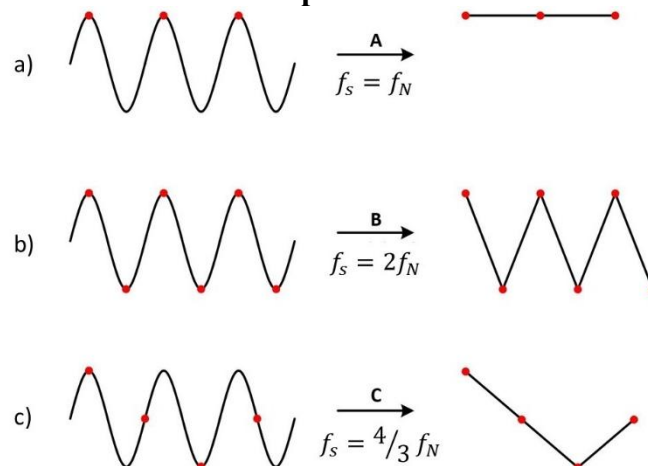
$$f_s > 2f_N \quad (2)$$

Uma restrição imposta pelo teorema é que ele só pode ser aplicado a uma classe de funções matemáticas cuja transformada de Fourier seja zero fora de uma região finita de frequências. Intuitivamente, espera-se que, ao reduzir uma função contínua a uma sequência discreta e posteriormente interpolar essa sequência de volta para uma função contínua, a fidelidade do resultado dependa diretamente da taxa de amostragem adotada.

Contudo, um sinal discretizado, por mais pontos que possua, é sempre uma estimativa finita de um sinal contínuo, que por sua natureza possui infinitos pontos. Por outro lado, o número mínimo de pontos de amostragem deve ser suficientemente maior que o dobro da maior frequência presente no sinal em estudo. Assim, para analisar adequadamente um sinal, é essencial possuir um conhecimento prévio sobre suas características e fornecer uma instrumentação e capacidade de processamento que atendam aos requisitos do teorema de amostragem (OPPENHEIM; SCHAFER; BUCK, 1999).

A Figura 17 ilustra o comportamento de sinais discretizados com diferentes taxas de amostragem para um mesmo sinal contínuo. Nas condições representadas em Figura 17 - a ($f_s = f_N$) e Figura 17 - c ($f_s = 4/3 f_N$), o teorema não é atendido ($f_s < 2f_N$), resultando em um sinal discretizado que não caracteriza adequadamente o sinal contínuo. Já na Figura 17 - b, com taxa de amostragem igual ao dobro da frequência de Nyquist, o sinal discretizado preserva a forma mínima do sinal contínuo, mantendo as informações do sinal original.

Figura 17 – Sinais discretizados para diferentes taxas de amostragem



Fonte: Adaptado de Instruments (2021).

2.3.2 Transformadas

Os sinais adquiridos em diversos processos, como emissão acústica (EA), correntes elétricas e vibrações mecânicas, podem conter informações valiosas sobre o comportamento de sistemas físicos. No entanto, a análise desses sinais nem sempre é simples quando mantidos em seus domínios originais, como o tempo ou o espaço. As transformadas surgem como ferramentas matemáticas que permitem transcrever um sinal de um domínio de difícil interpretação para outro mais intuitivo e objetivo, facilitando sua análise e processamento. Essas transformadas são amplamente empregadas no tratamento de sinais em áreas da engenharia e ciência, sendo fundamentais para a extração de informações relevantes em aplicações práticas.

Grande parte das sequências discretas $x[n]$ pode ser representada como uma soma de senoides de diferentes frequências. Essa decomposição permite modificar a representação do sinal do domínio do tempo para o da frequência, destacando características que não são evidentes no domínio original. Uma analogia útil é a decomposição de um vetor em suas componentes horizontal, vertical e em profundidade. Apesar de decomposto, o vetor mantém sua grandeza original, mas torna-se mais simples de analisar em suas partes individuais (NALON, 2009).

A análise no domínio da frequência permite obter informações relevantes sobre o sinal, que não estariam acessíveis pela simples observação no domínio do tempo. Para essa conversão de domínios, as transformadas são amplamente utilizadas no tratamento de informações. Elas têm a capacidade de transferir um sinal para outro domínio e, posteriormente, reconvertê-lo ao domínio original. Entre as transformadas, a mais conhecida é a proposta pelo matemático e físico francês Jean-Baptiste Joseph Fourier (PINHEIRO; MACHANDO; FERREIRA, 2017).

Fourier demonstrou que uma função arbitrária pode ser representada por uma série trigonométrica, inicialmente em funções contínuas e, posteriormente, generalizada para qualquer tipo de função. O anúncio dessa descoberta ocorreu em 1807, perante a Academia Francesa, embora ideias semelhantes sobre a decomposição de funções periódicas em oscilações simples já tivessem surgido no século III a.C., com astrônomos modelando movimentos planetários por meio de epiciclos (FETTER; WALECKA, 2003).

A Transformada de Fourier permite identificar características adicionais de sinais ao convertê-los do domínio do tempo para o da frequência, ampliando as possibilidades de análise. Esse método, amplamente empregado na engenharia, facilita a elaboração de espectros de frequência, transferindo o sinal de um domínio menos controlável, como o tempo, para um mais

manipulável, como a frequência (OPPENHEIM; WILLSKY, 2010).

A Transformada de Fourier consiste em uma generalização da série complexa de Fourier para o caso em que o período tende ao infinito. Assim, a Transformada de Fourier $F(w)$ de uma função $f(t)$ é definida pela Equação (3):

$$F(w) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t)e^{-2j\pi\omega t} dt \quad (3)$$

Onde $e^{-2j\pi\omega t}$ é o Kernel da transformada e o ω é a frequência angular analógica do fenômeno. O Kernel é uma função que mantém sua forma invariável quando duas variáveis são permutadas, sendo fundamental para a transformação de uma função no domínio do tempo $f(t)$ para o domínio da frequência $F(w)$.

As principais propriedades da Transformada de Fourier desempenham um papel fundamental ao facilitar tanto o cálculo das representações em frequência de sequências discretas quanto a análise em frequência de sinais (NALON, 2009):

- a) Periodicidade – A Transformada de Fourier de um sinal discreto é periódica no domínio da frequência, com período igual a 2π ;
- b) Linearidade – A Transformada de Fourier de um sinal composto é a soma das transformadas de Fourier dos sinais originais que o compõem;
- c) Variância com o Tempo – O deslocamento de uma sequência no tempo não altera sua posição no domínio da frequência;
- d) Deslocamento em Frequência – Multiplicar um sinal no domínio do tempo por uma função periódica gera sua modulação no domínio da frequência;
- e) Reversão do Tempo – A inversão de uma sequência no domínio do tempo resulta na inversão correspondente no domínio da frequência;
- f) Sequência conjugada – Para uma sequência discreta complexa, é possível calcular a Transformada de Fourier de sua sequência conjugada;
- g) Diferenciação em Frequência – A derivada da Transformada de Fourier de um sinal é equivalente à derivada das representações em frequência desse sinal.

Li et al. (2017) aplicaram a Transformada Rápida de Fourier (FFT - *Fast Fourier Transform*) em um algoritmo de diagnóstico de falhas em rolamentos baseado em redes neurais convolucionais e na fusão de evidências utilizando a teoria de Dempster-Shafer. Nesse contexto, as redes neurais utilizam como entradas os valores eficazes da FFT, os quais representam os sinais de vibração captados por sensores acoplados em uma máquina rotativa.

Os resultados da avaliação indicaram que o algoritmo proposto apresenta potencial para um desempenho superior em diagnóstico, em comparação com métodos tradicionais de aprendizado de máquina.

A aplicação de transformadas, especialmente a FFT, permite capturar as variações temporais das frequências, sendo essencial na análise de sinais não estacionários, como aqueles provenientes de emissão acústica e vibrações mecânicas. Esses métodos encontram ampla aplicação em processos de engenharia, destacando-se por sua eficácia no diagnóstico e monitoramento de sistemas complexos.

2.3.3 Valor Eficaz

O Valor Eficaz, também conhecido como Valor Médio Quadrático (RMS – *Root Mean Square*), é uma medida estatística que expressa a magnitude de uma quantidade variável, sendo aplicável tanto a séries de valores discretos quanto a funções variáveis contínuas. É amplamente utilizado para comparar valores que se alternam ao longo do tempo.

O RMS é uma medida simples e eficaz para avaliar o impacto de sinais flutuantes. Originalmente, foi desenvolvido para caracterizar o aquecimento de resistores submetidos a correntes alternadas de onda senoidal (DECKER, 2002).

O valor eficaz é frequentemente utilizado em trabalhos envolvendo corrente e tensão elétrica alternada, ruídos em linhas de comunicação e monitoramento de luz. Além disso, o cálculo pode ser estendido para avaliar grupos de números nos quais um único valor não representa adequadamente o conjunto, como em sinais de EA (MARGALOT; HESPANHA, 2008).

Este valor é calculado como a raiz quadrada da média da soma dos quadrados de um número infinito de amostras do sinal, sendo também conhecido como o desvio padrão da média do sinal. Para ondas senoidais simples, o RMS é aproximadamente 0,707 vezes a amplitude do sinal. A Equação (4) apresenta a fórmula para o cálculo do valor eficaz x_{RMS} :

$$x_{RMS} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{n=1}^N |x_n|^2} \quad (4)$$

Onde x_n é o n-ésimo valor de uma série de N elementos.

Para funções periódicas tendendo ao infinito, o RMS de todo o período equivale ao RMS de um único ciclo. Da mesma forma, o valor eficaz de uma função contínua pode ser calculado

a partir de uma série de amostras igualmente espaçadas no tempo. Por exemplo, ao avaliar uma corrente elétrica que varia entre picos positivos e negativos, os valores extremos isolados não fornecem uma representação adequada da corrente ao longo do tempo. O cálculo do RMS em períodos definidos permite uma análise precisa da corrente gerada em diferentes intervalos (MOREIRA, 2012).

No contexto industrial, o monitoramento inteligente da integridade de máquinas e o diagnóstico de falhas são indispensáveis. Esses diagnósticos geralmente dependem de parâmetros projetados por especialistas para construir modelos preditivos. Jakitsch (2019) apresentou um estudo sobre a análise de falhas em sistemas de pinhão-cremalheira utilizando monitoramento por emissão acústica (EA).

O estudo aplicou técnicas quantitativas de análise de sinais, como RMS, Curtose, Assimetria (Skewness) e Entropia Espectral, para avaliar falhas no sistema. Os resultados demonstraram que a coleta de sinais de EA provenientes da interação entre os componentes é uma alternativa viável para o diagnóstico. A abordagem mostrou eficiência na identificação de casos de falha, atendendo aos critérios estabelecidos no estudo.

2.3.4 Entropia Espectral

A entropia espectral é uma generalização do conceito de entropia da informação, desenvolvido a partir de fundamentos matemáticos com aplicações em teoria da comunicação, estatística, reconhecimento de padrões e processamento de sinais biomédicos. Essa técnica é amplamente utilizada para extração de características na detecção e diagnóstico de falhas (SHARMA; PAREY, 2016).

Proposta originalmente por Claude E. Shannon em 1948, a entropia foi concebida como uma medida da incerteza da informação (PAN; CHEN; LI, 2009). Para uma variável aleatória absolutamente contínua X , cuja função de densidade de probabilidade é $f(x)$, a entropia de informação é definida de acordo com a Equação (5):

$$H(X) = - \int f(x) \log_2(f(x)) dx \quad (5)$$

Em relação ao sistema discreto, sua formulação é apresentada na Equação (6):

$$H = - \sum_{i=1}^N p_i \cdot \log_2(p_i) \quad \therefore \sum_{i=1}^N p_i = 1 \quad (6)$$

Onde N é o número de eventos, p_i a probabilidade de um evento e H é a entropia espectral resultante do sistema discreto. Fica evidente na Equação (6) que a somatória das probabilidades dos eventos é de 100%. Para uma amostra de tamanho N , a probabilidade p_i de cada evento é calculada como a razão entre o número de vezes que o evento ocorreu e o número total de eventos (N) na amostra (SHANNON, 1948).

O conceito de entropia foi amplamente expandido desde o trabalho pioneiro de Shannon, abrangendo áreas como mecânica estatística, teoria da decisão e reconhecimento de padrões. De maneira geral, a entropia espectral é aplicada como uma medida de desordem, desigualdade de distribuição, grau de dependência ou complexidade em sistemas.

No caso de sinais, a entropia espectral avalia a distribuição de frequências. Para isto, a variável p_i é a transformação de Fourier do sinal $x(i)$, onde $i = 1, 2, \dots, N$. Essa variável é tratada como uma distribuição de probabilidade para calcular a entropia espectral.

O número de componentes de frequência do sinal é equivalente ao número de eventos, enquanto p_i descreve a porcentagem da frequência i no espectro total. A distribuição de $P = \{p_1, p_2, \dots, p_N\}$ depende exclusivamente da estrutura espectral do sinal X analisado. Assim, a entropia é capaz de avaliar a estrutura espectral do sinal em análise.

A entropia espectral assume valores maiores em distribuições planas de amplitude, especialmente quando as amplitudes dos componentes de frequência são iguais, atingindo o valor máximo de 1. Por outro lado, ela é minimizada (valor 0) quando as amplitudes estão concentradas em poucos componentes de frequência ou quando um componente possui amplitude zero. Dessa forma, os valores possíveis para a entropia espectral situam-se no intervalo $[0, 1]$.

Portanto, a entropia da informação apresenta as seguintes propriedades:

- a) Quando o resultado de um evento é certo, a entropia é zero;
- b) Quando todos os eventos são equiprováveis, a entropia é máxima;
- c) O aumento de um número de eventos resulta no aumento da entropia;
- d) A entropia depende exclusivamente da distribuição de probabilidade dos eventos.

Para apresentar a gama de aplicações da entropia espectral, Han, Muniandy e Dayou (2011) apresentam um método híbrido para identificação automatizada de sinais bioacústicos na vocalização animal de rãs, usando o centróide espectral, a entropia de Shannon e a entropia de Rényi. O resultado observa que o classificador, baseado nas características selecionadas, é capaz de identificar as espécies dos sapos com uma precisão de 98%.

A entropia espectral tem sido amplamente utilizada no diagnóstico de diferentes tipos de falhas. Zhang et al. (2015), utilizaram a transformada de Wavelet e a entropia de Shannon para processamento do sinal de EA e detecção de defeitos em trilhos ferroviários em um procedimento de circulação em baixas velocidades. Foram coletados sinais em maquinários ferroviários com e sem defeitos para comparação de resultados. O método de entropia espectral permitiu uma correta análise dos sinais de EA e separando os dados de interesse dos ruídos. Ainda, o trabalho observou que o método pode detectar defeitos ferroviários em baixa e alta velocidade de forma eficaz.

Embora a técnica espectral tenha sido desenvolvida em 1948 e amplamente aplicada em diversas áreas científicas devido à sua eficácia no processamento de dados, sua aplicação no monitoramento e na caracterização de fenômenos específicos, como na eletroerosão, ainda é limitada. Ferreira, Maia e Amorim (2024) realizaram um estudo pioneiro na utilização de Entropia Espectral para analisar sinais de emissão acústica obtidos durante a usinagem por eletroerosão. Foi investigado como os parâmetros de usinagem e os materiais dos eletrodos influenciam os sinais EA captados, destacando a eficácia da técnica para distinguir fenômenos associados à remoção de material e ao desgaste do eletrodo. Além disso, a integração de técnicas de aprendizado de máquina permitiu previsões sobre os resultados do processo, ressaltando a importância da entropia espectral como ferramenta robusta para análise e controle de processos industriais complexos.

2.4 Métricas Estatísticas na Análise de Dados

Este capítulo apresenta métricas estatísticas comumente utilizadas em trabalhos experimentais, abordando os conceitos fundamentais. A estatística é uma ferramenta essencial para a avaliação e interpretação de dados e resultados em processos de fabricação mecânica, como a eletroerosão. A aplicação de métricas e ferramentas estatísticas permite compreender a variabilidade dos sinais obtidos, minimizar erros experimentais e extrair informações relevantes sobre os fenômenos observados.

2.4.1 Média e Variabilidade

A média aritmética é uma das métricas estatísticas mais fundamentais na análise de processos industriais. Ela representa o valor central de um conjunto de dados e é amplamente utilizada para caracterizar o desempenho de um processo em condições médias de operação. A

média de um conjunto de observações é dada pela Equação (7):

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (7)$$

Em processos de fabricação, a realização de múltiplos experimentos é fundamental para evitar conclusões erradas e, principalmente, reduzir a margem de erro das medições. A média pode ser usada para descrever grandezas como taxa de remoção de material, consumo de energia, rugosidade superficial, entre outros parâmetros e resultados do processo. No entanto, sozinha, a média não fornece informações sobre a dispersão dos dados, sendo necessária a avaliação de outras métricas para um entendimento mais preciso da variabilidade do processo.

O desvio padrão (σ) é uma medida da dispersão dos dados em torno da média e é calculado pela Equação (8):

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (8)$$

Valores elevados de desvio padrão indicam maior variabilidade nos resultados, o que pode sugerir instabilidade no processo ou a presença de fatores não controlados que influenciam as medições. Em usinagem, a variação excessiva na rugosidade ou na taxa de remoção de material pode comprometer a qualidade final da peça e dificultar a repetição do processo, além de indicar a necessidade de ajustes nos parâmetros operacionais (CHEN *et al.*, 2024).

2.4.2 Identificação e Remoção de Outliers

A presença de valores atípicos (*outliers*) em dados coletados durante experimentos pode distorcer a análise estatística e levar a interpretações errôneas. Em experimentos industriais, os outliers podem surgir devido a flutuações inesperadas no processo, erros de medição, falhas nos sensores, heterogeneidade do material em processamento, entre outros fatores randômicos.

Uma das abordagens estatísticas mais utilizadas para a detecção de outliers é baseada no método dos quartis, que classifica um valor como atípico se ele estiver significativamente afastado do intervalo interquartil (IQR). Esse método é dado pela relação:

$$\text{Outlier se: } x < Q1 - 1,5 * IQR \text{ ou } x > Q3 + 1,5 * IQR$$

Onde $Q1$ é o primeiro quartil (25% dos dados), $Q3$ é o terceiro quartil (75% dos dados) e $IQR = Q3 - Q1$ representa o intervalo interquartil.

Os quartis são medidas que dividem um conjunto de dados ordenados em quatro partes iguais. Eles são determinados a partir da ordenação dos dados e da identificação de três pontos-chave: o primeiro quartil (Q1), que representa o valor abaixo do qual está 25% dos dados; o segundo quartil (Q2), que corresponde à mediana, dividindo os dados ao meio; e o terceiro quartil (Q3), abaixo do qual estão 75% dos valores. A diferença entre Q3 e Q1 é conhecida como intervalo interquartil (IQR), que é usado para identificar a dispersão dos dados e detectar valores atípicos (QIN; HOU; MA, 2024).

A remoção de outliers é essencial para precisão dos resultados, especialmente em análises que envolvem técnicas de monitoramento de padrões, aprendizado de máquina ou predição de desempenho do processo. Métodos computacionais são frequentemente empregados para automação dessa filtragem em grandes conjuntos de dados.

A utilização de estatísticas na análise de dados de processos de fabricação permite reduzir incertezas experimentais, melhorar a qualidade dos dados coletados e identificar padrões ocultos nos fenômenos analisados. A aplicação dessas técnicas minimiza erros de medição e distorções nos resultados experimentais, além de permitir o desenvolvimento de modelos preditivos mais robustos e eficazes.

Na indústria, a estatística se tornou um elemento essencial para o avanço da manufatura inteligente, proporcionando ferramentas para o controle de qualidade e para a implementação de técnicas preditivas que possibilitam redução de custos, aumento da produtividade e melhoria na precisão dos processos.

2.4.3 Aprendizado Estatístico com Regressão por Processo Gaussiano

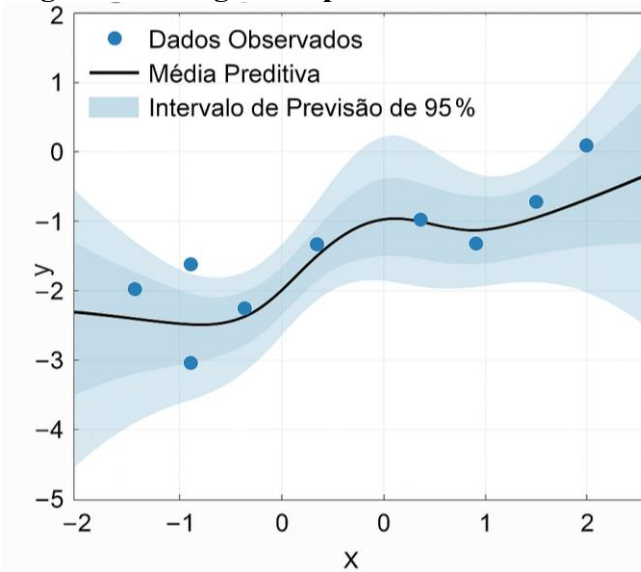
O aprendizado de máquina tem sido amplamente utilizado para mapear e prever o comportamento de processos complexos, especialmente na engenharia de manufatura. Entre as técnicas supervisionadas, a regressão destaca-se por modelar relações entre variáveis de entrada e saídas contínuas com base em dados estruturados (KRISHNAKUMAR; RAMESHKUMAR; RAMACHANDRAN, 2018).

No contexto do EDM, a Regressão por Processo Gaussiano (GPR) destaca-se por sua capacidade de modelar sistemas com ruído, incerteza e não linearidades. Essa técnica estatística supervisionada constrói modelos preditivos a partir de dados experimentais, estimando distribuições de probabilidade sobre funções que descrevem a relação entre variáveis de entrada e saída. Sua aplicação permite generalizar padrões observados e prever, com alta precisão, o desempenho do processo sob diferentes condições operacionais (WILLIAMS; RASMUSSEN,

2006).

A Figura 18 exemplifica o comportamento típico da GPR: os pontos representam os dados observados; a curva preta, a média preditiva do modelo; e as faixas azuis, os intervalos de confiança. Essa abordagem permite não apenas prever a resposta média esperada, mas também quantificar a incerteza associada a cada predição, uma vantagem em comparação a métodos determinísticos.

Figura 18 – Regressão por Processo Gaussiano



Fonte: Adaptado de Williams e Rasmussen (2006).

Neste trabalho, adota-se a GPR com função de kernel exponencial quadrática, que define a correlação entre os pontos com base na distância euclidiana entre os preditores. Essa técnica estima a variável de resposta y_z para uma nova entrada x_z com base em uma distribuição extraída de dados de treinamento $\{(x_i, y_i); i = 1, 2, \dots, n\}$. Para fins comparativos, a regressão linear clássica pode ser representada na Equação (9):

$$y = x^T \beta + \varepsilon \quad (9)$$

onde $\varepsilon \sim N(0, \sigma^2)$, sendo σ^2 a variância do erro e β os coeficientes ajustados a partir dos dados.

Na GPR, introduzem-se variáveis latentes $f(x_i)$, modeladas por um processo gaussiano. A suavidade das previsões é definida pela função de covariância, enquanto as funções de base h projetam os dados em um espaço de características p-dimensional (CHEN; WANG, 2018).

Um processo gaussiano é um conjunto de variáveis aleatórias, tal que qualquer número finito delas tem uma distribuição gaussiana conjunta e o processo é definido por sua função

média $m(x)$ e função de covariância $k(x, x')$. Como o desenvolvimento matemático do modelo GPR é probabilístico, existe uma variável latente $f(x_i)$ introduzida para cada observação x_i , o que torna este modelo não paramétrico. Isto significa que o modelo não fornece uma função geral $y_x = f(x_{z1}, x_{z2}, \dots, x_{zn})$ do problema. Contudo, o modelo tem a flexibilidade de aprender as formas funcionais a partir do treinamento de dados (ZHU *et al.*, 2019).

No modelo GPR, a relação entre os dados de entrada e a variável de resposta é estabelecida com base em funções de covariância que medem a similaridade entre amostras, controlando como a informação se propaga no modelo. Essa relação é ajustada por parâmetros que definem a influência e a amplitude do efeito entre os pontos (NEAL, 2012).

Estudos demonstram o potencial do aprendizado de máquina para monitoramento e predição em diferentes processos de usinagem. Wu, Wang e Wang (2019) propuseram um método de classificação dos estados de descarga na Eletroerosão a Fio de Alta Velocidade (HSWEDM) com alta acurácia, utilizando algoritmos como Máquina de Vetores de Suporte (SVM - *Support Vector Machine*) otimizados por enxame de partículas. De forma semelhante, Chen, Li e Liu (2019) aplicaram modelos baseados em frequência para prever a estabilidade no fresamento.

Aplicações recentes, como as de Chen e Lee (2021), demonstraram a eficácia de redes neurais convolucionais (CNNs) para regressão e classificação de desgaste de ferramentas e rugosidade superficial. Na microeletroerosão (μ EDM), Mollik et al. (2022) utilizaram modelos de aprendizado de máquina para prever com até 96% de acurácia o impacto das vibrações na taxa de remoção de material e desgaste do eletrodo, destacando a importância de parametrizações finas para processos de alta precisão.

A qualidade de modelos de regressão pode ser avaliada por métricas estatísticas como o Erro Quadrático Médio da Raiz (RMSE), definido pela Equação (10):

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2} \quad (10)$$

onde y_i é o valor real, $\hat{y}_i$ o valor previsto, e n o número de observações. O RMSE é sensível a grandes desvios, penalizando fortemente predições imprecisas. Por ser expresso na mesma unidade da variável de saída, sua interpretação é direta; pode também ser normalizado em porcentagem, dividindo-se pelo valor médio real.

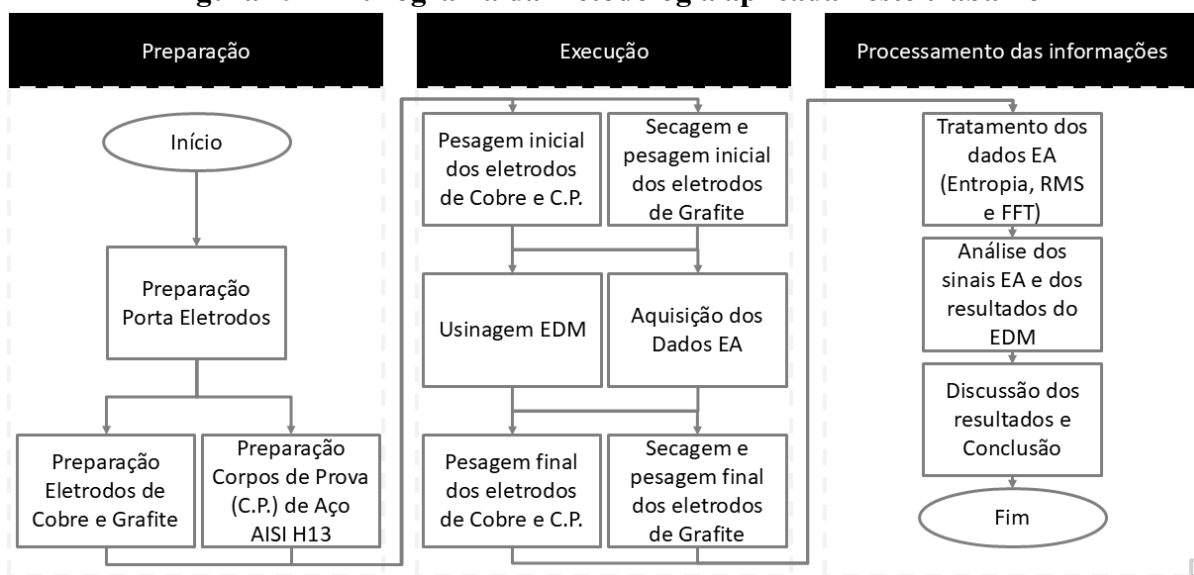
Modelos com menor RMSE apresentam maior capacidade preditiva, sendo amplamente utilizados na engenharia para validar predições baseadas em sinais. A combinação entre

modelos de regressão e sinais processados, representa uma convergência promissora entre estatística, aprendizado de máquina e fenômenos físicos no EDM. Essa abordagem tem sido explorada com sucesso por Kanake e Ahuja (2022) e Wang et al. (2024), promovendo avanços em monitoramento inteligente, automação e estabilidade do processo de usinagem por descarga elétrica.

3 METODOLOGIA

Este trabalho busca identificar o comportamento dos fenômenos na eletroerosão por penetração em função dos parâmetros de processo e das suas respostas. Para isso, são analisados os sinais de emissão acústica gerados durante a usinagem. A metodologia adotada neste estudo é apresentada de forma simplificada no fluxograma da Figura 19.

Figura 19 – Fluxograma da metodologia aplicada neste trabalho



Fonte: Elaborado pelo Autor.

Para avaliar o comportamento dos fenômenos do processo de EDM em função da variação dos parâmetros de usinagem, foram realizados testes de eletroerosão variando a duração do pulso de tensão, corrente elétrica, o material do eletrodo e o líquido dielétrico. Os parâmetros do processo, os métodos adotados para captura dos sinais de emissão acústica e o tratamento das informações serão detalhados ao longo deste capítulo.

3.1 Materiais

Nesta seção, detalham-se os insumos utilizados neste trabalho, incluindo os corpos de prova em aço AISI H13, os eletrodos de cobre eletrolítico e grafite, além do porta-eletrodo em aço SAE 1020, confeccionado sob medida para esses testes de EDM.

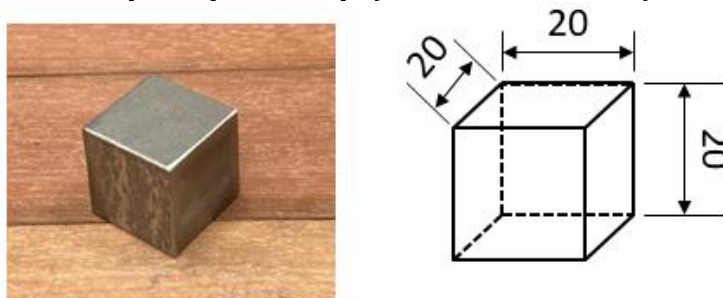
3.1.1 Peça de Trabalho

Para este estudo, foram utilizados corpos de prova confeccionados em aço AISI H13, um material amplamente empregado na indústria para operações a quente, devido à sua excelente combinação entre dureza e resistência à fratura. Esse aço é amplamente utilizado na fabricação de matrizes de forjamento a quente, matrizes para extrusão de alumínio e moldes para injeção de polímeros abrasivos. Além disso, é frequentemente adotado em estudos sobre eletroerosão, conforme observado na revisão bibliográfica.

O aço AISI H13 destaca-se por sua alta tenacidade, elevada resistência mecânica e excelente desempenho em ambientes de altas temperaturas. Sua resistência à fadiga térmica e ao choque térmico o torna uma escolha ideal para aplicações que envolvem ciclos térmicos intensos (TELES; RASLAN, 2011).

Os corpos de prova, apresentados na Figura 20, são blocos maciços de aço AISI H13 com dimensões de $20\text{ mm} \times 20\text{ mm} \times 20\text{ mm}$. Foram fabricadas 64 unidades para realização dos ensaios, garantindo a repetibilidade e confiabilidade dos experimentos.

Figura 20 – Corpo de prova da peça de trabalho em aço AISI H13



Fonte: Fotografia do Autor.

A Tabela 2 apresenta a composição química do aço AISI H13, conforme certificado de qualidade fornecido pelo fabricante (Anexo A). A composição é expressa em percentual de peso dos elementos constituintes do material.

Tabela 2 – Composição em porcentagem (%) de peso do aço AISI H13

AISI	C	Mn	P máx.	S máx.	Si	Cr	Mo	V
H13	0,32 - 0,45	0,20 - 0,50	0,03	0,03	0,80 - 1,20	4,75 - 5,50	1,1 - 1,75	0,8 - 1,2

Fonte: Adaptado de Favorit (2021).

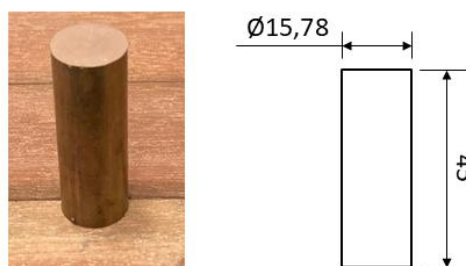
3.1.2 Eletrodos

Os eletrodos utilizados no processo de usinagem foram confeccionados em Cobre Eletrolítico e Grafite CA300N, ambos amplamente empregados em processos de eletroerosão

devido às suas propriedades físico-químicas.

O eletrodo de Cobre Eletrolítico (Figura 21) apresenta uma composição química com pelo menos 99,96% de cobre (PRASAD; RAO, 2004), garantindo excelente condutividade elétrica e térmica. Suas dimensões são 15,87 *mm* de diâmetro (5/8") e 45 *mm* de comprimento útil. Para este estudo, foram utilizados 32 eletrodos de cobre eletrolítico.

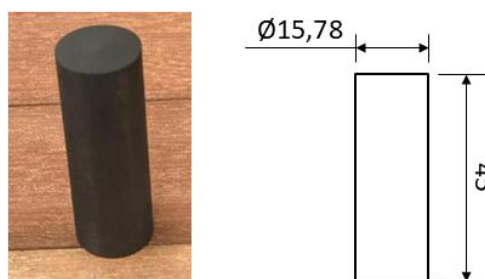
Figura 21 – Eletrodo de Cobre Eletrolítico



Fonte: Fotografia do Autor.

O eletrodo de Grafite CA300N (Figura 22) foi adquirido especificamente para este estudo, possuindo as mesmas dimensões do eletrodo de cobre: 15,87 *mm* de diâmetro e 45 *mm* de comprimento útil. Este material tem um tamanho médio de grãos de 10 μm e uma porosidade média de 11%. Também foram utilizados 32 eletrodos de grafite nos ensaios.

Figura 22 - Eletrodo de Grafite



Fonte: Fotografia do Autor.

O grafite é amplamente utilizado na eletroerosão devido à sua capacidade de suportar temperaturas extremamente altas, chegando a 3.650°C, enquanto o ponto de fusão do cobre é de 1.083°C. Diferentemente do cobre, o grafite não se funde, mas sim vaporiza a temperaturas elevadas, o que influencia o formato da cavidade gerada pela descarga elétrica.

Além disso, há diferenças estruturais significativas entre os dois materiais. O grafite apresenta menor densidade e maior porosidade que o cobre, o que afeta diretamente o acabamento superficial da peça usinada. Enquanto o cobre proporciona um acabamento

superior devido à sua baixa porosidade, o grafite oferece maior resistência ao desgaste sob condições de altas correntes elétricas.

Outra vantagem do grafite é sua facilidade de usinagem, além de possuir boa resistência mecânica e baixo coeficiente de dilatação térmica (SEA, 2021). Por outro lado, o cobre eletrolítico se destaca por sua elevada condutividade elétrica e térmica, embora apresente um coeficiente de dilatação térmica superior ao do grafite, o que pode gerar distorções dimensionais em certas condições operacionais (OLINIKI, 2009).

A escolha desses materiais para o estudo se justifica pelo fato de serem os mais utilizados na indústria de EDM, cada um apresentando vantagens específicas conforme os requisitos do processo. O grafite tem menor taxa de desgaste sob altas correntes, enquanto o cobre permite obter acabamentos superficiais superiores, sendo mais adequado para aplicações que exigem alta precisão dimensional.

3.1.3 Porta-Eletrodo

Para garantir a padronização dos ensaios, foi desenvolvido um porta-eletrodo sob medida, projetado para fixar os eletrodos e permitir o encaixe adequado no cabeçote da máquina de EDM do laboratório de usinagem da PUC Minas. Sua fixação é realizada por parafusos de aperto, o que possibilita a troca rápida dos eletrodos entre os testes, minimizando riscos de alterações geométricas ou volumétricas durante a manipulação. Essa característica é especialmente relevante para os eletrodos de grafite, devido à sua fragilidade mecânica. A adoção desse sistema de fixação reduz variações indesejadas na pesagem inicial e final dos eletrodos, garantindo maior confiabilidade na medição da diferença de massa e, consequentemente, nos cálculos da taxa de desgaste dos eletrodos.

O porta-eletrodo foi confeccionado em aço SAE 1020 e projetado para oferecer fixação segura dos eletrodos de cobre e grafite. Possui um furo central de 15,78 mm, garantindo o posicionamento perpendicular do eletrodo à peça de trabalho, com sua face paralela à superfície da peça durante a usinagem. Essa configuração assegura a repetibilidade dos ensaios e a estabilidade do processo.

Na Figura 23 -a, é apresentado o porta-eletrodo fabricado, enquanto na Figura 23 -b, observa-se sua montagem na máquina EDM, fixando um eletrodo para o experimento.

Figura 23 – Porta-Eletrodo (a) e sua montagem na máquina de EDM (b)

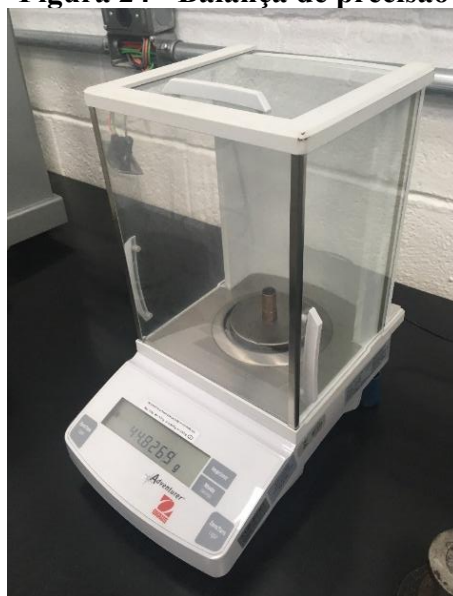


Fonte: Fotografia do Autor.

3.1.4 Balança de precisão

Utilizando uma balança de precisão da Ohaus Corporation, modelo AR2140 (Figura 24), foram pesadas as peças de trabalho e os eletrodos novos, antes de serem utilizados no processo, por três vezes consecutivas. A média dessas medições forneceu o valor de massa inicial, utilizado nos cálculos de desempenho do processo de EDM. Esse procedimento foi necessário para estabelecer um parâmetro de referência quanto à remoção de material do corpo de prova e ao desgaste do eletrodo. Após a usinagem, as peças e os eletrodos foram novamente pesados, também em três repetições, a fim de determinar a variação de massa. A balança utilizada possui uma capacidade máxima de pesagem de 210 g e resolução de 0,0001 g, operando em uma faixa de temperatura entre 10°C e 30°C.

A diferença entre o peso inicial e o final das amostras permite verificar a quantidade de material removida da peça e o desgaste do eletrodo, ou seja, quantificar a massa perdida durante o processo de usinagem. Além disso, com os sinais de emissão acústica (EA) adquiridos durante a usinagem, torna-se possível correlacionar a EA com os resultados do processo, como a Taxa de Remoção de Material (V_w) e o desgaste do eletrodo (V_e). Essa abordagem possibilita uma avaliação do fenômeno da erosão no EDM.

Figura 24 - Balança de precisão

Fonte: Fotografia do Autor.

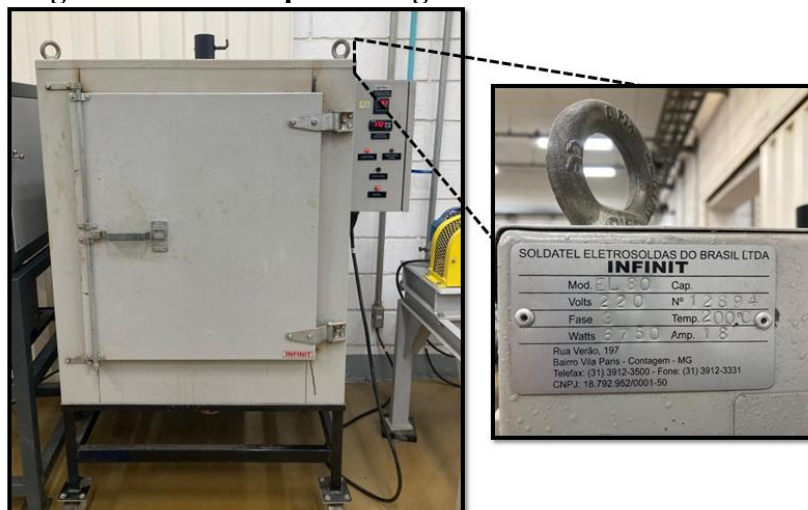
3.1.5 Estufa para secagem do eletrodo de Grafite

Devido à porosidade do eletrodo de grafite, há retenção de fluido dielétrico em seus poros durante a imersão, o que pode comprometer a precisão da medição de massa pela balança de precisão. Para garantir a exatidão da variação de massa antes e depois da usinagem, foi necessária a secagem completa dos eletrodos antes das pesagens.

Para esse procedimento, utilizou-se uma estufa elétrica da Soldatel Eletrosoldas do Brasil Ltda, modelo EL 80, com alimentação trifásica de 220V, potência de 6750W, corrente nominal de 18A e temperatura operacional de até 200°C (Figura 25). O processo de secagem foi realizado em duas etapas. Antes da usinagem, os eletrodos novos, previamente imersos no fluido dielétrico de hidrocarboneto, foram aquecidos a 150°C por 24 horas, promovendo a evaporação completa do líquido retido nos poros. Após a usinagem, os eletrodos foram novamente submetidos ao mesmo processo de secagem para eliminar qualquer fluido contido nos poros do eletrodo, que poderiam interferir na nova pesagem.

Esse método foi essencial para mensurar com precisão a perda efetiva de material dos eletrodos de grafite durante a usinagem, evitando distorções devido à retenção do fluido dielétrico. Estudos anteriores, como o de Amorim e Weingaertner (2007), já demonstraram a eficácia dessa abordagem, destacando a importância da secagem dos eletrodos antes e depois dos ensaios de eletroerosão para garantir medições confiáveis da variação de massa. A aplicação desse procedimento reforça a confiabilidade dos dados obtidos neste estudo, mitigando erros de medições do desgaste dos eletrodos de grafite na erosão do aço AISI H13.

Figura 25 – Estufa para secagem dos eletrodos de Grafite



Fonte: Fotografia do Autor.

3.2 Métodos

Com o objetivo de desenvolver uma técnica para o monitoramento dos fenômenos da usinagem por eletroerosão (EDM), utilizou-se de um sensor piezoelétrico instalado na máquina para capturar, em tempo real, os sinais de emissão acústica (EA) gerados durante o processo.

Considerando a possibilidade de implementação de um sistema de monitoramento acoplado diretamente à máquina de EDM, torna-se necessária a utilização de um sistema automatizado e on-line para o acompanhamento e análise contínua dos sinais de EA. Esse sistema deve permitir a identificação do estado dos fenômenos envolvidos no processo, sem interferência na usinagem.

A seguir, são apresentados os métodos adotados, bem como os equipamentos, parâmetros de usinagem e procedimentos de medição utilizados para a obtenção dos resultados experimentais deste estudo.

3.2.1 Usinagem por Eletroerosão

Os ensaios experimentais foram realizados na máquina de eletroerosão por penetração, modelo EDM 440 NC, fabricada pela AGIE CHARMILLES LTDA. O equipamento, localizado no Laboratório de Usinagem da PUC Minas, é apresentado na Figura 26.

Figura 26 – Máquina EDM 440 NC

Fonte: Fotografia do Autor.

A EDM 440 NC permite a aplicação de uma corrente elétrica máxima de 34,5 A durante a usinagem e possui um cabeçote porta-eletrodo-ferramenta que se desloca no eixo Z por meio de guias lineares e fuso de esferas recirculantes, acionado por um motor de passo. O suporte de eletrodos tem capacidade para peças de até 60 kg.

A estrutura da máquina conta com mesas apoiadas sobre rolamentos lineares e guias temperadas e retificadas, garantindo precisão e durabilidade no posicionamento. O tanque de armazenamento do dielétrico tem capacidade para 200 litros, e a bandeja de trabalho (cuba) possui abertura lateral e frontal, facilitando o manuseio e fixação do eletrodo e da peça (ENGEMAQ, 2002).

Para a realização dos testes, utilizou-se um gerador operando sob o sistema de relaxação, no qual uma fonte de alimentação CC carrega um capacitor até que a tensão entre os eletrodos seja suficiente para romper a resistência elétrica do dielétrico. Dessa forma, o tempo de retardo de ignição (t_d) se ajusta automaticamente em função da resistividade do dielétrico, da aproximação do eletrodo à peça e das características dos materiais envolvidos. Esse controle dinâmico proporciona estabilidade ao processo, favorecendo uma elevada taxa de remoção de material e boas condições de lavagem.

Para garantir a remoção eficiente dos resíduos gerados na zona de usinagem (gap), adotou-se o sistema de lavagem por jateamento, uma vez que o experimento não previa a utilização de furos no eletrodo ou na peça. Outro aspecto é que, devido à baixa profundidade de usinagem nos testes ($< 5\text{ mm}$), o sistema de lavagem por jateamento mostrou-se adequado. O bico do jato de dielétrico foi estrategicamente posicionado para cobrir toda a superfície da

peça sob erosão, proporcionando remoção eficaz dos resíduos e mantendo a estabilidade do processo.

Como fluido dielétrico, foram realizados testes utilizando hidrocarbonetos hidrogenados LUBCUT ER 2, fornecido pela Biolub Química Ltda, e água deionizada (condutividade elétrica entre 50 a 100 $\mu S/m$). Esse sistema de circulação do dielétrico promove a remoção eficiente dos detritos gerados durante a erosão, prevenindo interferências no processo.

O fluido à base de hidrocarboneto é amplamente utilizado na indústria de EDM, em razão de sua estabilidade térmica, eficiência como isolante elétrico e desempenho consolidado na remoção de material. Por sua vez, a água deionizada destaca-se por sua baixa viscosidade e alta capacidade de resfriamento, favorecendo a rápida expulsão dos detritos da zona de descarga. Além disso, quando comparada aos óleos dielétricos, a água deionizada apresenta menor tendência à carbonização e menor aderência de resíduos nas superfícies da peça e do eletrodo, o que contribui para a redução do desgaste eletrodo-peça. Soma-se a isso suas vantagens ambientais e de segurança, como a inexistência de inflamabilidade e a não emissão de vapores tóxicos durante o processo.

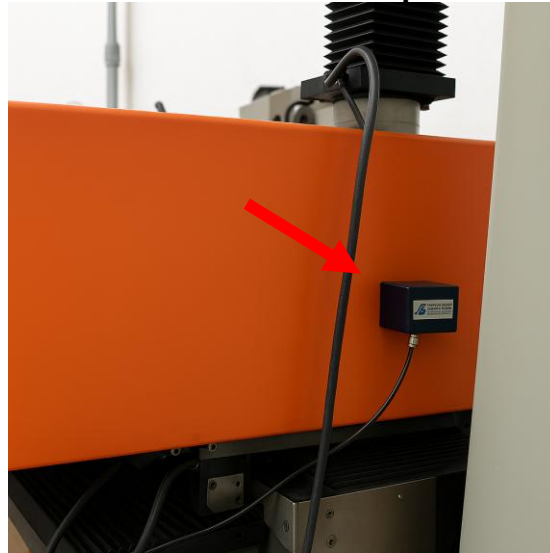
3.2.2 Aquisição dos sinais de emissão acústica

A ação da faísca entre a peça de trabalho e o eletrodo provoca aquecimento e remoção de material, gerando sinais de EA. Esses sinais, juntamente com outros que estão indiretamente relacionados aos parâmetros de usinagem, propagam-se através da peça, do eletrodo, do dielétrico e dos componentes da máquina de EDM. Além disso, durante a operação, outros fenômenos simultâneos, como a bomba do sistema de lavagem e o fluxo de líquido dielétrico, também geram uma pequena quantidade de sinais de EA em ampla faixa de frequência. Outra possível interferência nos sinais pode ser de origem eletromagnética, fator que deve ser cuidadosamente analisado (YANG *et al.*, 2022).

Para os ensaios com hidrocarboneto, o transdutor piezoelétrico modelo R15i da marca Physical Acoustics foi acoplado à parte traseira do tanque de usinagem (bandeja de trabalho) da máquina EDM, utilizando um suporte magnético (Figura 27). Esse transdutor foi responsável pela captação dos sinais de emissão acústica gerados durante o processo de usinagem. Para minimizar as perdas de energia e preencher possíveis lacunas entre as superfícies de contato, utilizou-se vaselina como meio de acoplamento do sensor à bandeja da máquina, conforme recomendado por Huang *et al.* (2023). De acordo com o fabricante, o transdutor R15i opera em

uma faixa de frequência de 50 a 400 *kHz*, sendo adequado para as características do experimento.

Figura 27 – Sensor Piezoelétrico R15i fixado no tanque de usinagem da máquina EDM



Fonte: Fotografia do Autor.

Nos ensaios com água deionizada, foi adotada uma estratégia diferente. Utilizou-se uma cuba com dimensões de $180 \times 180 \times 180 \text{ mm}$, fixada na mesa dentro da bandeja da máquina EDM 440 NC (Figura 28). Para otimizar a captura do sinal de EA gerado na eletroerosão, o transdutor foi acoplado à superfície externa da cuba confeccionada especificamente para esse experimento, utilizando vaselina para minimizar as perdas de energia capturadas pelo sensor.

Figura 28 – Cuba instalada na máquina de EDM para usinagem com água deionizada

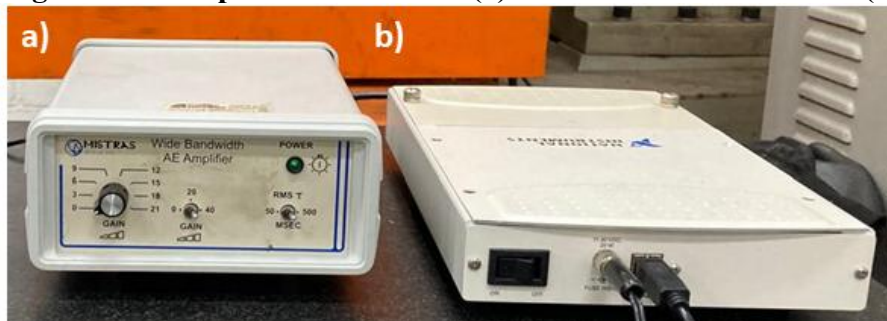


Fonte: Fotografia do Autor.

Deve-se destacar que houve alteração no local de fixação do sensor piezelétrico entre os ensaios realizados com os dois tipos de dielétrico, com o objetivo de obter a melhor captação possível dos sinais de EA, priorizando qualidade e confiabilidade na aquisição dos dados. Esse reposicionamento, no entanto, não compromete a análise nem os resultados do estudo, pois não afeta a frequência de excitação dos fenômenos relacionados à remoção de material ou ao desgaste do eletrodo (GHADARAH; AYRE, 2024). Uma consequência dessa mudança de posicionamento é a possível variação na amplitude dos sinais, tendo em vista que, nos ensaios com água deionizada (Figura 28) o sensor foi posicionado mais próximo da fonte de EA do que nos ensaios com hidrocarboneto (Figura 27). No entanto, a variação de posição não compromete as comparações de entropia e RMS entre os ensaios com o mesmo dielétrico, nem a análise de frequências entre ensaios de diferentes líquidos dielétricos.

Os sinais captados pelo transdutor foram amplificados por um amplificador de sinal de larga banda modelo AE2A, da marca Mistras (Figura 29 - a). Esse amplificador opera na faixa de 10 a 1.200 kHz , cobrindo com margem a faixa de operação do transdutor e garantindo que todos os sinais relevantes fossem adequadamente amplificados.

Figura 29 – Amplificador de sinal (a) e Condicionador de sinal (b)



Fonte: Fotografia do Autor.

Em seguida, os sinais amplificados foram enviados para o condicionador de dados modelo USB-6251, da National Instruments (Figura 29 - b), que possui uma taxa máxima de aquisição de 1,25 MS/s . Esse equipamento converte os sinais analógicos amplificados em dados digitais, que foram posteriormente transmitidos via porta USB para um laptop. O controle da captura e o armazenamento dos dados foram realizados por meio de um programa desenvolvido especificamente para este experimento na plataforma MATLAB.

Com os dados armazenados, utilizando MATLAB, foi possível analisar, agregar, estratificar e processar as informações, incluindo a geração de tabelas e gráficos. Além do armazenamento dos dados brutos, foram realizadas diversas etapas de processamento para facilitar a interpretação dos resultados. Todos os programas foram desenvolvidos

exclusivamente para este estudo, resultando em uma ferramenta flexível para o tratamento de sinais, permitindo futuros estudos, adaptações e melhorias na análise de EA na eletroerosão.

3.2.3 Procedimentos

Utilizando a máquina de EDM, os blocos de aço (corpos de prova), os dois dielétricos e os eletrodos de cobre e grafite, foram realizados um total de 64 ensaios de eletroerosão. Cada ensaio utilizou um eletrodo novo, seja de cobre eletrolítico ou de grafite. Desses, 16 testes foram realizados com o eletrodo de cobre e dielétrico de hidrocarboneto, onde foram testados diferentes parâmetros de usinagem, com corrente (i_e) de 3, 6, 9 e 12 A, e duração de pulso (t_i) de 6, 10, 50 e 100 μs . Da mesma forma, foram conduzidos outros 16 testes com eletrodos de grafite e dielétrico de hidrocarboneto. Em todos os 32 testes, foram realizadas a pesagem da peça e do eletrodo antes e depois da usinagem, bem como a aquisição dos sinais de emissão acústica (EA). Em seguida, os dados foram processados utilizando técnicas de FFT, RMS e entropia espectral no software MATLAB.

Outros 32 testes foram realizados com os mesmos parâmetros e eletrodos, porém utilizando água deionizada como dielétrico. Nesses ensaios, os sinais de EA foram captados para possibilitar a comparação entre os diferentes meios de usinagem.

Ainda em relação aos parâmetros de usinagem, alguns foram mantidos constantes em todos os experimentos: a polaridade positiva no eletrodo; o fator de serviço (DF – *Duty Factor*) de 50%; a tensão de 100 V; o trem de pulsos (U) de 0,8 segundo; e o afastamento fixo do eletrodo em relação à superfície usinada da peça (R) de 1 milímetro a cada trem de pulsos, permitindo a circulação do fluido dielétrico no gap de trabalho.

O fator de serviço (τ) como 50% foi optado para otimizar a taxa de remoção de material e minimizar o desgaste volumétrico relativo. Isso é explicado por Amorim e Weingaertner (2007) no capítulo 2.1.2 de Parâmetros de controle do processo EDM.

O detalhamento dos parâmetros utilizados para cada teste, de acordo com a norma VDI 3402 de 1990, que regulamenta testes de eletroerosão em máquinas de EDM, é apresentado na Tabela 3. Dessa forma, foram conduzidos 32 testes com dielétrico de hidrocarboneto e outros 32 com água deionizada, totalizando 64 ensaios.

Após a obtenção dos corpos de prova em AISI H13 e dos eletrodos de cobre e grafite, foram pesados os 32 corpos de prova e os 16 eletrodos de cobre antes da usinagem por EDM. Para garantir a precisão da variação de massa dos eletrodos de grafite, após sua imersão no hidrocarboneto, os 16 eletrodos foram secos por 24h a 150°C na estufa e posteriormente pesados

para obtenção das massas iniciais.

Tabela 3 – Parâmetros utilizados nos testes para cada dielétrico

Parâmetros	Unidade	Regime de trabalho							
		Teste 01 a 16 e 33 a 48				Teste 17 a 32 e 49 a 64			
Polaridade Eletrodo	-	+				+			
Tensão (u_i)	V	100				100			
Eletrodo	-	Cobre				Grafite			
Corrente (i_e)	A	3, 6, 9 e 12				3, 6, 9 e 12			
Duração de Pulso (t_i)	us	6	10	50	100	6	10	50	100
Ducty Factor (τ)	%	50	50	50	50	50	50	50	50
Intervalo entre Pulsos (t_o)	us	6	10	50	100	6	10	50	100
Trens de Pulso (U)	s	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8
Afastamento do eletrodo a cada Trem de Pulso (R)	mm	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0

Fonte: Elaborado pelo Autor.

A usinagem foi realizada seguindo a seguinte sequência: primeiro, foram usinados os 16 eletrodos de cobre, utilizando os parâmetros dos Testes 1 a 16 da Tabela 3. Em seguida, foram usinados os 16 eletrodos de grafite, utilizando os parâmetros dos Testes 17 a 32. Ao final de cada teste, todas as 32 peças e eletrodos foram novamente pesados para obtenção da respectiva taxa de remoção de material e desgaste do eletrodo.

Para a obtenção de taxas representativas de remoção de material da peça e desgaste do eletrodo, o tempo de usinagem foi ajustado em função da corrente elétrica. Nos testes com dielétrico de hidrocarboneto e eletrodos de cobre (Testes 1 a 16), os tempos de usinagem foram estabelecidos conforme a corrente aplicada: para 3 e 6 A, cada ensaio durou 60 minutos; para 9 A, 45 minutos; e para 12 A, 30 minutos. Durante cada teste, foram coletadas amostras de 4 segundos do sinal de EA a cada 5 minutos de usinagem.

Após a conclusão dos 16 ensaios com eletrodos de cobre, a usinagem foi repetida com os eletrodos de grafite (Testes 17 a 32), mantendo a mesma metodologia, com captação dos sinais de EA nos mesmos intervalos e tempos de usinagem ajustados de acordo com a corrente aplicada.

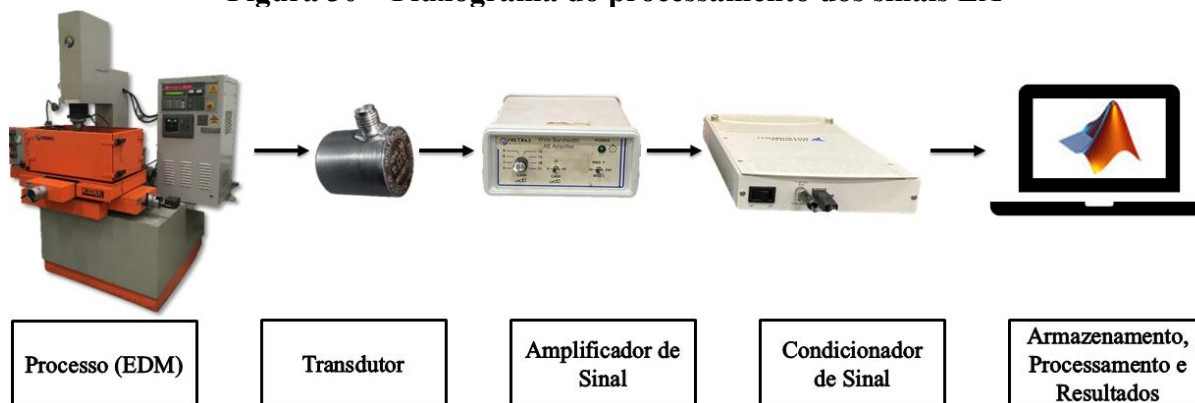
Nos ensaios utilizando água deionizada (Teste 33 a 64), as 32 combinações de parâmetros testadas com hidrocarboneto foram repetidas. No entanto, os testes foram realizados por um período fixo de 5 minutos cada, sem medição da massa perdida pelas peças e eletrodos, mas coletando sinais de EA a cada minuto por 4 segundos. O objetivo do uso da água deionizada foi validar e ampliar os resultados provenientes dos sinais de emissão acústica encontrados nos

ensaios com hidrocarboneto.

De forma geral, o processamento dos sinais de EA segue o fluxograma apresentado na Figura 30. O transdutor capta os sinais de EA da máquina EDM em operação, enviando-os ao amplificador de sinais, que por sua vez os replica para o condicionador de sinais. O computador então coleta e armazena as informações estruturadas, e um programa em MATLAB desenvolvido especificamente para essa análise processa os dados e gera os resultados.

Os ensaios buscam possibilitar a obtenção das curvas dos sinais de EA durante cada teste de EDM. O tratamento desses sinais, por meio de FFT, RMS e entropia espectral, permitirá a comparação e correlação dos sinais com os parâmetros do processo e os fenômenos da eletroerosão. A análise dos dados é fundamental para a identificação de tendências e padrões, contribuindo para a compreensão do comportamento dos sinais de EA em diferentes condições de usinagem.

Figura 30 – Fluxograma do processamento dos sinais EA



Fonte: Elaborado pelo Autor.

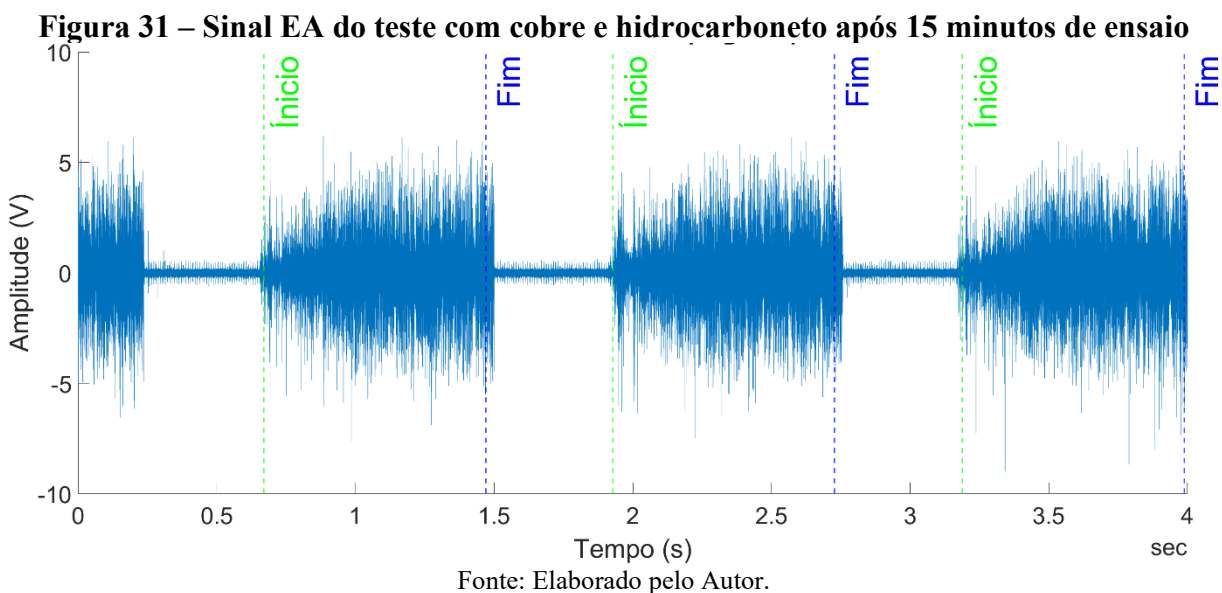
3.2.4 Processamento dos sinais de emissão acústica

As aquisições dos sinais foram realizadas a uma taxa de 1,2 MHz por 4 segundos de duração para todos os testes, gerando uma matriz de resultados contendo a amplitude do sinal e o respectivo instante de tempo. Todas essas informações foram coletadas pelo sensor piezoelétrico acoplado à estrutura da máquina de EDM, juntamente com o amplificador, condicionador de sinal, computador e software de aquisição de dados.

Para identificar possíveis ruídos durante a coleta de dados, foi realizada uma aquisição de aproximadamente 1 minuto de sinais de EA com a máquina EDM preparada para usinar, ou seja, com a bomba e todos os equipamentos eletrônicos ligados. A partir dessa aquisição, foi possível identificar frequências características da máquina, as quais foram mapeadas e

removidas das análises dos sinais de EA coletados sob usinagem. Assim, foram filtradas as faixas entre 55.680 – 55.800 Hz, 121.980 – 122.000 Hz, 249.999 – 250.020 Hz, 274.380 – 274.400 Hz, 299.980 – 300.001 Hz e 369.900 – 370.000 Hz. Esse procedimento contribui para a análise correta das frequências, eliminando influências externas aos fenômenos de erosão, que são o foco principal deste estudo. Em seguida, os sinais foram processados no MATLAB para análise.

No MATLAB, foram desenvolvidas rotinas para extração de todos os resultados provenientes dos sinais de emissão acústica. O primeiro passo foi detectar e recortar o período de tempo efetivo de remoção de material da peça de trabalho dentro dos 4 segundos de aquisição do sinal de EA. A Figura 31 apresenta o sinal de emissão acústica em função do tempo para o primeiro teste realizado com o eletrodo de cobre eletrolítico e dielétrico de hidrocarboneto após 15 minutos de ensaio. Com a aquisição do sinal por 4 segundos, destaca-se a identificação automática, pela rotina desenvolvida para este experimento, dos trens de pulsos (U), ou seja, o intervalo em que efetivamente ocorrem as descargas elétricas e a remoção de material na peça e no eletrodo. Esse tempo efetivo de remoção de material pode ser ajustado na máquina de EDM e, conforme definido para este estudo, foi fixado em 0,8 segundo.

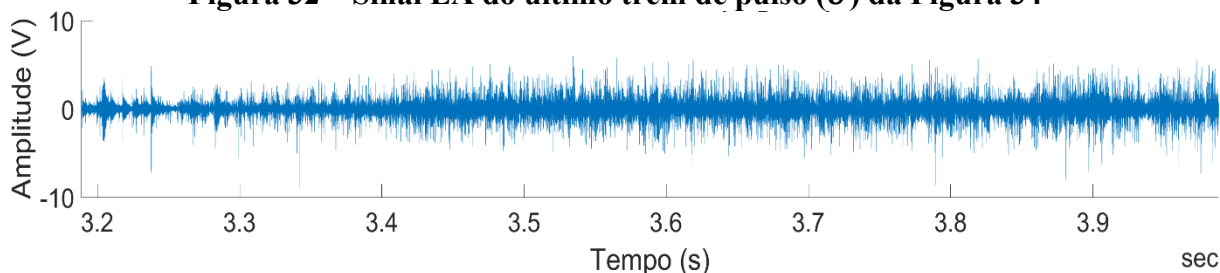


O intervalo entre os períodos de usinagem é caracterizado por uma linha do sinal próxima ao eixo da abscissa, destacada na Figura 31 entre os pulsos de maior amplitude. Esse tempo corresponde ao afastamento do eletrodo em relação à peça após cada 0,8 segundo de erosão. Esse afastamento (R), que pode ser ajustado na máquina de EDM, foi fixado em 1 mm para todos os testes deste estudo.

A forma de onda apresentada na Figura 31 pode ser gerada para cada uma das 1.308 aquisições realizadas no estudo, permitindo a identificação de variações nas amplitudes e frequências contidas no sinal. Para evitar um excesso de gráficos, este trabalho apresentará apenas os resultados consolidados dos sinais, que serão analisados e discutidos em detalhes.

O último intervalo do sinal EA completo, representado pelo trecho mais à direita da Figura 31 e ampliado na Figura 32, contém as respostas dos fenômenos que ocorrem nos instantes efetivos de remoção de material durante a usinagem por eletroerosão.

Figura 32 – Sinal EA do último trem de pulso (U) da Figura 34



Fonte: Elaborado pelo Autor.

A extração do trecho do sinal EA referente exclusivamente ao período de remoção de material foi realizada para garantir que os resultados analisados estejam apenas associados aos fenômenos da eletroerosão, eliminando qualquer outra excitação que possa ocorrer durante o afastamento periódico do eletrodo. Com base nesse entendimento, foram extraídos e analisados os espectros de frequência obtidos por FFT (*Fast Fourier Transform*), a entropia espectral e o valor eficaz (RMS) dos 1.308 sinais coletados. Após essa etapa, os dados foram organizados em bancos de dados para posterior análise comparativa. Outro fator analisado em conjunto foi a taxa de remoção de material e o desgaste dos eletrodos nos ensaios realizados com dielétrico de hidrocarbonetos.

É importante destacar que a faixa de frequência analisada neste estudo foi limitada pela resposta do transdutor, que opera na faixa de 50 a 400 kHz. Embora o condicionador de sinal permita a aquisição de frequências de até 600 kHz (devido à taxa de amostragem de 1,2 MHz), o transdutor restringe a análise à faixa especificada.

Outro ponto relevante são as frequências esperadas devido às descargas elétricas periódicas provocadas pelos parâmetros de usinagem. Nos testes com duração de pulso (t_i) de 6 μs e fator de serviço em 50%, são esperadas excitações pontuais de 166,7 kHz e 83,3 kHz, ambas dentro da faixa analisada. Para os testes com t_i de 10 μs , as frequências previstas são 100 kHz e 50 kHz. Entretanto, para tempos de t_i superiores a 50 μs , as frequências excitadas

pelo processo caem para 20 kHz e 10 kHz, ficando fora da faixa de operação do transdutor. Para assegurar que a análise de emissão acústica reflita apenas os fenômenos de remoção de material, essas frequências pontuais, derivadas da periodicidade dos pulsos, foram previamente filtradas e removidas nas rotinas de processamento dos sinais.

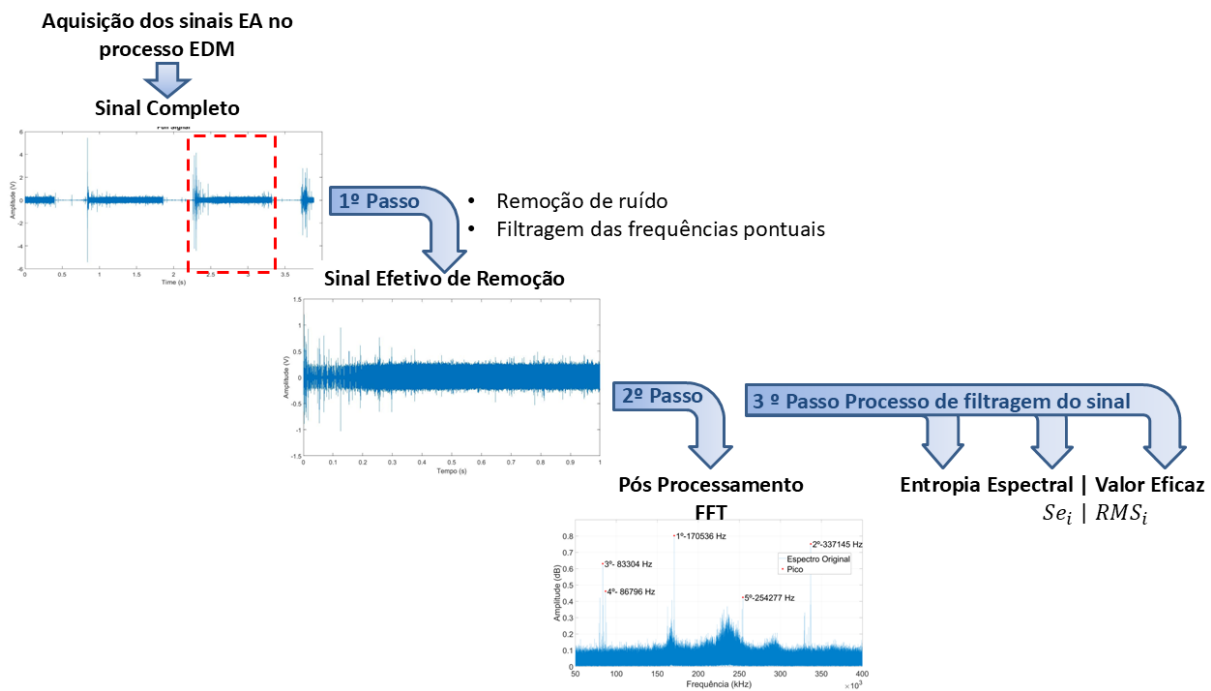
Essa consideração implica que os sinais coletados precisam ser cuidadosamente filtrados dependendo do parâmetro de duração de pulso, a fim de evitar análises equivocadas sobre a faixa de frequência excitada durante o processo de remoção de material. Dessa forma, a remoção das frequências esperadas para cada condição de teste garante que os dados analisados estejam exclusivamente associados aos fenômenos da eletroerosão, além da aplicação dos filtros de ruído previamente descritos.

A conversão do sinal EA do domínio do tempo para o domínio da frequência foi realizada por meio da técnica de FFT, resultando nos espectros de frequência. Além disso, outras rotinas foram empregadas para processar os sinais EA recortados em termos de entropia espectral e valor eficaz. Todos esses processamentos foram conduzidos em rotinas desenvolvidas especificamente para este estudo no MATLAB.

Por fim, ainda utilizando o MATLAB, foram realizadas análises comparativas com os resultados de FFT, RMS, entropia espectral, taxa de remoção de material e desgaste do eletrodo. Essas análises foram aprimoradas pela aplicação de técnicas estatísticas, permitindo a remoção de outliers e facilitando a identificação de padrões nos dados. Essa abordagem buscou aprimorar a compreensão das relações entre os sinais de EA e os parâmetros de usinagem, contribuindo para uma interpretação mais detalhada dos fenômenos da eletroerosão.

A sequência completa do tratamento dos sinais de emissão acústica adotada neste estudo é ilustrada no fluxograma da Figura 33. Nele, são sintetizadas as etapas de recorte do sinal, aplicação de filtros, extração das características e análise quantitativa dos sinais de emissão acústica.

Figura 33 – Fluxograma do tratamento dos sinais EA



Fonte: Elaborado pelo Autor.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste capítulo, são apresentados os resultados obtidos no desenvolvimento deste trabalho, com discussões fundamentadas na metodologia previamente descrita. Inicialmente, são abordados os resultados da usinagem por EDM, seguidos das análises dos sinais de emissão acústica (EA) obtidos com diferentes eletrodos, dielétricos e combinações de parâmetros. Esses sinais são processados e avaliados por meio da Transformada Rápida de Fourier (FFT) e, em seguida, tratados com as técnicas de entropia espectral (Se) e valor eficaz (RMS), utilizadas para interpretação dos fenômenos observados durante o processo de usinagem.

4.1 Usinagem EDM

Nos ensaios de usinagem por eletroerosão, foram realizados 64 experimentos com os respectivos parâmetros listados na Tabela 3. Para facilitar a identificação, os testes de 1 a 32 foram executados com dielétrico à base de hidrocarboneto, enquanto os testes de 33 a 64 utilizaram água deionizada.

Em cada grupo de 32 ensaios por tipo de dielétrico, os primeiros 16 testes foram realizados com eletrodos de cobre, e os 16 subsequentes com eletrodos de grafite. Cada conjunto foi estruturado de modo a combinar quatro níveis de corrente elétrica ($\hat{i}_e = 3, 6, 9$ e 12 A) com quatro durações de pulso ($t_i = 6, 10, 50$ e $100\text{ }\mu\text{s}$).

4.1.1 Testes EDM com dielétrico de Hidrocarboneto

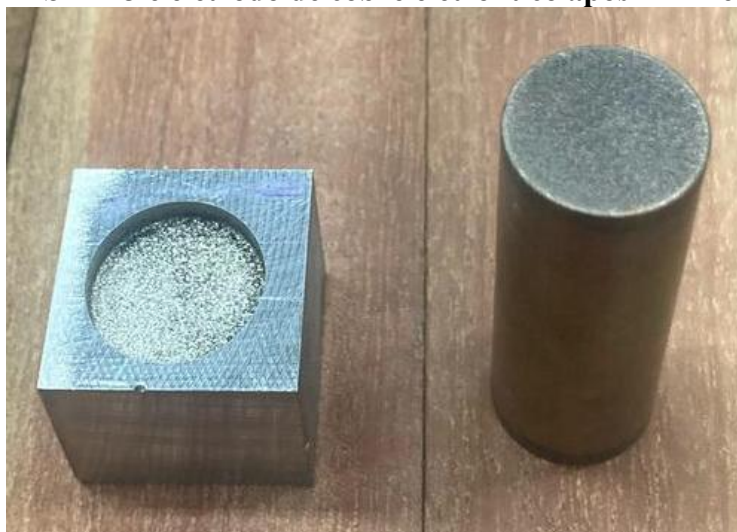
A apresentação de resultados de EDM com dielétrico em hidrocarboneto é separado nos resultados com eletrodos de cobre eletrolítico primeiro, seguidos dos resultados com eletrodos de grafite. A análise e discussão dos dados visa estabelecer padrões de comportamento físico do processo.

4.1.1.1 Teste EDM com eletrodo de cobre eletrolítico

Para cada ensaio, foi utilizado um corpo de prova e um eletrodo distintos. A Figura 34 apresenta o resultado da peça de aço AISI H13 e do eletrodo de cobre eletrolítico após a usinagem por 30 minutos, sob corrente elétrica de 12 A e duração de pulso de tensão em $50\text{ }\mu\text{s}$, com dielétrico à base de hidrocarboneto.

A coloração superficial escurecida, semelhante a uma fuligem, observada no eletrodo de cobre a consequência da carbonetização provocada pela dissociação do carbono presente no fluido dielétrico, o qual se deposita sobre as superfícies de trabalho pela pressão do plasma durante as descargas elétricas. Esse fenômeno altera o aspecto da superfície e é característico da eletroerosão com eletrodos de cobre em fluidos à base de hidrocarbonetos (FERREIRA *et al.*, 2022).

Figura 34 – Peça AISI H13 e eletrodo de cobre eletrolítico após EDM em hidrocarboneto



Fonte: Fotografia do Autor.

Da mesma maneira, observa-se a formação de carbonetos sobre a superfície da peça de trabalho, oriunda do mesmo processo de carbonetização. Não se justifica a apresentação de imagens de todos os ensaios, uma vez que, visualmente, os resultados são semelhantes. Visualmente, não se observam diferenças significativas entre os eletrodos de cobre testados. O que se nota é a alteração sutil da coloração da superfície de trabalho, bem como a rugosidade gerada na peça. À medida que a corrente elétrica é aumentada, percebe-se a formação de crateras maiores, em comparação com os ensaios realizados com correntes menores. Esse efeito ocorre devido à maior agressividade do processo de remoção de material, diretamente relacionada ao aumento da intensidade de corrente.

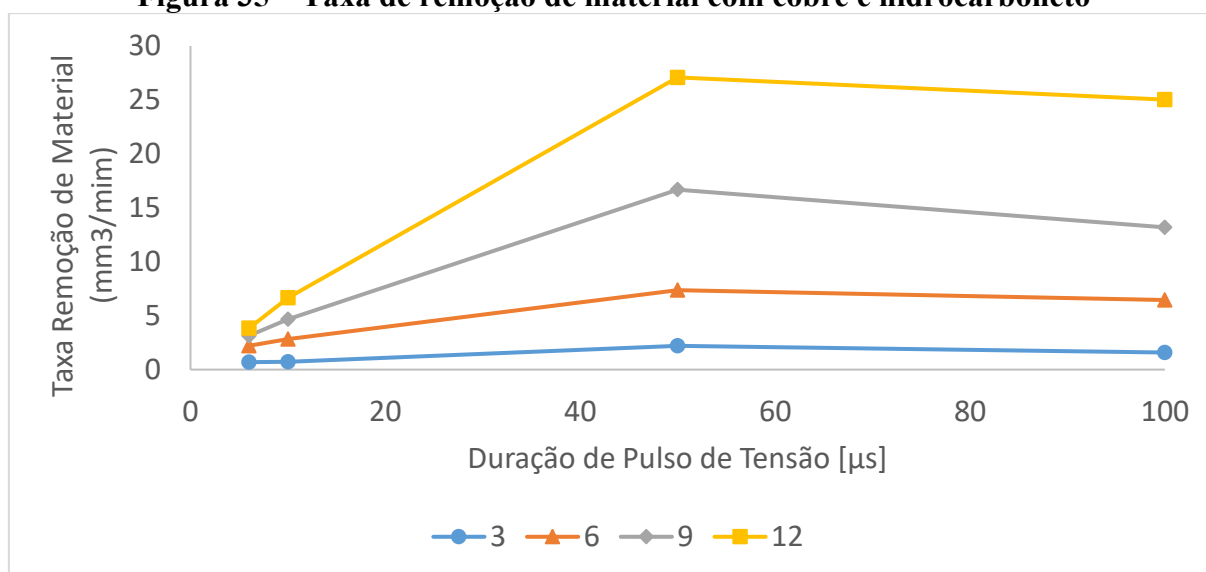
Em estudos de Ferreira *et al.* (2022), foram demonstrados experimentalmente os efeitos da carbonetização e como o aumento da quantidade de carbono depositada nas superfícies do eletrodo de cobre eletrolítico contribui para a redução da taxa de desgaste desse material. Os autores também apontam que, embora a quantidade relativa em massa de carbono nas superfícies em regime permanente não seja diretamente influenciada pelos parâmetros de usinagem, parâmetros mais agressivos aceleram significativamente a deposição do elemento

químico na superfície da ferramenta no início de eletroerosão em materiais novos.

Além da profundidade observada na peça de trabalho em cada teste, relacionada à taxa de remoção de material e ao tempo de usinagem, o foco será na análise quantitativa da taxa de remoção e desgaste de material em função dos parâmetros de usinagem e seus sinais acústicos. Para se obter resultados consistentes e analíticos nos testes de EDM, tanto o eletrodo de cobre eletrolítico quanto a peça de AISI H13 foram pesados antes e depois da usinagem, permitindo a obtenção quantitativa da variação de massa em cada ensaio.

Como resultado da taxa de remoção de material da peça (V_w) nesses testes, obteve-se o perfil apresentado na Figura 35. O comportamento da V_w tende a aumentar progressivamente com o crescimento da duração do pulso de tensão, atingindo um valor máximo e, a partir desse ponto, apresentando declínio para determinadas correntes elétricas. Esse comportamento descrito e detalhando na seção 2.1.1 de Fenomenologia amplamente reconhecido na literatura, é reflexo da dinâmica do canal de plasma formado durante as descargas elétricas, conforme discutido por Amorim e Weingaertner (2004) e Shabgard et al. (2013).

Figura 35 – Taxa de remoção de material com cobre e hidrocarboneto



Fonte: Elaborado pelo Autor.

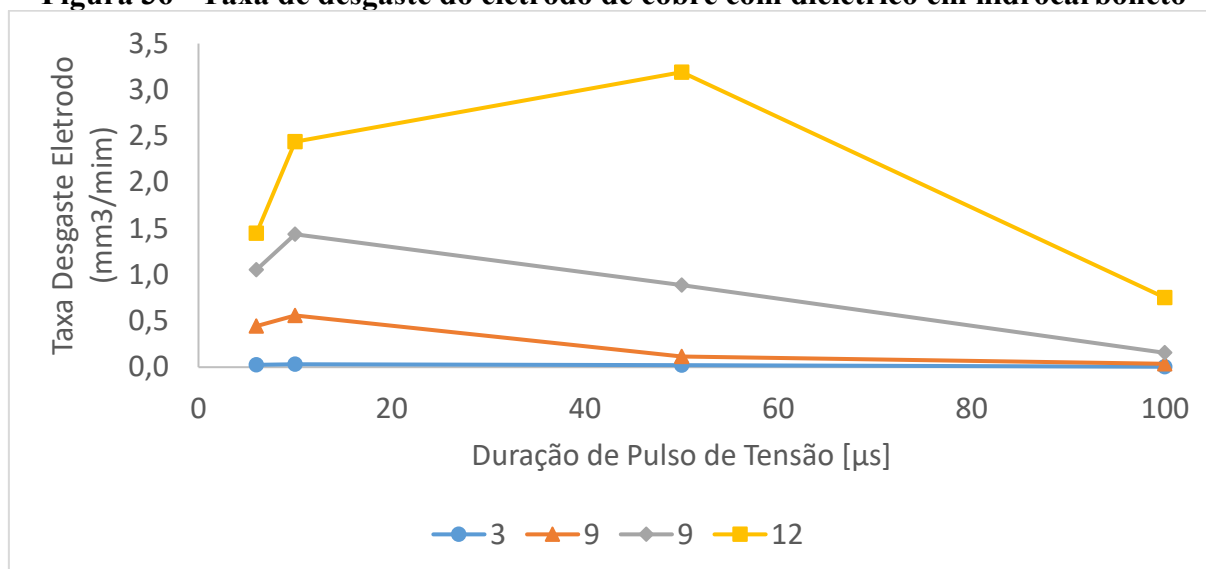
A análise dos dados de taxa de remoção de material (V_w) revela que os maiores valores foram consistentemente obtidos com duração de pulso de tensão de $t_i = 50 \mu s$, especialmente em correntes mais elevadas. O destaque vai para a condição de corrente elétrica de 12 A e $t_i = 50 \mu s$, que resultou no maior V_w registrado, alcançando $27,08 mm^3/min$. Para a corrente de 9 A e melhor $V_w = 16,68 mm^3/min$, se a apresenta 38,4% menor que o melhor ponto na corrente de 12 A. Esse comportamento reforça a existência de uma combinação ótima entre

tempo de pulso e corrente elétrica para maximização da eficiência do processo.

Embora a corrente elétrica de 12 A tenda a apresentar os melhores desempenhos de forma geral, em durações de pulso curtos (6 e 10 μs), seu ganho na remoção de material é limitado, uma vez que a transferência térmica nesses regimes é insuficiente para aproveitar todo o potencial da corrente elevada. Por outro lado, em durações longas, como 100 μs , apesar de ainda apresentar boas taxas de remoção, observa-se uma queda de 7,6% ($V_w = 25,01 \text{ mm}^3/\text{min}$) em relação ao ponto ótimo, evidenciando a perda de eficiência térmica decorrente do alargamento excessivo do canal de plasma. Esses resultados reforçam a importância do balanceamento adequado entre os parâmetros elétricos para otimizar o desempenho do processo de EDM.

Além disso, tempos prolongados de pulso de tensão comprometem a qualidade superficial da peça usinada. A maior energia transmitida à superfície, embora não resulte em maior taxa de remoção, promove a fusão de maiores volumes do material, aumentando a espessura da camada refundida e da zona termicamente afetada (ZTA). Essa alteração pode prejudicar as propriedades físicas e químicas da superfície, o que é especialmente crítico em aplicações onde a integridade da peça final é essencial.

Por outro lado, a Figura 36 apresenta a taxa de desgaste do eletrodo (V_e). Para a corrente de 12 A, o maior valor registrado foi $V_e = 3,19 \text{ mm}^3/\text{min}$, coincidindo com o ponto de maior taxa de remoção de material (V_w) na condição de $t_i = 50 \mu\text{s}$. Para as demais correntes, os picos de desgaste ocorreram com $t_i = 10 \mu\text{s}$. Esse comportamento está relacionado às propriedades físicas do cobre, que, apesar de sua excelente condutividade elétrica e térmica, fatores que favorecem a formação eficiente do canal de plasma, apresenta baixo ponto de fusão e ebulição quando comparado a outros materiais, como tungstênio ou grafite. Isso o torna mais suscetível ao desgaste térmico, sobretudo sob descargas de alta intensidade e longa duração. Por esse motivo que se observa a taxa de desgaste do eletrodo aumentar com o incremento da corrente elétrica, além de já ser esperado em virtude do aumento da energia descarregada por pulso.

Figura 36 - Taxa de desgaste do eletrodo de cobre com dielétrico em hidrocarboneto

Fonte: Elaborado pelo Autor.

Dessa forma, quanto maior a energia transferida ao eletrodo, mais significativa tende a ser sua deterioração pela erosão. A combinação de alta corrente e tempo de pulso intermediário (50 μ s), portanto, representa uma condição crítica de carga térmica sobre o eletrodo de cobre, explicando o pico de desgaste observado nessa condição. Para correntes menores, o acúmulo de energia é menos significativo, e o desgaste se concentra em durações menores (10 μ s), onde a frequência de descargas é maior, mas a energia por pulso ainda é suficiente para provocar erosão na superfície do eletrodo.

Esse comportamento observado na Figura 36 é coerente com os PFEs (eficiência de lavagem de plasma) achados de Shabgard et al. (2013), que demonstram que o pico de V_e não ocorre em valores fixos de corrente ou duração de pulso, mas sim ao longo de uma relação contínua entre esses dois parâmetros. Ou seja, quanto maior a corrente aplicada, maior tende a ser o tempo de pulso de tensão necessário para que ocorra o desgaste máximo.

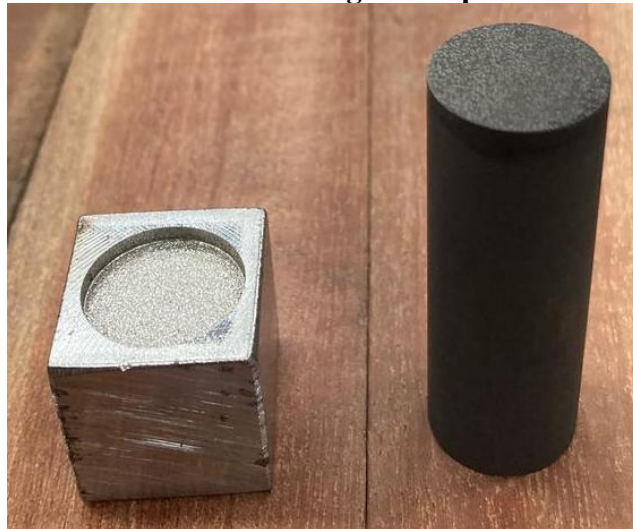
Por fim, assim como observado na peça de trabalho, durações de pulso mais longas também resultam em redução benéfica da erosão no eletrodo, em função do alargamento excessivo do canal de plasma. O aumento provoca uma redução da pressão exercida sobre a poça de material fundido durante o colapso do plasma, além de ocorrer sob temperaturas relativamente menores do que aquelas geradas em colapsos mais precoces.

4.1.1.2 Teste EDM com eletrodo de Grafite

Realizando os mesmos ensaios descritos no capítulo anterior, com a única alteração do

eletrodo de cobre para grafite, tem-se o resultado do EDM apresentado na Figura 37, referente ao teste realizado com corrente elétrica de 12 A e duração de pulso de 50 μs , após 30 minutos de usinagem.

Figura 37 – Peça AISI H13 e eletrodo de grafite após EDM em hidrocarboneto

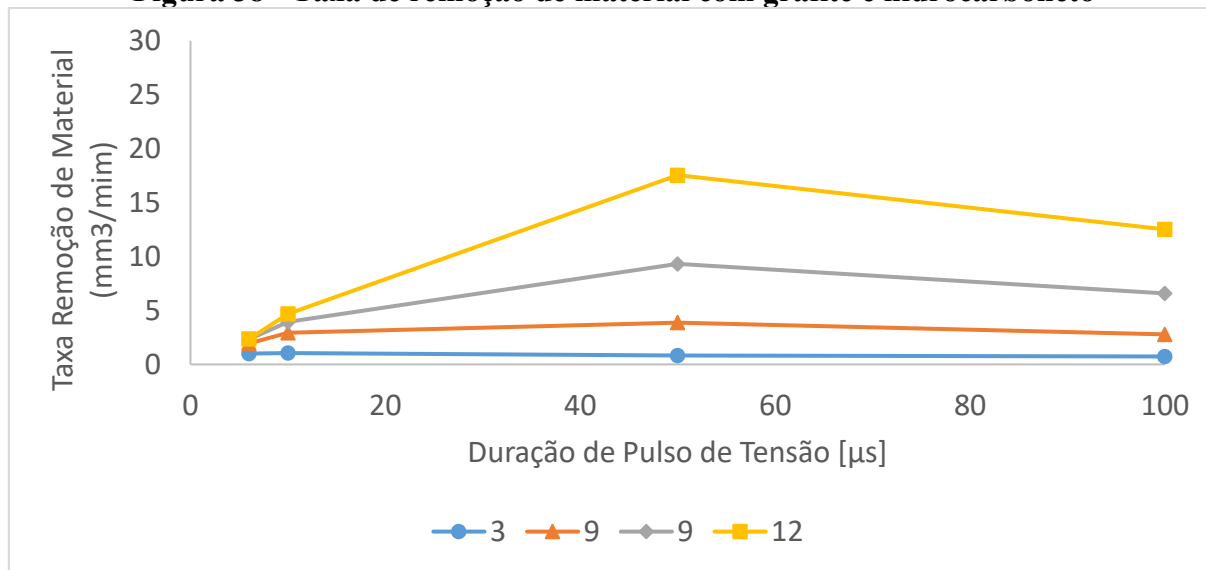


Fonte: Fotografia do Autor.

Devido às propriedades físicas do grafite, não se observa alteração visual significativa na coloração da área de trabalho do eletrodo, diferentemente do que ocorre com o cobre eletrolítico. No entanto, o fenômeno de carbonetização também ocorre, promovendo a deposição de carbono nas superfícies submetidas às descargas. Como evidência desse processo, nota-se a formação da fuligem escura na região usinada da peça de trabalho (Figura 37). Assim como nos testes anteriores, não se faz necessária a apresentação visual de todos os corpos de prova, visto que não há variações relevantes que justifiquem tal repetição.

O que se observa é uma rugosidade superficial mais acentuada nas peças usinadas com eletrodos de grafite sob altas correntes, quando comparadas às obtidas com eletrodos de cobre nos mesmos parâmetros. Outro ponto visualmente perceptível é que os eletrodos de grafite mantêm melhor sua forma geométrica, apresentando maior integridade dimensional ao final dos testes. No entanto, essas percepções visuais também não representam elementos quantitativos suficientes para a análise, sendo os dados obtidos por mensuração de massa os mais relevantes para avaliação do desempenho.

A Figura 38 apresenta o comportamento da taxa de remoção de material (V_w) com o uso de eletrodos de grafite em fluido dielétrico à base de hidrocarboneto. Observa-se que, para todas as correntes analisadas, o valor máximo de V_w ocorreu na condição $t_i = 50 \mu s$. O maior valor registrado foi para corrente de 12 A, com $V_w = 17,54 \text{ mm}^3/\text{min}$.

Figura 38 - Taxa de remoção de material com grafite e hidrocarboneto

Fonte: Elaborado pelo Autor.

Comparando os valores de remoção de corrente em 9 A e $t_i = 50 \mu s$ ($V_w = 9,32 \text{ mm}^3/\text{min}$), nota-se uma redução de 46,9% em relação ao melhor desempenho em corrente de 12 A, evidenciando uma forte influência do aumento de corrente na eficiência do processo. Também é perceptível que, para correntes mais baixas, como 3 A e 6 A, as variações de V_w ao longo de t_i são muito mais suaves, indicando limitação de energia para fusão significativa do material. Já para correntes elevadas, o perfil em formato de ‘campânula’ se repete, com declínio em V_w para $t_i = 100 \mu s$, devido à expansão excessiva do canal de plasma e subsequente perda de eficiência de ejeção do material fundido.

Ao comparar os resultados obtidos com o eletrodo de grafite (Figura 38) com aqueles obtidos com o eletrodo de cobre (Figura 36), verifica-se que o grafite apresentou desempenho inferior na taxa de remoção de material em todas as condições analisadas. Na condição de maior eficiência, o grafite alcançou $V_w = 17,54 \text{ mm}^3/\text{min}$, enquanto o cobre atingiu $V_w = 27,09 \text{ mm}^3/\text{min}$, uma diferença de 35,3%. Esse comportamento é justificado pelas propriedades térmicas e elétricas dos materiais: o cobre, com alta condutividade térmica e elétrica, permite melhor transmissão da energia gerada no gap de trabalho, favorecendo a fusão e ejeção do material da peça. Por outro lado, o grafite, embora apresente excelente resistência térmica e estabilidade dimensional, possui menor condutividade elétrica, o que reduz a eficiência da descarga elétrica em transformar energia em remoção de material nas mesmas condições operacionais (MING *et al.*, 2021).

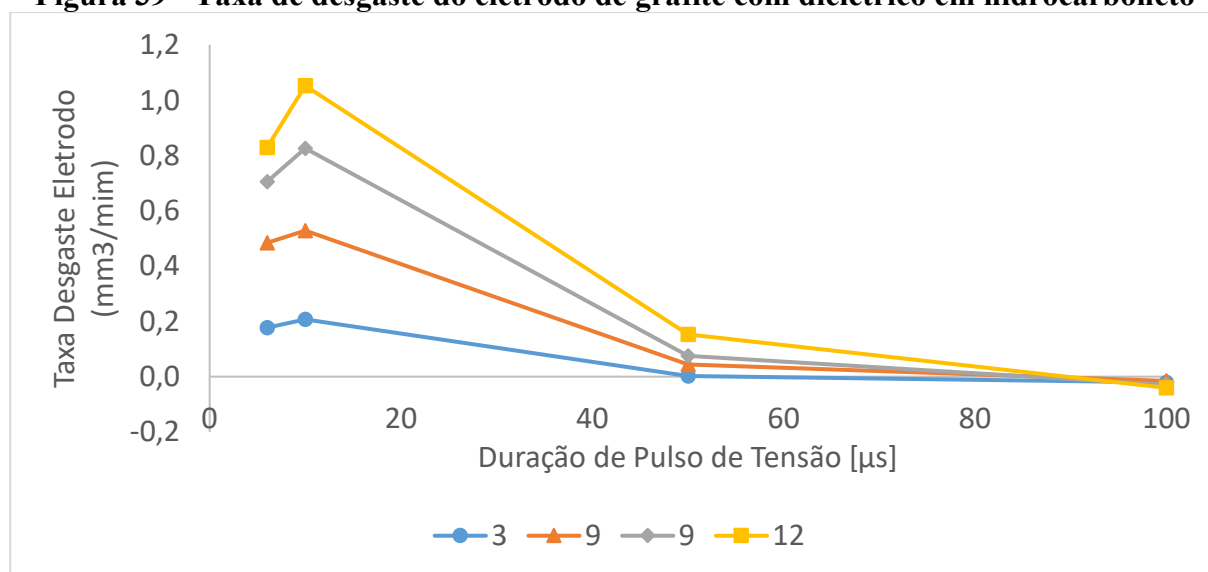
Embora a energia aplicada em cada teste tenha permanecido constante, uma vez que os

parâmetros de usinagem foram mantidos iguais independentemente do material do eletrodo, os resultados indicam que o tipo de eletrodo exerce influência significativa sobre os fenômenos de remoção de material. Essa influência não está associada à quantidade de energia fornecida, mas sim à forma como cada material interage com o processo de descarga elétrica.

Além do impacto sobre a taxa de remoção, o material do eletrodo afeta diretamente o acabamento superficial da peça usinada. Estudos como o de Nadda et al. (2018) explicam que, por possuir maior ponto de fusão e maior porosidade estrutural, o grafite tende a concentrar as descargas elétricas em regiões pontuais durante a eletroerosão. Isso favorece fusões localizadas e mais profundas, resultando em superfícies mais rugosas. Em contrapartida, o cobre, por apresentar maior condutividade térmica e menor porosidade, promove uma distribuição mais homogênea das descargas, resultando em fusão e ejeção mais controladas do material da peça, o que contribui para um acabamento superficial superior, com menores níveis de rugosidade.

Ao observar a taxa de desgaste do eletrodo (V_e) de grafite na Figura 39, cuidadosamente obtida por meio da pesagem dos eletrodos antes e após o processo de EDM, com secagem prévia para precisão na variação de massa, nota-se um comportamento distinto em relação ao eletrodo de cobre. As maiores taxas de desgaste ocorreram para $t_i = 10 \mu s$ em todas as correntes analisadas. A partir desse ponto, o desgaste reduziu acentuadamente com o aumento da duração do pulso, atingindo valores praticamente nulos ou até negativos para $t_i = 100 \mu s$.

Figura 39 - Taxa de desgaste do eletrodo de grafite com dielétrico em hidrocarboneto



Fonte: Elaborado pelo Autor.

Esse fenômeno de ganho de massa do eletrodo de grafite está relacionado à carbonetização, amplamente descrita na literatura, em que partículas de carbono oriundas do

fluido dielétrico à base de hidrocarboneto são depositadas na superfície do eletrodo durante descargas elétricas. Segundo estudos como o de Amorim, Weingaertner e Bassani (2010), esse efeito é favorecido em condições de baixa energia por pulso unitário combinadas com alta exposição térmica, como nos pulsos prolongados, promovendo a aderência de resíduos de carbono sobre o eletrodo, especialmente quando o próprio material já é composto de grafite.

Quando se comparam os resultados obtidos com eletrodos de grafite àqueles com eletrodos de cobre, fica evidente a superioridade do grafite em termos de resistência ao desgaste eletroerosivo. A taxa média de desgaste do grafite foi aproximadamente 74% inferior à do cobre, com destaque para a condição de corrente de 6 A e $t_i = 100 \mu s$, onde a redução chegou a 142%.

Essa diferença se justifica pelas propriedades térmicas do grafite, como seu elevado ponto de fusão, resistência ao choque térmico e menor condutividade térmica, que limitam a fusão superficial durante as descargas. Além disso, sua estrutura anisotrópica em camadas facilita a dissipação do calor sem comprometer significativamente sua integridade volumétrica. Por outro lado, o cobre, embora altamente condutor, possui baixo ponto de fusão, tornando-se mais vulnerável à erosão térmica sob condições de alta intensidade energética. Esses resultados reforçam o papel do grafite como material de eletrodo mais estável para aplicações que exigem maior controle dimensional e menor desgaste, enquanto o cobre se destaca em operações que priorizam melhor acabamento superficial.

4.1.2 Testes EDM com dielétrico de Água Deionizada

Dando continuidade aos ensaios, realizaram-se as usinagens com a substituição do fluido dielétrico por água deionizada. A Figura 40 apresenta o resultado do EDM da peça de aço AISI H13 com eletrodo de cobre após 5 minutos de erosão, operando sob corrente de 12 A e $t_i = 100 \mu s$.

A principal constatação nestes experimentos foi a ausência de fuligem (carbonetização) visível sobre as superfícies usinadas, tanto na peça quanto no eletrodo. Este comportamento contrasta com os resultados obtidos com dielétrico à base de hidrocarboneto, nos quais a deposição de carbono foi destacada.

Figura 40 – Peça AISI H13 e eletrodo de cobre após EDM em água deionizada



Fonte: Fotografia do Autor.

Diferentemente dos ensaios com hidrocarbonetos, não foi realizada a medição da variação de massa nos testes com água deionizada. O objetivo principal desta etapa foi comparar os sinais de emissão acústica (EA) captados neste meio com os obtidos durante os ensaios com hidrocarboneto, avaliando as diferenças nas respostas acústicas entre os dois fluidos dielétricos.

Contudo, realizaram-se, da mesma forma, os 16 ensaios de usinagem com eletrodo de grafite, com o objetivo de coletar os sinais de emissão acústica (EA). A Figura 41 apresenta o resultado da usinagem com corrente de 12 A e $t_i = 100 \mu s$ após 5 minutos de erosão.

Figura 41 - Peça AISI H13 e eletrodo de grafite após EDM em água deionizada



Fonte: Fotografia do Autor.

Assim como nos testes anteriores com cobre, não se observa de forma expressiva a

ocorrência de carbonetização na superfície da peça usinada. No entanto, é perceptível na superfície do eletrodo de grafite uma coloração mais clara, associada à deposição de material proveniente da peça de trabalho durante o processo. Esse fenômeno é descrito em estudos como o de Ferreira et al. (2022), sendo interpretado como o acúmulo de respingos do material usinado sobre a ferramenta.

Outro fenômeno observado durante os ensaios de usinagem com eletrodos de cobre e grafite foi a formação de óxidos nas bordas dos orifícios produzidos nas peças de aço e a coloração mais clara na superfície do eletrodo de grafite. Essa ocorrência está associada à eletrolise da água deionizada utilizada como fluido dielétrico. Durante as descargas elétricas, a alta temperatura local promovida pela erosão do material da peça, somada à dissociação das moléculas de água, favorece a formação de espécies reativas de oxigênio. Em contato com a superfície aquecida do aço, essas espécies promovem reações de oxidação.

4.2 Resultados da Emissão Acústica

Com a realização dos 64 ensaios, foram coletados os sinais de Emissão Acústica (EA). Nos 32 ensaios com dielétrico à base de hidrocarboneto, a aquisição dos sinais foi realizada durante 4 segundos a cada 5 minutos de usinagem. Assim, para os testes com correntes de 3 A e 6 A, cuja duração foi de 60 minutos, obtiveram-se 12 coletas de sinal por ensaio. Para os ensaios com 9 A, executados por 45 minutos, foram realizadas 9 coletas, enquanto nos testes com 12 A, com duração de 30 minutos, foram feitas 6 coletas por experimento.

Nos 32 ensaios com água deionizada como fluido dielétrico, cada usinagem teve duração de 5 minutos, sendo possível realizar 5 coletas de sinal EA por ensaio, devido à redução do intervalo de aquisição para 1 minuto.

4.2.1 Banda de frequências

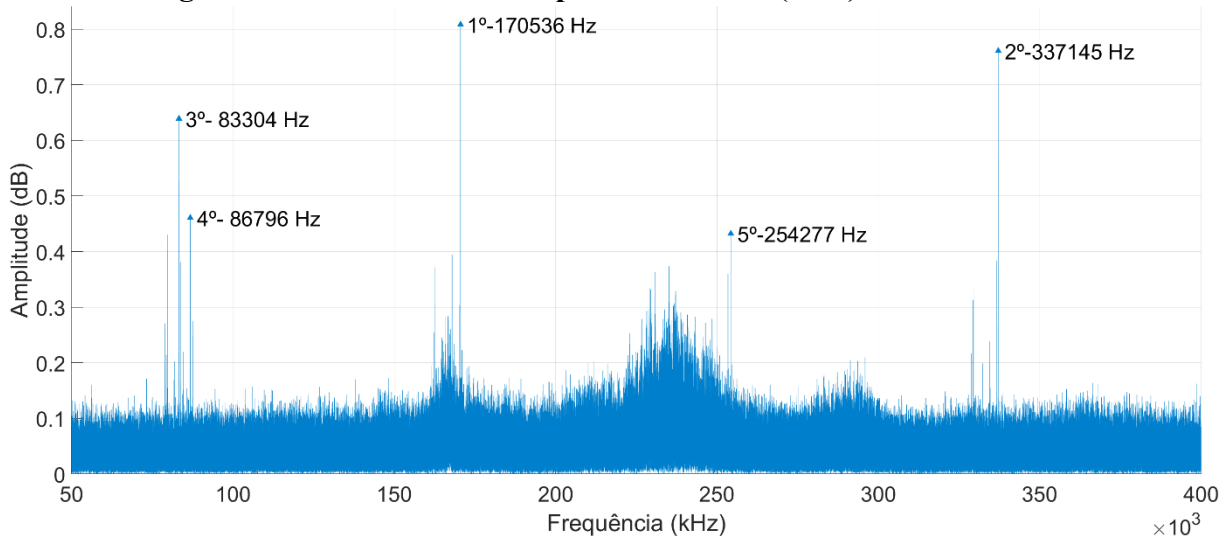
A seguir, apresenta-se a análise dos sinais EA, com foco na identificação das bandas de frequência excitadas em cada bateria de ensaios. Considera-se como bateria de ensaio a combinação de um mesmo dielétrico com um mesmo material de eletrodo.

Nos testes realizados com dielétrico à base de hidrocarboneto, foram analisados aproximadamente 8,8 GB de sinais de EA. Para os ensaios com água deionizada, outros 6,2 GB de dados foram avaliados. Por meio da Transformada Rápida de Fourier (FFT) aplicada a todos os sinais, juntamente com a identificação do período correspondente ao trem de pulsos (U), foi

possível determinar, para cada sinal, as principais frequências excitadas e suas respectivas amplitudes.

A Figura 42 ilustra, como exemplo, o espectro de frequência obtido a partir da FFT do sinal EA correspondente ao ensaio com corrente de 3 A, duração de pulso de 6 μ s, eletrodo de cobre e dielétrico de hidrocarboneto, após 60 minutos de usinagem.

Figura 42 - Transformada Rápida de Fourier (FFT) do um sinal EA



Fonte: Elaborado pelo Autor.

O resultado da FFT evidencia a presença de picos de amplitude em frequências específicas, como 83,3 kHz, 170,5 kHz e 337,1 kHz, além da ativação de faixas contínuas, especialmente entre 150–185 kHz e 225–250 kHz. Tais excitações refletem diferentes fenômenos físicos que ocorrem durante a remoção efetiva de material, como fusão, ejeção, formação de fraturas e desgaste do eletrodo, entre outros. No entanto, a análise isolada dos espectros não permite estabelecer uma associação entre as faixas de frequência e os fenômenos envolvidos, devido à complexidade do processo e à sobreposição de respostas acústicas.

Dessa forma, torna-se inviável apresentar individualmente dezenas de gráficos de FFT para fins comparativos, pois a análise visual direta se torna subjetiva, ineficiente e pouco prática. Para contornar essa limitação, adotou-se o armazenamento estruturado das amplitudes relativas a cada faixa de frequência, em intervalos de 5 kHz, resultando em um banco de dados. Esse banco contém, para cada sinal obtido em um determinado teste (com seus respectivos parâmetros, tipo de dielétrico e material de eletrodo), a amplitude de excitação correspondente a cada faixa de frequência.

Com base nesses dados, e conforme descrito por Ferreira, Maia e Amorim (2024), observa-se que as bandas de frequência associadas aos fenômenos de remoção de material em

cada par de eletrodos não variam significativamente com os parâmetros de usinagem, embora suas amplitudes possam variar. Assim, consolidam-se os valores médios de amplitude de excitação por tipo de eletrodo, possibilitando uma análise mais robusta e comparativa entre as diferentes condições ensaiadas.

4.2.1.1 Teste EDM com dielétrico com hidrocarboneto

A partir dos sinais de EA obtidos nos ensaios de eletroerosão, após o recorte dos períodos correspondentes à remoção efetiva de material e a filtragem das frequências associadas às descargas elétricas periódicas, aplicou-se a FFT para a extração das amplitudes em cada intervalo de frequência (Figura 42). A consolidação desses resultados, organizada por ensaio, tipo de eletrodo e fluido dielétrico, é apresentada na Figura 43.

Figura 43 – Base de dados da amplitude atingida em cada faixa de frequência por ensaio

Índice	Eletrodo	Dielétrico	Amp_50kHz	Amp_55kHz	Amp_60kHz	Amp_65kHz	Amp_70kHz	...	Amp_380kHz	Amp_385kHz	Amp_390kHz	Amp_395kHz	Amp_400kHz
1	Cobre	Hidrocarboneto	1.1201	1.1358	1.1489	1.1623	1.1692		1.3074	1.3048	1.2701	1.2286	1.2158
2	Cobre	Hidrocarboneto	1.1237	1.1646	1.2033	1.2447	1.2503		1.3603	1.3406	1.3263	1.3090	1.3083
3	Cobre	Hidrocarboneto	1.2112	1.2334	1.2440	1.2419	1.2433		1.3873	1.3902	1.3543	1.3173	1.2982
4	Cobre	Hidrocarboneto	0.8788	0.8969	0.8984	0.9133	0.9028		0.9192	0.9210	0.9141	0.9015	0.8936
5	Cobre	Hidrocarboneto	0.9184	0.9354	0.9404	0.9527	0.9612		0.9932	0.9877	0.9804	0.9647	0.9593
...													
1303	Grafite	Água Deionizada	35.4229	33.4120	28.7362	23.4929	21.3483		1.2534	1.1309	1.0673	1.0478	1.0496
1304	Grafite	Água Deionizada	26.6287	25.3977	22.0745	18.1307	16.0397		0.8772	0.8187	0.7709	0.7886	0.8011
1305	Grafite	Água Deionizada	26.0848	25.7591	23.1922	19.9632	18.5049		1.0651	1.0036	0.9613	0.9598	0.9650
1306	Grafite	Água Deionizada	39.1943	37.2919	32.1651	27.2449	24.7468		1.0107	0.9254	0.8948	0.9135	0.9110
1307	Grafite	Água Deionizada	77.3612	72.7171	61.8858	49.2261	43.6869		1.1526	1.0704	1.0286	1.0033	1.0127

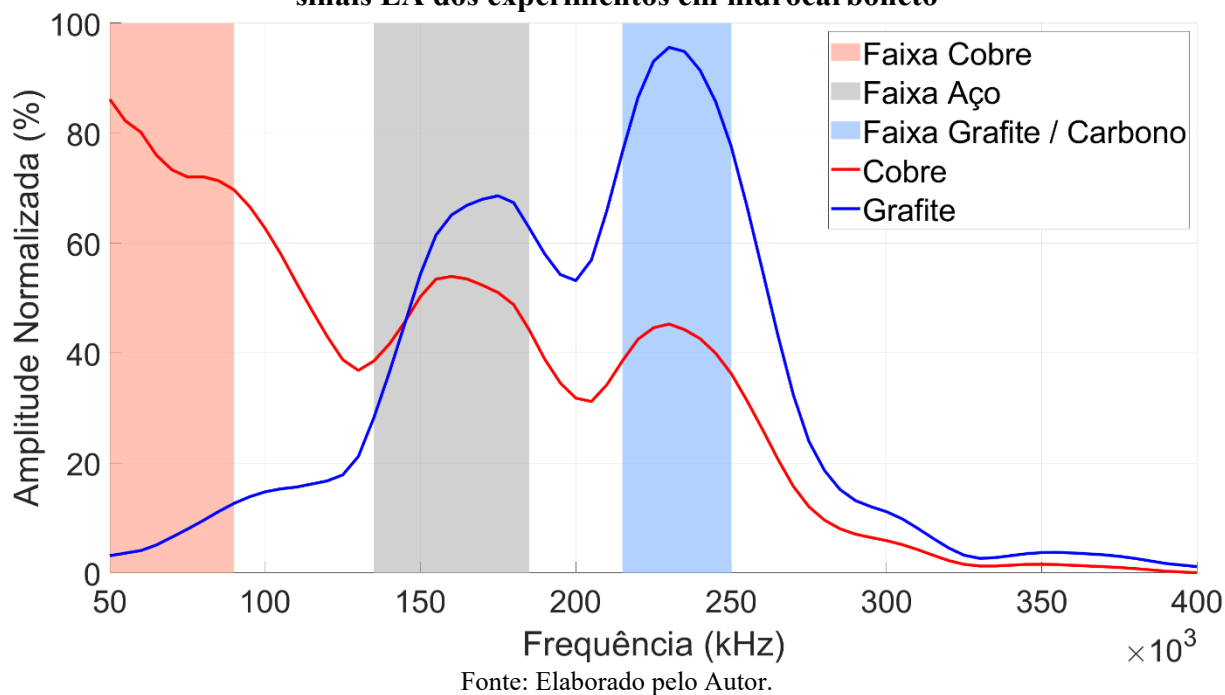
Fonte: Elaborado pelo Autor.

Com a base de dados estruturada (Figura 43), calcularam-se as médias normalizadas das amplitudes para cada faixa de frequência, excluindo outliers conforme critérios estatísticos. Esses valores permitiram a geração da Figura 44, a qual apresenta a distribuição das amplitudes médias normalizadas em função da frequência, comparando os resultados obtidos com eletrodos de cobre e grafite em ensaios realizados com dielétrico de hidrocarboneto. Toda a análise foi processada em ambiente MATLAB, permite identificar diferenças significativas nos espectros acústicos gerados por cada material.

A normalização das amplitudes mostradas na Figura 44 foi conduzida separadamente para cada bateria de ensaios conforme o material do eletrodo, permitindo uma análise comparativa direta. Verifica-se, por exclusão, uma excitação significativa na faixa de 50 a 90 kHz, com amplitudes superiores a 80% próximas de 50 kHz, exclusivamente nos ensaios com eletrodos de cobre (linha vermelha). Nos ensaios com grafite (linha azul), essa faixa

apresentou amplitudes pouco expressivas. Esses resultados indicam, de forma robusta, que as frequências entre 50 e 90 kHz estão diretamente associadas à remoção de material do eletrodo de cobre durante o processo de EDM.

Figura 44 - Distribuição normalizada das amplitudes em função das frequências dos sinais EA dos experimentos em hidrocarboneto



Ao analisar a faixa entre 135 e 185 kHz, nota-se que tanto os ensaios com cobre quanto com grafite apresentaram picos locais de excitação (variando entre 55% e 70%). Isso indica a presença de um fenômeno comum nos dois casos. Inicialmente, levanta-se a hipótese de que essa banda esteja associada à remoção de material do aço AISI H13, utilizado como peça de trabalho. Na sequência, essa suposição será avaliada por meio de uma contraprova, visando confirmar a associação entre essa faixa de frequência e o comportamento acústico da peça usinada.

Adicionalmente, observa-se outro pico local comum aos dois tipos de eletrodo na faixa de 215 a 250 kHz. Como a excitação nos ensaios com grafite (~95%) é significativamente superior à observada com cobre (~45%), essa banda é atribuída ao próprio eletrodo de grafite. Tal hipótese é reforçada pelo fato de que, ao contrário do cobre, o grafite manifesta essa faixa de forma marcante apenas quando utilizado como eletrodo.

Entretanto, vale destacar que o fluido à base de hidrocarboneto também atua como fonte de carbono, participando do processo de carbonetização da superfície da peça de trabalho e do eletrodo de cobre. Esse fenômeno de deposição de carbono justifica a presença, ainda que com

menor intensidade (aproximadamente 45%), dessa faixa de excitação também nos testes com cobre, pois a origem do carbono está no dielétrico. Por outro lado, nos ensaios com grafite, a amplitude de excitação atinge cerca de 95%, evidenciando a degradação direta do material, com liberação de material de carbono oriundas do próprio eletrodo.

Para validar as hipóteses quanto à origem das bandas de frequência identificadas nos sinais de EA, realizou-se um ensaio de contraprova. A alternativa mais adequada foi a utilização de um dielétrico isento de carbono. A substituição do fluido à base de hidrocarboneto por água deionizada permite isolar a influência direta dos materiais dos eletrodos sobre a resposta acústica, eliminando interferências decorrentes da carbonetização induzida pelo dielétrico.

4.2.1.2 Teste EDM com dielétrico em água deionizada

Com o objetivo de validar e aprofundar as interpretações obtidas nos ensaios com fluido dielétrico à base de hidrocarboneto, foram repetidos os testes utilizando água deionizada como fluido de referência. A utilização de um segundo fluido permite confirmar, complementar ou refutar as interpretações realizadas a partir dos ensaios com hidrocarboneto, conferindo maior robustez às conclusões sobre a origem dos fenômenos acústicos associados ao processo de EDM.

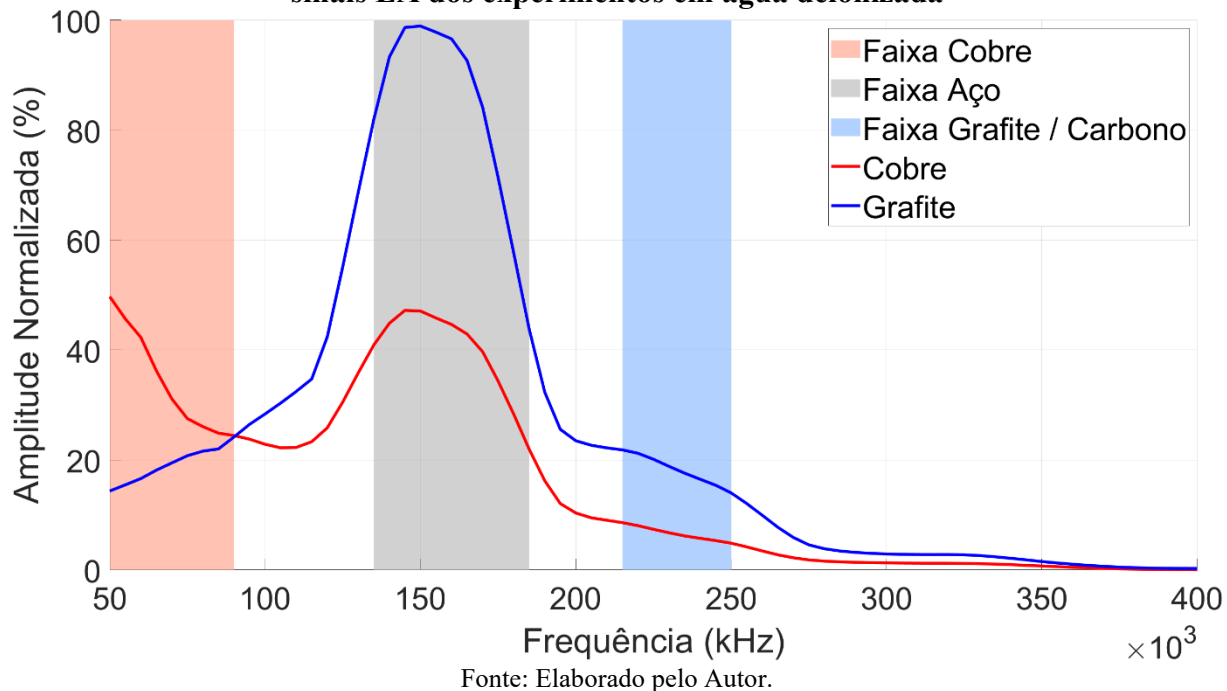
Ao todo, foram conduzidos 32 ensaios adicionais, divididos igualmente entre eletrodos de cobre (16) e grafite (16), mantendo-se os mesmos parâmetros de usinagem aplicados anteriormente. Os sinais de EA resultantes totalizaram 6,2 GB de dados, os quais foram submetidos a normalização e à exclusão de outliers. A partir dessa base de dados consolidada (Figura 43), obteve-se a distribuição média das amplitudes por faixa de frequência, conforme apresentado na Figura 45.

Com os resultados da normalização das frequências excitadas no uso da água deionizada como dielétrico na Figura 45, observa-se a manifestação da faixa entre 50 e 90 kHz com amplitudes significativas apenas nos ensaios realizados com eletrodos de cobre. Esse comportamento é similar ao observado nos testes com hidrocarboneto, reforçando a hipótese de que essa faixa de frequência está associada ao processo de remoção de material do eletrodo de cobre.

Além disso, o máximo local na faixa entre 135 e 185 kHz também se repete para ambos os materiais de eletrodo: 48% de amplitude com cobre e 99% com grafite. Esses resultados confirmam a hipótese de que essa banda está relacionada ao aço AISI H13, peça de trabalho comum a todos os ensaios. Isso também elimina a possibilidade de que a banda entre 215 e

250 kHz esteja vinculada ao aço, pois essa faixa não apresentou excitação relevante neste conjunto de experimentos.

Figura 45 - Distribuição normalizada das amplitudes em função das frequências dos sinais EA dos experimentos em água deionizada



A baixa resposta observada entre 215 e 250 kHz nos ensaios com eletrodo de cobre (amplitudes inferiores a 10%) está associada à quantidade mínima de carbono presente no sistema. Como, nesta configuração, a única fonte de carbono é o próprio aço AISI H13, essa baixa amplitude reforça que essa faixa não está associada nem ao cobre nem ao aço, mas sim ao carbono presente no sistema.

Por outro lado, essa mesma faixa (215 a 250 kHz) apresentou excitação relativamente superiores (23%) nos ensaios com eletrodo de grafite, o que se explica pela própria natureza do material, que é uma fonte significativa de carbono. Assim, por exclusão lógica e comparação entre os ensaios com diferentes dielétricos, torna-se evidente a associação das bandas de frequência com os respectivos materiais:

- Faixa de 50–90 kHz pela resposta da remoção do cobre;
- Faixa de 135–185 kHz pela resposta da remoção do aço AISI H13;
- Faixa de 215–250 kHz pela resposta da remoção do grafite e carbonetização sobre as superfícies dos materiais.

Com base nos dados apresentados, a correlação entre os materiais e as respectivas bandas de excitação pode ser explicada por suas propriedades físicas e mecânicas:

- Faixa do cobre (50–90 kHz): O cobre possui alta condutividade térmica e elétrica, facilitando a dissipação de energia térmica durante as descargas. Isso resulta em remoção de material com menor variação térmica, gerando frequências acústicas relativamente baixas, associadas à ejeção de partículas e à interação eletrotérmica com o dielétrico.
- Faixa do aço AISI H13 (135–185 kHz): O aço apresenta maior dureza e resistência térmica, além de condutividade elétrica inferior à do cobre. Durante o EDM, a remoção de material ocorre de forma mais abrupta, com maior incidência de microfraturas térmicas, o que desloca a excitação para frequências mais altas — comportamento típico de processos de fratura e liberação de tensões internas.
- Faixa do grafite (215–250 kHz): O grafite, material anisotrópico com estrutura cristalina em camadas, possui condutividade térmica e elétrica inferior à do cobre e superior à do aço. Suas características estruturais favorecem a liberação de partículas de carbono durante o processo erosivo, produzindo resposta acústica em faixas de frequência relativamente mais elevadas. Essa resposta converge com a desintegração estrutural de materiais ricos em carbono.

Considerando que cada material apresenta uma assinatura acústica específica, o uso de sensores de emissão acústica (EA) se mostra uma ferramenta eficaz para identificar, em tempo real, qual material está sendo removido durante a usinagem. Isso possibilita o monitoramento contínuo da eficiência do processo, sem necessidade de interrupções.

A determinação dessas faixas de excitação é extremamente útil para o monitoramento e a otimização do processo de EDM, pois, além de permitir a identificação em tempo real da remoção de material, também pode detectar falhas e anomalias ao longo da usinagem. Por exemplo, se a usinagem do aço AISI H13 estiver em andamento, mas não forem detectados sinais na faixa de 130–190 kHz, isso pode indicar que a remoção de material está comprometida.

Esse conhecimento contribui significativamente para a busca por parâmetros ótimos do processo. Ao compreender as faixas de excitação características de cada material, torna-se possível observar padrões de resposta em função do desempenho do EDM, permitindo ajustes nos parâmetros elétricos, como corrente, duração do pulso de tensão e intervalo entre pulsos. Isso para maximizar a remoção do material desejado.

Para correlacionar as respostas dos sinais de EA com os resultados de desempenho e qualidade do processo de EDM, torna-se oportuno aprofundar a análise dos sinais previamente filtrados por faixa de frequência. Essa abordagem permite avaliar o comportamento individual

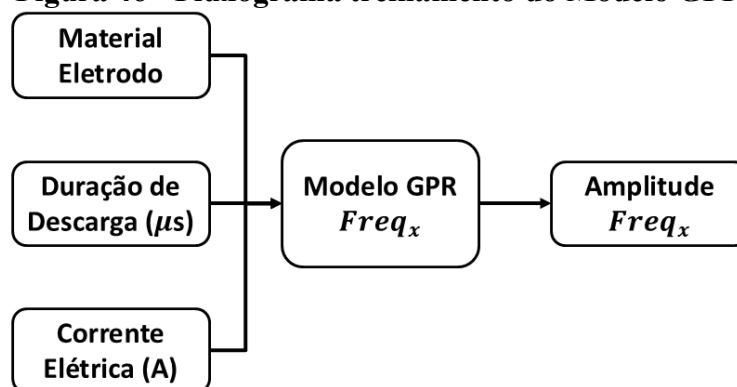
de cada banda em relação aos indicadores de desempenho, como taxa de remoção de material e desgaste dos eletrodos, bem como sua dependência em relação aos parâmetros de usinagem, como a duração do pulso de tensão e a intensidade da corrente elétrica.

4.2.1.3 Processo de Regressão

A partir da base estruturada de sinais de EA e amplitudes por faixa de frequência (Figura 43), aplicou-se o modelo de Regressão por Processo Gaussiano (GPR) com o objetivo de estimar o comportamento contínuo das respostas espectrais ao longo do espaço experimental. Essa abordagem permite estimar tendências e variações nos sinais, mesmo entre combinações de parâmetros que não foram diretamente testadas. Dessa maneira, a aplicação do GPR contribuiu para ampliar a compreensão do processo eletroerosivo, possibilitando a identificação de padrões, zonas de transição e regiões de maior sensibilidade dos sinais, o que é fundamental para o desenvolvimento de estratégias de monitoramento e controle do EDM.

Com base nas variáveis de entrada, do material do eletrodo, da duração da descarga e da intensidade da corrente elétrica, foram desenvolvidos 71 modelos GPR preditivos. Cada modelo responsável por prever uma faixa de 5 kHz no intervalo entre 50 e 400 kHz. A Figura 46 apresenta o fluxograma do processo de treinamento dos modelos, evidenciando as variáveis utilizadas como preditores e a saída modelada para cada frequência analisada.

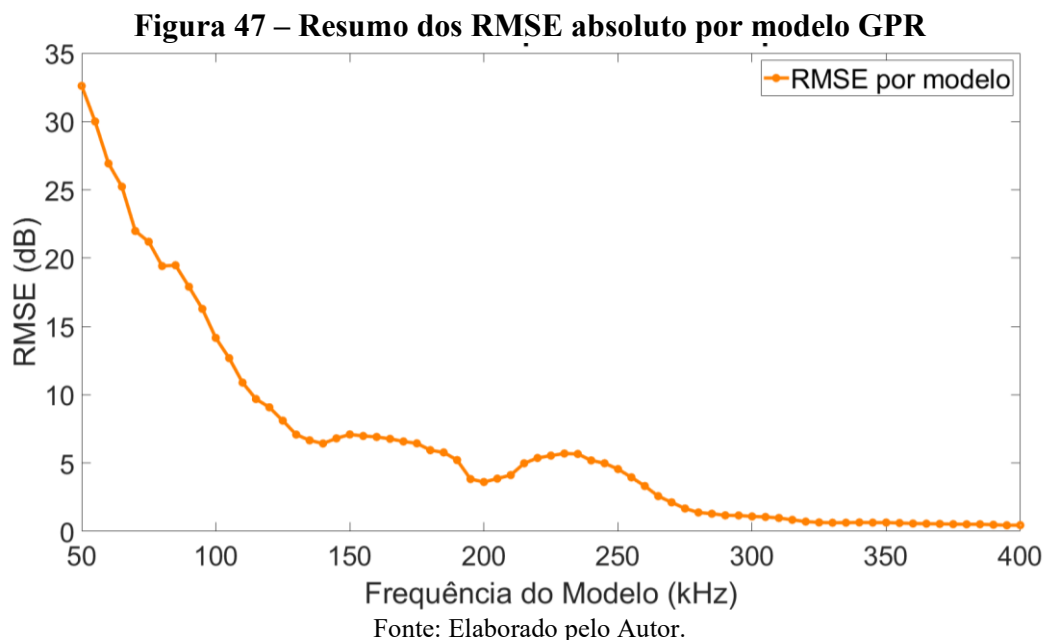
Figura 46 - Fluxograma treinamento do Modelo GPR



Fonte: Elaborado pelo Autor.

O treinamento individual de cada modelo para cada faixa de frequência, considerando como variáveis de entrada o tipo de eletrodo, o valor de corrente elétrica e a duração da descarga, conferiu maior flexibilidade e independência às predições. A análise dos modelos resultantes indicou que o erro quadrático médio (RMSE) foi mais elevado nas faixas de

frequência mais baixas, reduzindo-se progressivamente nas faixas mais altas, conforme ilustrado na Figura 47.



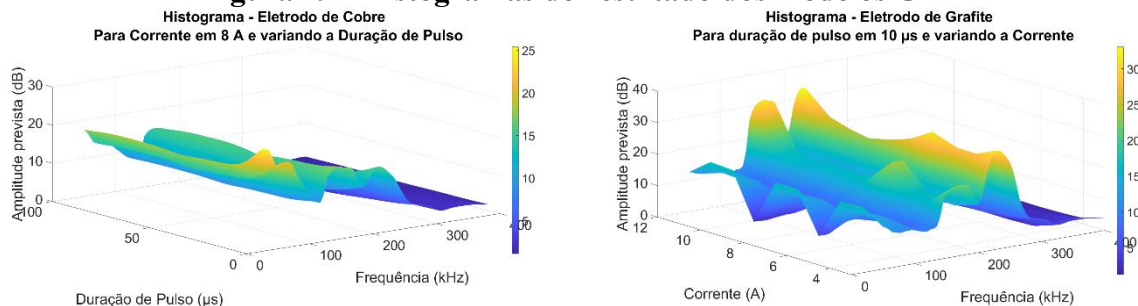
A variação do RMSE pode ser atribuída à maior instabilidade e variabilidade dos sinais nas baixas frequências, influenciada por oscilações inerentes ao processo, diferenças marcantes entre os materiais dos eletrodos e presença residual de ruído, mesmo após a exclusão criteriosa de outliers e filtros. O maior erro registrado foi de 32,6 dB para o modelo correspondente à faixa de 50 kHz, enquanto o menor RMSE, de apenas 0,45 dB, foi observado na faixa de 395 kHz. Esse comportamento destaca que os modelos GPR apresentam desempenho superior em faixas com padrões espectrais mais estáveis, sugerindo a possibilidade de empregar técnicas alternativas para predição de amplitudes em regiões mais ruidosas e instáveis do espectro.

Utilizando os modelos desenvolvidos, foi possível implementar uma interface interativa em MATLAB capaz de prever a amplitude dos sinais de emissão acústica em função dos parâmetros de entrada. A ferramenta aceita valores contínuos de corrente (entre 3 e 12 A) e duração de pulso (entre 6 e 100 μ s), dentro dos limites experimentais testados, permitindo ao usuário selecionar o material do eletrodo previamente treinado e gerar predições para diferentes condições de usinagem. A Figura 48 apresenta a interface da aplicação, desenvolvida especificamente para fornecer respostas espectrais previstas a partir dos modelos GPR aplicados ao processo EDM.

Figura 48 - Ferramenta de predição da resposta acústica de EDM

Fonte: Elaborado pelo Autor.

A partir da ferramenta, a geração de gráficos tridimensionais permite visualizar a predição da amplitude dos sinais de emissão acústica em função das faixas de frequência e da variação controlada de um dos parâmetros de usinagem. Na Figura 49, o primeiro gráfico refere-se ao eletrodo de cobre com corrente fixa em 8 A, permitindo a análise da resposta espectral em função da duração do pulso (6 a 100 μ s). Já o segundo gráfico apresenta o comportamento do eletrodo de grafite com duração de pulso fixa em 10 μ s e variação da corrente elétrica entre 3 e 12 A. A ferramenta permite realizar qualquer combinação de análise com os modelos GPR desenvolvidos, oferecendo grande flexibilidade e velocidade para investigação de padrões espectrais.

Figura 49 - Histogramas do resultado dos modelos GPR

Fonte: Elaborado pelo Autor.

As predições demonstram, por exemplo, uma excitação expressiva para o eletrodo de grafite nas faixas de 215–250 kHz e 135–185 kHz ao longo de toda a variação de corrente, enquanto o eletrodo de cobre apresenta amplitudes mais elevadas nas baixas frequências

(próximas a 50 kHz) ao longo de toda a faixa de duração de pulso analisada. Esses resultados demonstram a consistência em reproduzir padrões espectrais previamente identificados e colaboram com a metodologia adotada para caracterização das bandas de frequência associadas a cada material.

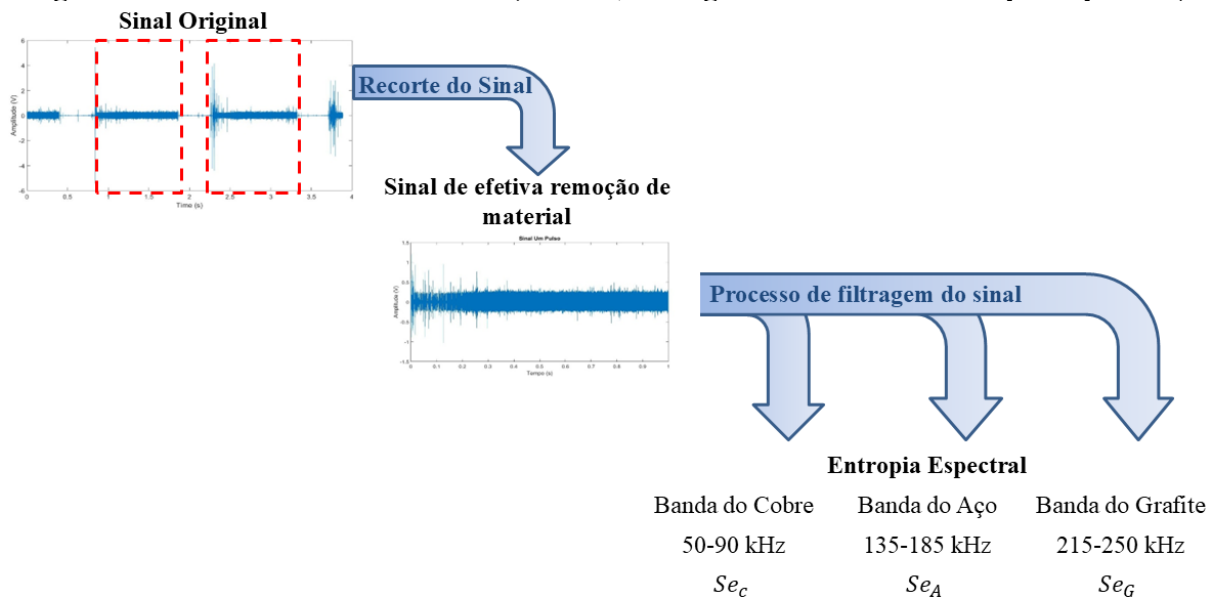
Além disso, a ferramenta desenvolvida permite mapear, de forma parametrizada, as regiões de maior excitação espectral em função das variáveis de usinagem, o que representa uma vantagem significativa para o entendimento dos fenômenos físicos envolvidos no EDM. Tal abordagem não apenas fortalece a compreensão do processo, como também oferece subsídios para intervenções mais eficazes no controle da usinagem, especialmente em faixas com maior incerteza preditiva (RMSE elevado), viabilizando o aprimoramento contínuo dos modelos e a otimização do desempenho do processo de eletroerosão.

4.2.2 Entropia Espectral

Com os valores de taxa de remoção de material (V_w) e de desgaste dos eletrodos (V_e), tornou-se possível relacionar a performance do processo de EDM com a entropia espectral (Se) dos sinais de emissão acústica obtidos em cada ensaio. Para estabelecer essa correlação, foi essencial realizar previamente a caracterização das bandas de frequência associadas a cada fenômeno de remoção de material, conforme determinado nas análises espectrais anteriores.

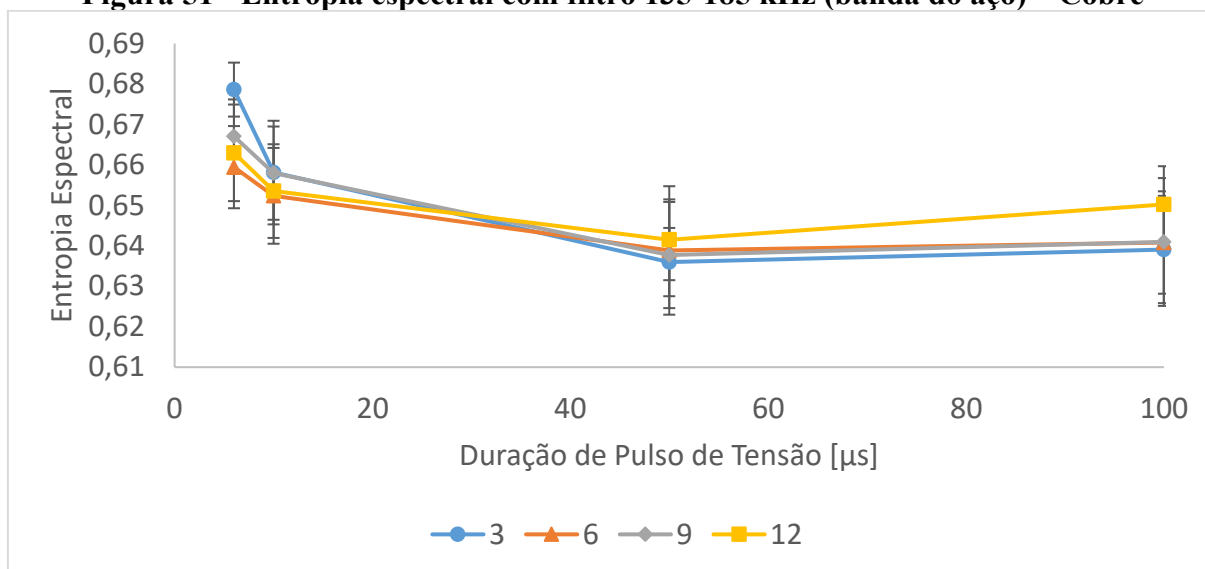
Após a aquisição dos sinais de EA durante os testes, foram selecionados apenas os segmentos correspondentes aos períodos de efetiva remoção de material (denominados como trens de pulso - U). Esses trechos foram então submetidos a filtros passa-faixa específicos, correspondentes às bandas previamente atribuídas à erosão do cobre (50–90 kHz), do aço (135–185 kHz) e do grafite (215–250 kHz). Para cada banda filtrada, calculou-se a entropia espectral, resultando em um valor único que representa o grau de organização do respectivo segmento de sinal.

Essa abordagem permite converter cada trem de pulsos em um conjunto padronizado de três valores de entropia espectral, um para cada banda de interesse, que são então associados aos respectivos parâmetros de desempenho do processo. A sequência metodológica descrita está ilustrada no fluxograma da Figura 50.

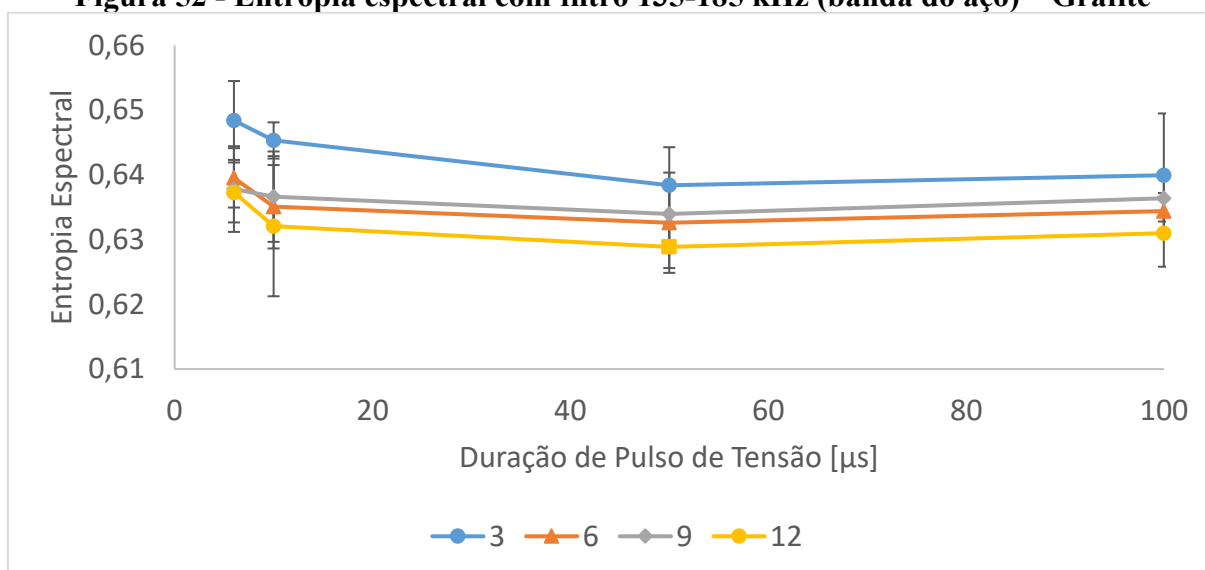
Figura 50 - Processamento do sinal (recorte, filtragem e análise de entropia espectral)

Fonte: Elaborado pelo Autor.

Um dos achados relevantes e inovadores deste estudo foi a identificação de uma relação inversamente proporcional entre a entropia espectral e a taxa de remoção de material (V_w). Essa relação foi observada a partir da análise dos sinais de EA filtrados na faixa de frequência associada à remoção do aço AISI H13 (135 a 185 kHz). Aplicando a métrica de entropia espectral apenas sobre os trechos do sinal que correspondem à efetiva remoção de material, constatou-se que, para uma mesma corrente elétrica, a menor entropia ocorre exatamente na condição com maior V_w . Ou seja, à medida que se varia a duração do pulso de tensão (t_i), o ponto de máxima eficiência do processo, representado pela maior taxa de remoção, corresponde ao menor valor de entropia espectral. Esse comportamento foi consistentemente verificado tanto nos ensaios com eletrodos de cobre (Figura 51), quanto com grafite (Figura 52), reforçando a robustez da análise e o potencial da entropia espectral como indicador de desempenho da EDM.

Figura 51 - Entropia espectral com filtro 135-185 kHz (banda do aço) – Cobre

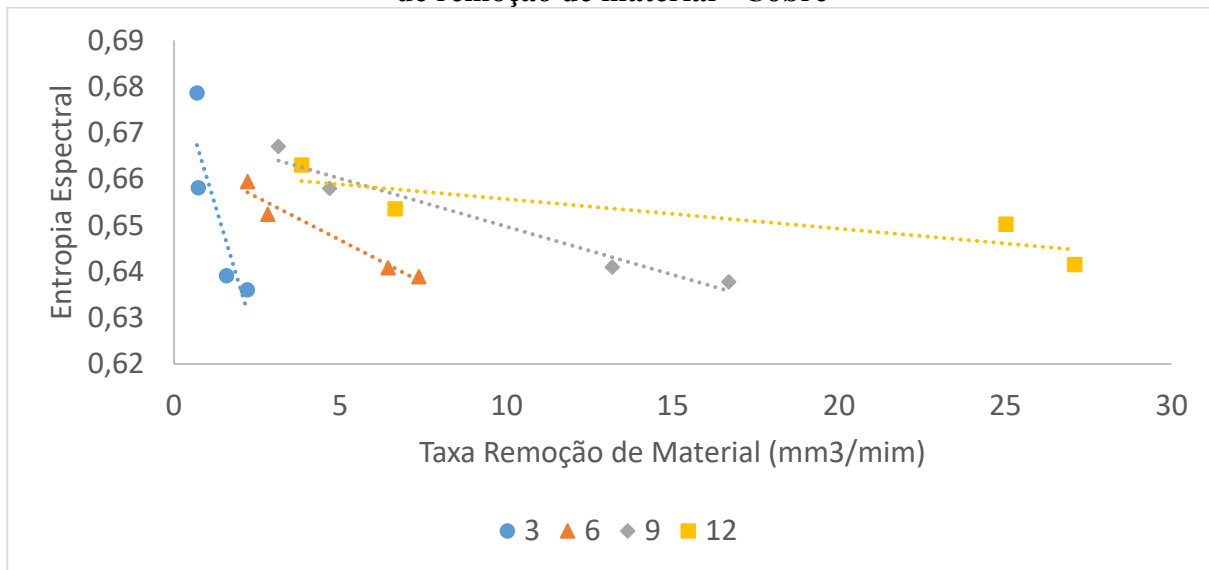
Fonte: Elaborado pelo Autor.

Figura 52 - Entropia espectral com filtro 135-185 kHz (banda do aço) – Grafite

Fonte: Elaborado pelo Autor.

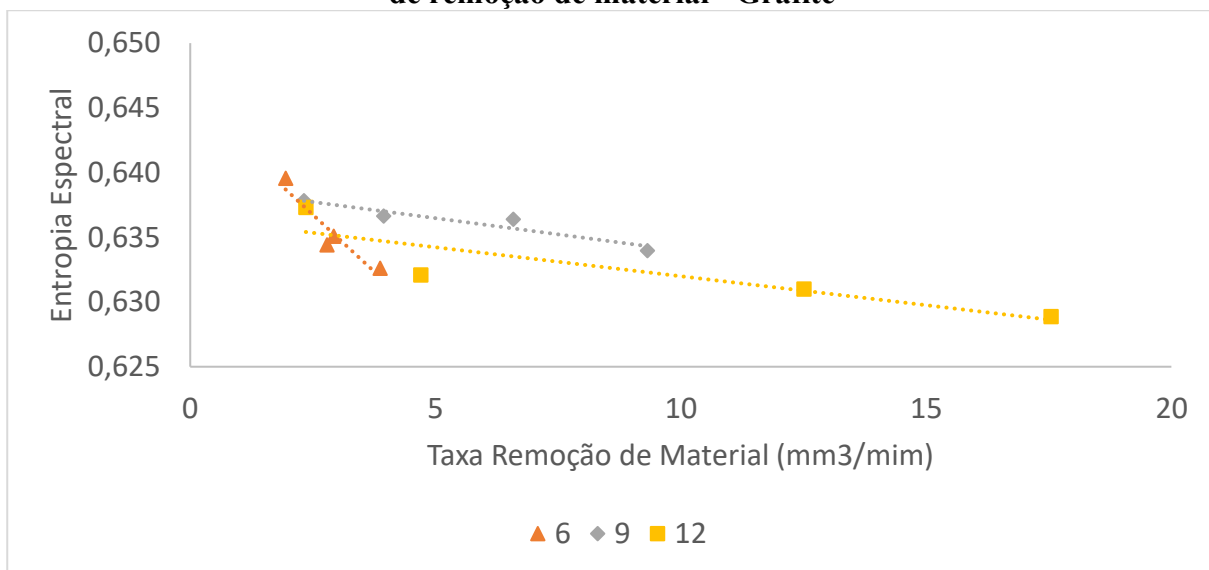
Com o intuito de reforçar a correlação observada entre a resposta acústica na banda de frequência associada ao aço e a remoção efetiva de material da peça, foram gerados gráficos relacionando diretamente a entropia espectral com a taxa de remoção de material, tanto para os ensaios com eletrodo de cobre quanto para os com grafite. A Figura 53 apresenta os dados obtidos com eletrodo de cobre, enquanto a Figura 54 exibe os resultados dos ensaios com eletrodo de grafite. As curvas foram agrupadas por valores de corrente elétrica de descarga parametrizados, permitindo visualizar diretamente a tendência de redução da entropia espectral à medida que a taxa de remoção de material aumenta.

Figura 53 - Entropia espectral com filtro 135-185 kHz (banda do aço) em função da taxa de remoção de material - Cobre



Fonte: Elaborado pelo Autor.

Figura 54 - Entropia espectral com filtro 135-185 kHz (banda do aço) em função da taxa de remoção de material - Grafite



Fonte: Elaborado pelo Autor.

O comportamento inversamente proporcional entre a entropia espectral e a taxa de remoção pode ser interpretado com base no nível de organização dos sinais acústicos gerados durante as descargas. Tal comportamento indica que, em condições de usinagem mais eficientes, as descargas elétricas geram sinais acústicos mais organizados e previsíveis. Essa organização se traduz em menor entropia, sugerindo maior regularidade na sequência de descargas, com menor incidência de eventos aleatórios como curtos-circuitos, arcos elétricos, oscilações caóticas ou instabilidades no canal de plasma.

Esse resultado é consistente com a natureza do processo de EDM, no qual a remoção de material depende fortemente da estabilidade e intensidade térmica das descargas. A eficiência na erosão gera crateras mais uniformes e favorecem a ejeção do material fundido, características que se refletem em padrões espectrais mais coerentes e, portanto, resultantes de sinais EA de menor entropia. Assim, a entropia espectral torna-se um novo indicador da eficiência do processo, capaz de traduzir, de forma quantitativa, a qualidade das descargas e o desempenho da remoção de material.

A utilização de inúmeros trens de pulso (U) para cada ensaio com dielétrico em hidrocarboneto gerou naturalmente um desvio padrão para encontrar a média de entropia de cada teste, essa variação encontrada é refletida pelas barras de desvios na Figura 51 e Figura 52. Os valores considerados como outliers (valores atípicos) no método dos quartis foram removidos das análises.

Nos resultados com dielétrico hidrocarboneto, valor máximo de variação de 2,5% para o eletrodo de cobre e 1,7% para o eletrodo de grafite. Essas variações refletem a sensibilidade e repetibilidade do sinal EA para os fenômenos do processo EDM. Parâmetros extremos, presença de detritos ou cavacos no gap de trabalho, flutuação na tensão e corrente durante as descargas, entre outras condições tendem a gerar instabilidades na formação do canal de plasma, flutuações no volume removido e variações significativas na estrutura espectral do sinal, refletidas como desvios padrão no resultado da entropia ao ser comparado entre ensaios.

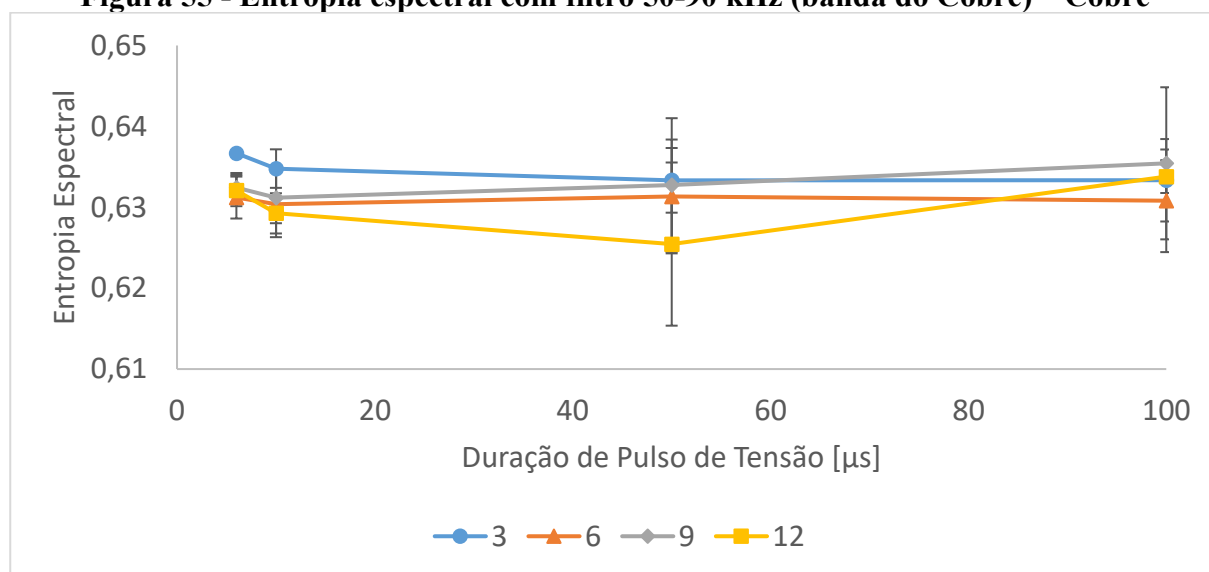
Grosse e Ohtsu (2008) já destacavam a elevada variabilidade nas respostas dos sinais de EA, mesmo sob condições rigorosamente controladas de ensaio. Essa variabilidade ocorre porque os sinais de EA são altamente sensíveis a qualquer heterogeneidade no sistema gerador, o que pode resultar em variações na amplitude ou no comprimento de onda dos sinais capturados.

É importante ressaltar que a grandeza da entropia não segue, necessariamente, a mesma ordem dos valores da taxa de remoção, uma vez que seu cálculo é feito de forma normalizada em relação ao conjunto de dados de cada análise. No entanto, essa característica é justamente o que confere à entropia espectral seu valor como ferramenta de monitoramento: durante a usinagem, a obtenção de valores baixos de entropia, comparativamente dentro da mesma condição de montagem, indica proximidade de condições ideais de remoção de material. Isso permite identificar tendências de desempenho sem necessidade de múltiplos ensaios, interrupções no processo ou medições físicas, demonstrando o potencial da técnica para aplicações em monitoramento em tempo real.

Continuando, analisou-se o comportamento da entropia espectral na bada do cobre (50-

90 kHz) em relação à taxa de desgaste dos eletrodos (V_e) de cobre. Nesse material (Figura 55), observou-se um comportamento semelhante ao verificado na faixa do aço: quanto maior o desgaste do material do eletrodo, menor é o valor da entropia espectral no sinal filtrado. Inclusive se destaca que a entropia respondeu acompanhando menor entropia nas correntes de 3, 6 e 9 A com o $t_i = 10 \mu s$ e para corrente de 12 A com $t_i = 50 \mu s$. No entanto, vale destacar que, neste caso, as variações encontradas proporcionalmente menos expressivas, a maior variação se destacou com 1,6%. Esse resultado reforça a sensibilidade da análise.

Figura 55 - Entropia espectral com filtro 50-90 kHz (banda do Cobre) – Cobre



Fonte: Elaborado pelo Autor.

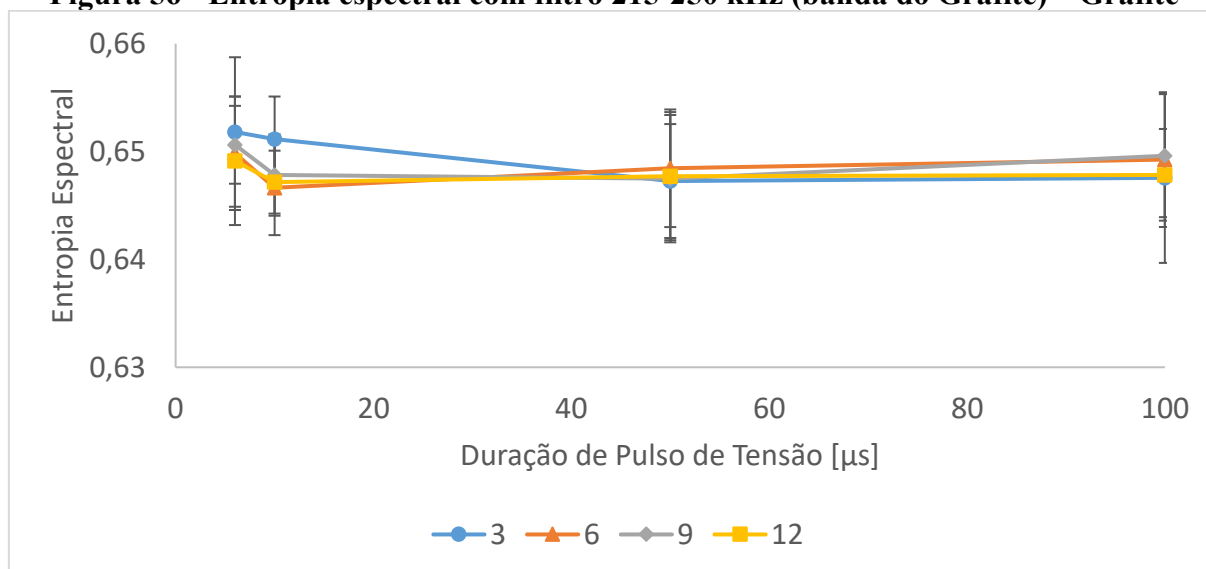
Uma importante observação, o intervalo do cobre (50 a 90 kHz) encontra-se próximo do limite inferior de operação do sensor piezoelétrico utilizado (50kHz). A maior excitação sendo justamente no limite inferior de operação do sensor, pode induzir a oportunidades a serem encontradas, necessitando de possíveis ajustes no filtro da banda de frequência e necessidade de um sensor com maior banda de operação, tendo capturas confiáveis com menores frequências.

O comportamento da entropia é atribuído ao mesmo fato da maior incidência de descargas efetivas e estáveis durante a remoção do material do eletrodo, as quais geram assinaturas acústicas mais consistentes e menos aleatórias. Também, a menor expressividade da variação da entropia, acompanhada de menores desvios padrão, sugere confiabilidade, repetibilidade e sensibilidade da banda de cobre (50–90 kHz) para captar com precisão esse fenômeno.

Na análise do eletrodo de grafite (Figura 56), o padrão se mantém: a menor entropia do

sinal filtrado ocorre nas condições de maior desgaste. Isso reforça a tese de que a entropia espectral é um indicativo confiável da intensidade e consistência no processo erosivo. No entanto, as variações observadas foram discretas, acompanhadas por barras de desvios ligeiramente menores (desvio máximo de 1,2%) em comparação aos ensaios com cobre.

Figura 56 - Entropia espectral com filtro 215-250 kHz (banda do Grafite) – Grafite



Fonte: Elaborado pelo Autor.

Esse comportamento está relacionado à natureza do grafite, que apresenta menor condutividade térmica e elétrica em relação ao cobre, além de maior estabilidade volumétrica. Esses são os fatores que possivelmente contribuem para a geração de sinais de EA mais limpos e estáveis. A menor variabilidade também sugere que a banda de frequência selecionada (215-250 kHz associada ao grafite) é mais adequada à detecção das emissões acústicas geradas especificamente durante o desgaste desse tipo de eletrodo, evidenciando a importância da correta escolha das faixas de frequência para as análises.

Observou-se que, apenas na condição de corrente elétrica de 3 A, o comportamento esperado de redução progressiva da entropia entre 6 e 50 μ s de duração do pulso de tensão não foi plenamente replicado. Embora a menor entropia estivesse projetada para ocorrer em $t_i = 10 \mu$ s, a variação observada nesse ponto foi de 0,6%. Mesmo após o tratamento estatístico dos dados, com a remoção de outliers pelo método dos quartis, a proximidade entre os valores permite considerar que, dentro da margem de erro experimental, o ponto de $t_i = 10 \mu$ s ainda poderia ser projetado com a menor entropia para essa corrente. Portanto, embora o valor médio não tenha coincidido exatamente com a tendência, esse pequeno desvio não compromete a conclusão geral. Ao contrário, reforça a sensibilidade da abordagem adotada e destaca a

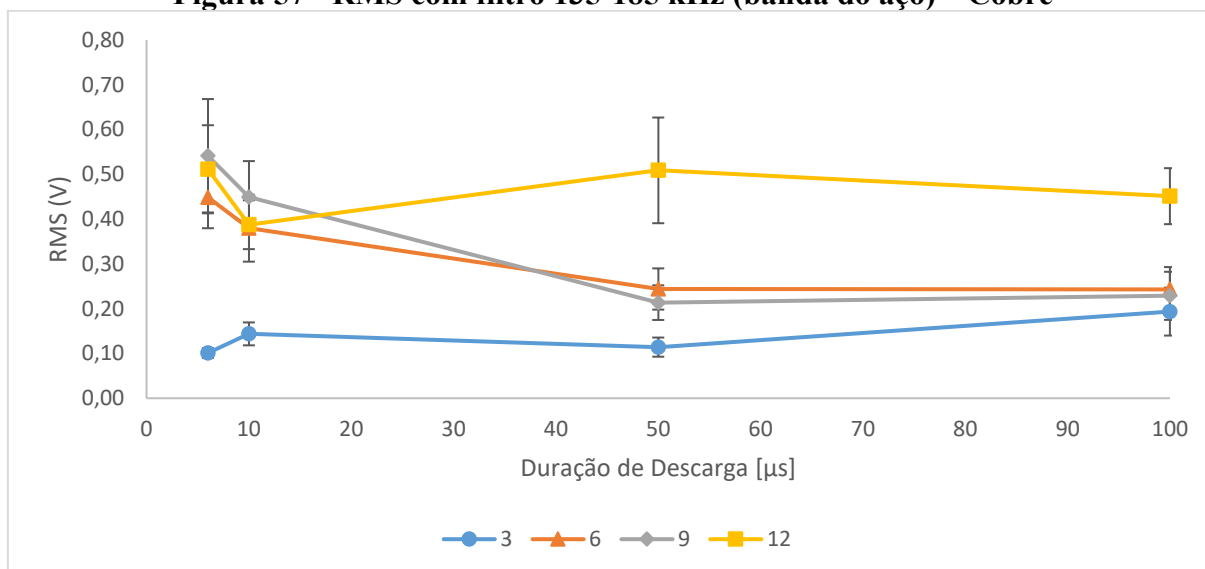
oportunidade de aprimorar a delimitação das faixas de frequência, buscando maior precisão na identificação dos fenômenos relacionados à remoção de material.

Em paralelo, o estudo de Ferreira et al. (2022) aponta que os sinais de emissão acústica provenientes da usinagem com eletrodos de grafite em aço AISI H13 tendem a apresentar maior instabilidade. Contudo, os resultados obtidos indicam que, quando os sinais são devidamente filtrados nas bandas de frequência específicas de cada fenômeno, a estabilidade é equivalente à observada nos sinais oriundos de outros materiais. Isso demonstra que, desde que corretamente segmentados e analisados, os sinais de EA oferecem alto potencial para mapear e caracterizar com precisão os fenômenos envolvidos no processo de eletroerosão.

4.2.3 Valor Eficaz

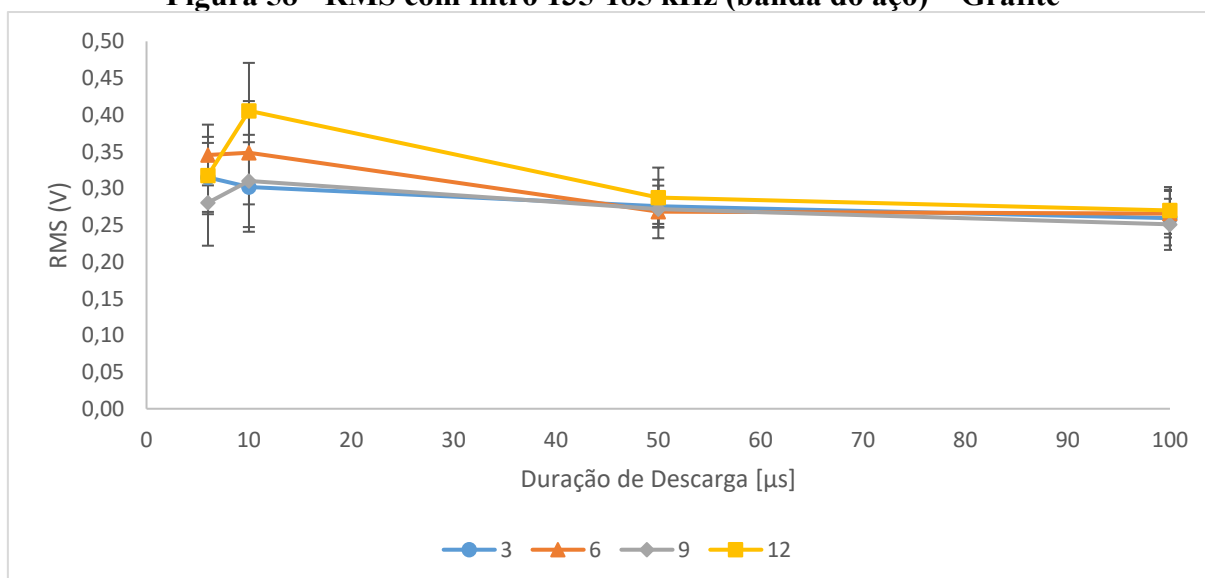
Utilizando o mesmo método de processamento aplicado à entropia espectral, foram realizadas as análises do valor eficaz (RMS) dos sinais de emissão acústica, conforme apresentado na Figura 50. A metodologia considera o recorte do sinal no intervalo de remoção efetiva de material, filtragem por faixa de frequência e posterior cálculo do valor RMS para cada condição de usinagem.

No entanto, os resultados obtidos com os eletrodos de cobre não revelaram correlações significativas entre o RMS e a taxa de remoção de material da peça de aço, como ilustrado na Figura 57. Além disso, observou-se uma elevada variabilidade nos dados, com erros relativos expressivos. Um exemplo é a condição de 12 A e $t_i = 50 \mu s$, na qual a variação atingiu 69%, comprometendo a confiabilidade da análise para esse indicador.

Figura 57 - RMS com filtro 135-185 kHz (banda do aço) – Cobre

Fonte: Elaborado pelo Autor.

Nessas condições, tanto para os ensaios com eletrodo de cobre quanto com grafite (Figura 58), não foi possível identificar um padrão ou comportamento esperado na relação entre os valores eficazes (RMS) e a taxa de remoção de material. No caso do grafite, observa-se uma tendência de convergência dos valores de RMS para aproximadamente 0,28 V, independentemente da duração do pulso ou da corrente elétrica aplicada.

Figura 58 - RMS com filtro 135-185 kHz (banda do aço) – Grafite

Fonte: Elaborado pelo Autor.

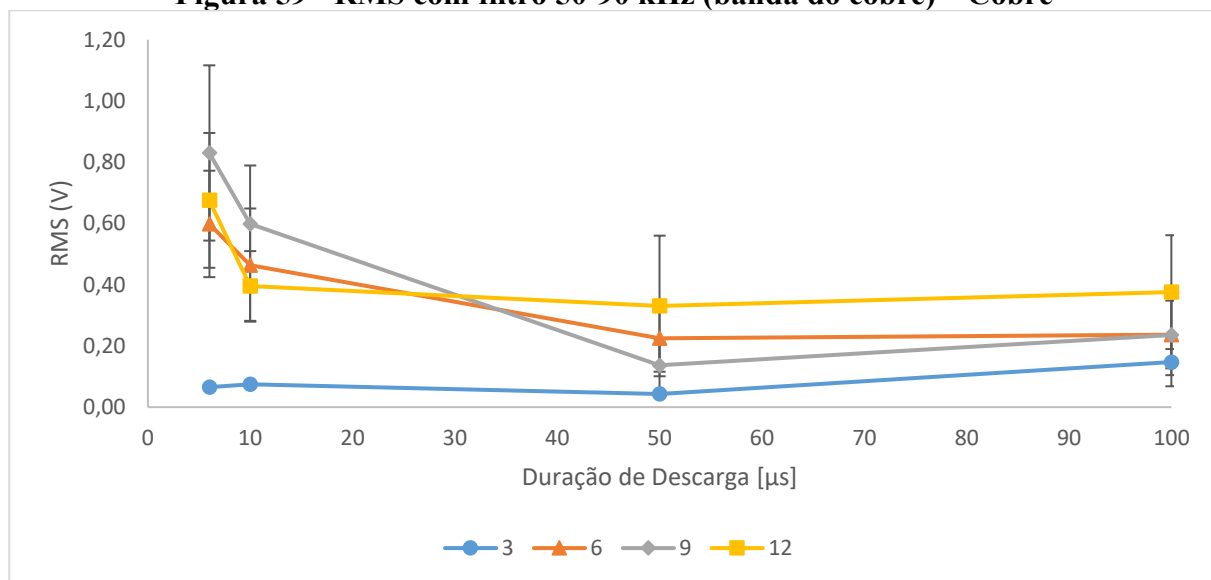
Essa ausência de correlação direta pode ser explicada pela complexidade dos sinais de EA, os quais são influenciados simultaneamente por diversos fenômenos da usinagem por

EDM, como formação do canal de plasma, ejeção de detritos, variações de pressão no dielétrico, entre outros fatores. Assim, é possível que o valor RMS esteja refletindo outros aspectos do processo que não foram objeto de investigação neste trabalho, ou que sua sensibilidade seja inferior para representar diretamente os fenômenos associados à remoção de material.

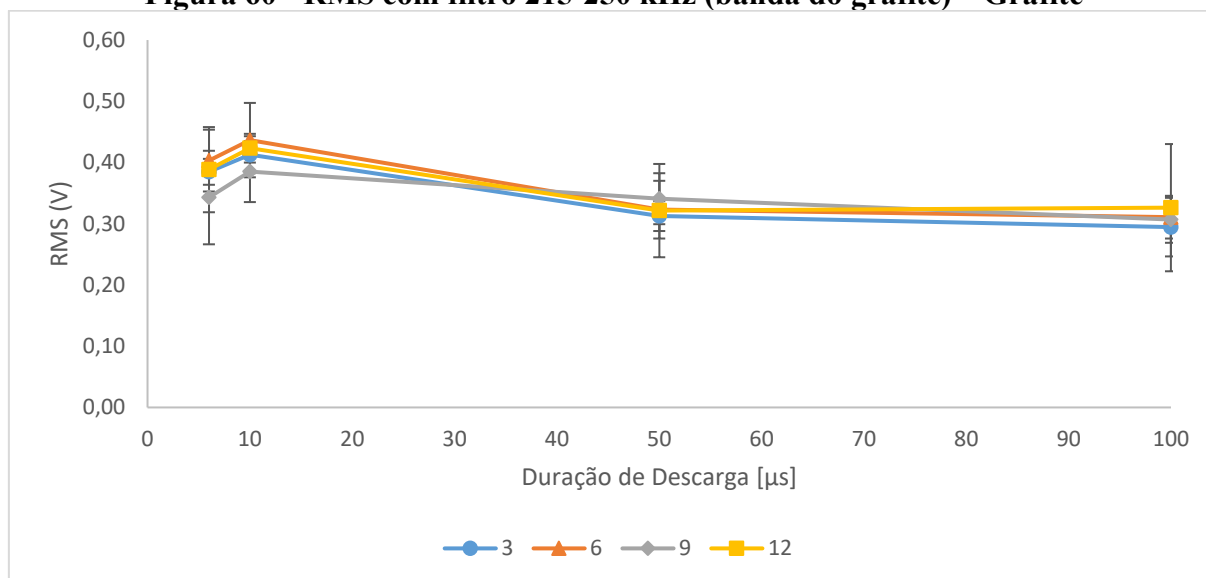
Autores como Ho e Newman (2003) explicam que, no EDM, o aumento da corrente e da duração de pulso de tensão tende a gerar descargas com maior energia, promovendo maior volume de material removido, porém também maior geração de detritos, instabilidades do canal de plasma e microexplosões caóticas. O que sugere que sinais de maior RMS apresentariam comportamento proporcional a eficiências da EDM, mas isso não foi constatado com base nessa experimentação.

No que se refere ao comportamento do valor eficaz filtrado na banda de frequências associada ao cobre (50–90 kHz), apresentados na Figura 59, também não foi possível identificar uma correlação clara com os indicadores de desempenho do EDM. Contudo, destaca-se um resultado interessante: a resposta do valor RMS quando aplicado o filtro na faixa de frequências atribuída ao grafite (215–250 kHz), conforme apresentado na Figura 60, demonstrou um comportamento distinto e potencialmente mais informativo, merecendo destaque.

Figura 59 - RMS com filtro 50-90 kHz (banda do cobre) – Cobre



Fonte: Elaborado pelo Autor.

Figura 60 - RMS com filtro 215-250 kHz (banda do grafite) – Grafite

Fonte: Elaborado pelo Autor.

O sinal EA filtrado em 215-250 kHz e tratado por RMS foi diretamente proporcional ao resultado da taxa de desgaste do grafite. A simetria sugere uma forte correlação entre a intensidade dos sinais acústicos e a eficiência de desgaste desse material em EDM. Isso pode ser atribuído às propriedades físicas do grafite, como sua menor condutividade térmica e maior porosidade, que promovem descargas mais localizadas, fato que as amplitudes de EA do grafitem foram em média maiores que o do cobre.

Além disso, como o grafite possui maior resistência à degradação térmica em comparação ao cobre, os eventos de remoção tendem a ocorrer com menor interferência de microexplosões descontroladas e reações secundárias, como a carbonetização. Isso resulta em padrões acústicos de maior consistência e alinhamento com o volume efetivamente removido. Esse comportamento é discutido por Kumar, Bajpai e Singh (2021), que destacam que eletrodos de grafite promovem a formação de cavidades mais estáveis e regulares, o que se refletiu neste estudo em menor dispersão dos sinais e maior fidelidade do valor RMS como resposta direta do processo. Esse achado reforça a hipótese de que, quando devidamente filtrado, o valor eficaz (RMS) pode se constituir em um indicador eficiente da atividade erosiva, sobretudo em materiais com comportamento mais linear e previsível, como é o caso do grafite.

Em geral, os sinais acústicos bem trabalhados revelam-se uma ferramenta promissora para o monitoramento contínuo da performance da eletroerosão. Como desfecho, destaca-se a análise por meio da entropia espectral em bandas de frequência específicas como uma abordagem inovadora e eficaz para a identificação do desempenho e da eficiência do processo de EDM.

5 CONCLUSÃO

Este trabalho, com algumas considerações, identifica e mapeia o comportamento dos fenômenos físicos relacionados à remoção de material na usinagem por eletroerosão (EDM), com base na análise da Entropia Espectral, do Valor Eficaz (RMS) e da Transformada Rápida de Fourier (FFT) aplicadas aos sinais de Emissão Acústica (EA) gerados durante o processo. Os resultados demonstraram ser possível identificar faixas específicas de excitação associadas a cada erosão de material (eletrodo e peça), bem como uma relação entre entropia espectral e a taxa de erosão dos materiais.

Em função dos indicadores de taxa de remoção de material (V_w) e desgaste dos eletrodos (V_e):

- Tanto para eletrodos de cobre quanto de grafite, observou-se um ponto ótimo de desempenho da V_w em $t_i = 50 \mu s$ para todas as correntes testadas, onde há tempo suficiente para a transferência de energia, e sem provocar instabilidade térmica no canal de plasma;
- A taxa de desgaste dos eletrodos, cobre ou grafite, apresentam mesmo comportamento de maior desgaste a altas correntes, mas um ponto crítico (aqui em $t_i = 10 \mu s$) também é encontrado ao longo das durações de pulsos de tensão intermediários. Esse comportamento reflete a ação combinada da energia por pulso e da frequência de descargas.
- O eletrodo de grafite demonstra maior resistência ao desgaste, com resultados até 74% inferiores aos do cobre.

Para a caracterização das frequências excitadas em respostas aos fenômenos durante a eletroerosão, conclui-se que:

- A comparação entre diferentes dielétricos demonstrou ser uma abordagem eficaz e não intrusiva para a identificação das respostas dos fenômenos do processo, permitindo o monitoramento de forma assertiva, eficiente e segura;
- O uso da água deionizada como fluido dielétrico, em comparação ao óleo de hidrocarboneto, mostrou-se uma estratégia robusta para eliminar interferências relacionadas ao carbono, permitindo a identificação dos fenômenos por exclusão lógica;
- A faixa de frequência entre 50–90 kHz foi atribuída à remoção do cobre eletrolítico,

caracterizado por sua boa condutividade elétrica e térmica, além de baixa dureza e resfriamento rápido, o que favorece uma remoção de material estável e controlada;

- A faixa entre 135–185 kHz foi associada à remoção do aço AISI H13, cuja excitação está relacionada à liberação de tensões internas, formação de microfraturas térmicas e à sua maior dureza e menor condutividade elétrica em relação ao cobre;
- A faixa de 215–250 kHz correspondeu à remoção do grafite, cuja estrutura anisotrópica, porosidade e natureza frágil e rupturas rápidas durante o processo de descarga.

Com a identificação das faixas de excitação características para cada material envolvido no processo de EDM, torna-se possível realizar o acompanhamento contínuo e em tempo real da presença dos fenômenos erosivos, independentemente dos parâmetros de usinagem empregados (como corrente elétrica, duração e intervalo entre pulsos de tensão). Esse monitoramento ativo favorece o controle seletivo da erosão de material, permitindo ajustes estratégicos para maximizar a eficiência do processo conforme o material desejado

Em relação à resposta da entropia espectral dos sinais EA, conclui-se que:

- A entropia espectral se consolida como uma métrica inovadora e promissora na análise da eletroerosão, desde que aplicada à banda de frequência correspondente ao fenômeno analisado;
- De modo geral, menores valores de entropia espectral estão associados às maiores taxas de remoção de material e desgaste do eletrodo, evidenciando um comportamento inversamente proporcional entre eficiência de erosão e desordem no sinal;
- A eficiência do processo impacta diretamente a entropia espectral, sendo condicionada pela seleção adequada dos parâmetros elétricos (como corrente e duração de pulso de tensão);
- Descargas elétricas mais estáveis, homogêneas e eficazes geram sinais de EA com maior regularidade, resultando em menor entropia nas bandas associadas ao respectivo material;
- O eletrodo de grafite apresenta sinais de EA mais estáveis e com menor variabilidade espectral nas bandas do aço e do próprio grafite, o que o torna promissor para aplicações que exigem controle dimensional rigoroso;

- A entropia espectral demonstrou ser um poderoso indicador da eficiência do processo EDM, capaz de traduzir, de forma quantitativa, a qualidade das descargas e o desempenho da remoção de material.

Em relação à resposta do valor RMS dos sinais EA, conclui-se que:

- De forma geral, o valor eficaz não se mostrou uma métrica adequada para representar a taxa de remoção de material ou o desgaste do eletrodo no processo de EDM, mesmo quando aplicado às bandas de frequência específicas associadas a cada fenômeno;
- Levanta-se a hipótese de que o valor RMS possa estar relacionado a outros fenômenos do processo de eletroerosão que não foram abordados neste estudo, o que abre espaço para investigações complementares;
- Uma correlação forte e positiva entre o valor RMS e o desgaste do eletrodo de grafite foi observada, sugerindo que, em condições específicas, o RMS pode refletir o comportamento erosivo de determinados materiais;

Dessa forma, a técnica de análise de EA em EDM apresenta como uma ferramenta inovadora e promissora para integração em sistemas inteligentes de usinagem, reduzindo a necessidade de inúmeros ensaios e, principalmente, eliminando interferências no processo durante sua execução. Isso viabiliza ajustes operacionais mais precisos com base na assinatura acústica característica de cada regime de trabalho.

Outro aspecto relevante é que o levantamento sistemático e o tratamento estruturado dos dados possibilitam previsões confiáveis de desempenho, seja para antecipar os resultados esperados ou até mesmo substituir a necessidade de novos testes experimentais.

A análise dos fenômenos envolvidos na eletroerosão revelou informações valiosas sobre o comportamento do processo, permitindo maior compreensão das interações térmicas, elétricas e materiais. Essa abordagem abre espaço para a formulação de novas hipóteses e investigações, incentivando o avanço científico com diferentes parâmetros de usinagem e novos materiais. Assim, destaca-se a importância de atualizações contínuas nas estratégias de controle e monitoramento do EDM, garantindo sua competitividade e consolidando sua relevância na fabricação de peças com geometrias complexas e materiais de difícil usinabilidade.

6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Durante o desenvolvimento deste trabalho, foram identificadas oportunidades para expandir e consolidar os resultados obtidos, bem como aprofundar o entendimento sobre o processo de usinagem por EDM. As seguintes propostas são sugeridas para trabalhos futuros:

- Com base no banco de dados gerados de sinais de EA, parâmetros e performance do processo, desenvolver uma predição de resultados com aprendizado de máquina ou outra ferramenta de análise de dados;
- Emprego de partículas metálicas ou cerâmicas (como níquel, cobalto, ferro, alumínio, cobre, titânio, silício ou grafite) suspensas no dielétrico, visando avaliar as respostas dos sinais de emissão acústica (EA) e suas possíveis correlações com os fenômenos físicos envolvidos no processo;
- Expansão da faixa de parâmetros elétricos utilizados neste estudo, como corrente, duração do pulso de tensão e intervalo entre pulsos, com o objetivo de explorar outras regiões operacionais do EDM;
- Aplicação de materiais nobres ou cerâmicos como peças de trabalho, possibilitando a análise da resposta acústica e da eficiência do processo em materiais com propriedades mecânicas e térmicas distintas;
- Implementação de movimento rotacional no eletrodo-ferramenta, ao redor de seu próprio eixo, permitindo a avaliação comparativa das respostas de EA com os dados obtidos neste estudo;
- Utilização de eletrodos compostos de tungstênio, visando ampliar o escopo dos resultados e compreender como esse material altamente resistente se comporta em termos de desgaste, remoção e sinal acústico;
- Exploração de faixas de frequência mais restritas ou o emprego de técnicas alternativas de processamento de sinais, de modo a investigar o potencial do RMS como indicador complementar para o monitoramento da performance do EDM;
- Desenvolvimento de um sistema de monitoramento em tempo real, integrando hardware e software, baseado nos achados desta pesquisa, para aplicação prática no controle e otimização do processo de EDM.

REFERÊNCIAS

- AGUIAR, Juliano De. **Caracterização de Sinais de Emissão Acústica em ensaios CTOD por Análise Fractal**. 2004. Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2004.
- AHMED, Shamraze *et al.* Electrolytic-dielectrics: A route to zero recast electrical discharge machining. **International Journal of Machine Tools and Manufacture**, [S.l.], v. 181, p. 103941, out. 2022.
- AKAN, Aydin; KARABIBER CURA, Ozlem. Time–frequency signal processing: Today and future. **Digital Signal Processing**, [S.l.], v. 119, p. 103216, dez. 2021.
- AMARAL, Dalton Rocha. **A Relação do Estado de Tensão e Deformação para Aço Estrutural de Baixo Carbono com Suas Respostas em Emissão Acústica Quando Submetido a Esforços Externos**. 2015. Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2015.
- AMORIM, F. L.; WEINGAERTNER, W. L. Die-sinking electrical discharge machining of a high-strength copper-based alloy for injection molds. **Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering**, [S.l.], v. 26, n. 2, jun. 2004.
- AMORIM, F. L.; WEINGAERTNER, W. L. The influence of generator actuation mode and process parameters on the performance of finish EDM of a tool steel. **Journal of Materials Processing Technology**, [S.l.], v. 166, n. 3, p. 411–416, ago. 2005.
- AMORIM, Fred L.; WEINGAERTNER, Walter L. The behavior of graphite and copper electrodes on the finish die-sinking electrical discharge machining (EDM) of AISI P20 tool steel. **Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering**, [S.l.], v. 29, n. 4, p. 366–371, dez. 2007.
- AMORIM, Fred Lacerda. **Tecnologia de Eletroerosão por penetração da liga de Alumínio AMP 8000 e da liga de Cobre CuBe para ferramentas de moldagem de materiais plásticos**. 2002. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2002.
- AMORIM, Fred Lacerda; WEINGAERTNER, Walter Lindolfo; BASSANI, Irionson Antonio. Aspects on the optimization of die-sinking EDM of tungsten carbide-cobalt. **Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering**, [S.l.], v. 32, n. spe, p. 496–502, dez. 2010.
- ANAHID, Mohamad Javad; NIKNAM, Seyed Ali. Sensitivity of acoustic emission signals features to cutting parameters in time domain: case of milling aeronautical aluminium alloys. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, [S.l.], v. 132, n. 1–2, p. 265–275, 9 maio 2024.
- ARANTES, Luciano José. **Avaliação do Desempenho de Fluidos Dielétricos no Processo de Usinagem por Descargas Elétricas**. 2001. Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2001.
- ASM HANDBOOK. **Machining**. 9.ed. [S.l.]: ASM International, 1989. v. 16. Disponível em: <https://automaterials.files.wordpress.com/2019/01/16-Machining.pdf>. Acesso em: 6 nov. 2021.

- BENEDICT, Gary F. **Nontraditional Manufacturing Processes**. [S.l.]: Marcel Dekker, 1987.
- BOLLEN, Math H. J.; GU, Irene Yu-Hua. **Signal Processing of Power Quality Disturbances**. Piscataway: IEEE Press, 2006.
- BOUJELBENE, Mohamed *et al.* Influence of Machining Parameters on the Surface Integrity in Electrical Discharge Machining. **Archives of Materials Science and Engineering**, [S.l.], v. 37, n. 2, p. 110–116, jun. 2009.
- CHEN, Gengxiang; LI, Yingguang; LIU, Xu. Pose-dependent tool tip dynamics prediction using transfer learning. **International Journal of Machine Tools and Manufacture**, [S.l.], v. 137, p. 30–41, fev. 2019.
- CHEN, Han-Yun; LEE, Ching-Hung. Deep Learning Approach for Vibration Signals Applications. **Sensors**, [S.l.], v. 21, n. 11, p. 3929, 7 jun. 2021.
- CHEN, Jianyong *et al.* Predicting Surface Roughness in Turning Complex-Structured Workpieces Using Vibration-Signal-Based Gaussian Process Regression. **Sensors**, [S.l.], v. 24, n. 7, p. 2117, 26 mar. 2024.
- CHEN, Zexun; WANG, Bo. How priors of initial hyperparameters affect Gaussian process regression models. **Neurocomputing**, [S.l.], v. 275, p. 1702–1710, jan. 2018.
- CRUZ JUNIOR, Eli Jorge Da. **A influência do tamanho de grão ferrítico na integridade superficial de peças erodidas**. 2015. Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Ilha Solteira, 2015.
- DECKER, Harry J. Crack Detection for Aerospace Quality Spur Gears. **NASA Technical Reports Server**, Montreal, abr. 2002.
- DIBITONTO, Daryl D. *et al.* Theoretical models of the electrical discharge machining process. I. A simple cathode erosion model. **Journal of Applied Physics**, [S.l.], v. 66, n. 9, p. 4095–4103, nov. 1989.
- EL-HOFY, Hassan. **Advanced Machining Processes**. Estados Unidos: McGraw-Hill Professional, 2005.
- ENGEMAQ. **Manual de Instalação, Operação e Manutenção da Máquina EDM 440 NC**. Caxias do Sul: Agie Charmilles, 2002.
- FAVORIT. **Aço AISI H13**. [S.l.]: Favorit Aços Especiais, 2021. Disponível em: <https://favorit.com.br/nossos-produtos/acos-para-ferramentas/aco-aisi-h13>. Acesso em: 20 maio. 2021.
- FERRAMENTAL. **Danos superficiais causados em aços-ferramenta pelo processo de eletroerosão**. [S.l.: s.n.], 2018. Disponível em: <https://www.revistaferramental.com.br/artigo/danos-superficiais-causados-em-a-os-ferramenta-pelo-processo-de-eletroeros-o>. Acesso em: 14 out. 2021.

FERREIRA, Samuel. S. *et al.* A new technique for identification and evaluation of wear in copper electrodes in electrical discharge machining using acoustic emission signals. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, [S.l.], v. 118, n. 7–8, 2022.

FERREIRA, Samuel Soares. **Avaliação de Desgaste de Eletrodo na Usinagem por Eletroerosão Utilizando Sinais de Emissão Acústica**. 2020. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2020.

FERREIRA, Samuel Soares; MAIA, Luís Henrique Andrade; AMORIM, Fred Lacerda. Effects of machining parameters on spectral entropy of acoustic emission signals in the electro erosion. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, [S.l.], v. 131, n. 1, p. 289–299, 31 mar. 2024.

FETTER, Alexander L.; WALECKA, John Dirk. **Theoretical Mechanics of Particles and Continua**. [S.l.]: Courier Corporation, 2003.

GARG, R. K. *et al.* Review of research work in sinking EDM and WEDM on metal matrix composite materials. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, Londres, v. 50, n. 5–8, p. 611–624, fev. 2010.

GÉA, Orlando. **Monitoramento da Propagação de Defeitos em Dutos Rígidos por Redes Neurais**. 2015. Universidade do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2015.

GHADARAH, Noor Salam; AYRE, David. A comparative analysis of acoustic emission sensor embedding in glass fibre composite. **Composites Science and Technology**, [S.l.], v. 247, p. 110392, mar. 2024.

GROOVER, Mikell P. **Introduction to Manufacturing Processes**. Estados Unidos: LTC, 2012.2 v.

GROSSE, Christian U.; OHTSU, Masayasu (EDS.). **Acoustic Emission Testing**. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2008.

HAN, Ng Chee; MUNIANDY, Sithi V.; DAYOU, Jedol. Acoustic classification of Australian anurans based on hybrid spectral-entropy approach. **Applied Acoustics**, [S.l.], v. 72, n. 9, p. 639–645, set. 2011.

HILBORN, Robert C. **Chaos and Nonlinear Dynamics**. 2. ed. Nova York: Oxford University Press, 2000.

HO, K. H.; NEWMAN, S. T. State of the art electrical discharge machining (EDM). **International Journal of Machine Tools and Manufacture**, Oxford, v. 43, n. 13, p. 1287–1300, out. 2003.

HUANG, Hao *et al.* A novel numerical predicting method of electric discharge machining process based on specific discharge energy. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, [S.l.], v. 88, n. 1–4, p. 409–424, 25 jan. 2017.

HUANG, Wuzhen *et al.* The wear detection of mill-grinding tool based on acoustic emission sensor. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, [S.l.], v. 124, n. 11–12, p. 4121–4130, 7 fev. 2023.

INSTRUMENTS, National. **Acquiring an Analog Signal**. [S.l.]: National Instruments, 2021. Disponível em: <https://www.ni.com/pt-br/innovations/white-papers/06/acquiring-an-analog-signal--bandwidth--nyquist-sampling-theorem-.html>. Acesso em: 14 nov. 2021.

JAKITSCH, Bernardo de Oliveira. **Avaliação da Aplicação da Técnica de Emissão Acústica em Acoplamentos do Tipo Pinhão Cremalheira**. 2019. Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2019.

JEONG, Young Hun; MIN, Byung-Kwon. Geometry prediction of EDM-drilled holes and tool electrode shapes of micro-EDM process using simulation. **International Journal of Machine Tools and Manufacture**, [S.l.], v. 47, n. 12–13, p. 1817–1826, out. 2007.

KAHNG, C. H.; RAJURKAR, K. P. **Fundamental theories of the parameters of EDM process**. SME Tech Pap Ser MR for Midwest Eng Coinf, Milwaukee, 1977.

KANAKE, Vikas; AHUJA, B. B. Prediction of tool wear length in micro-EDM process using an artificial neural network. **Materials Today: Proceedings**, [S.l.], v. 63, p. 107–112, 2022.

KARTHIKEYAN, S.; KATHIRESAN, S.; SUJA, T. Effect of Deep Cryogenic Treatment on Machinability and Corrosion Resistance of Titanium Grade 2 Alloy Using Electrical Discharge Machining Process. **Journal of Materials Engineering and Performance**, [S.l.], 23 set. 2024.

KLINK, Andreas *et al.* Acoustic emission signatures of electrical discharge machining. **CIRP Annals**, [S.l.], v. 65, n. 1, p. 229–232, 2016.

KLOCKE, Fritz; KÖNIG, Wilfried. **Fertigungsverfahren**. 4. ed. Berlin: Springer Berlin Heidelberg, 2007.

KOYANO, Tomohiro *et al.* Micro electrical discharge machining using high electric resistance electrodes. **Precision Engineering**, [S.l.], v. 47, p. 480–486, jan. 2017.

KOZOCHKIN, M. P. *et al.* Monitoring of electric discharge machining by means of acoustic emission. **Russian Engineering Research**, [S.l.], v. 36, n. 3, p. 244–248, mar. 2016.

KRISHNAKUMAR, P.; RAMESHKUMAR, K.; RAMACHANDRAN, K. I. Machine learning based tool condition classification using acoustic emission and vibration data in high speed milling process using wavelet features. **Intelligent Decision Technologies**, [S.l.], v. 12, n. 2, p. 265–282, 7 mar. 2018.

KUMAR, Deepak; BAJPAI, Vivek; SINGH, Nirmal Kumar. Nano electrical discharge machining – the outlook, challenges, and opportunities. **Materials and Manufacturing Processes**, [S.l.], v. 36, n. 10, p. 1099–1133, 27 jul. 2021.

KUMAR, S. Suresh *et al.* Performance Monitoring of WEDM Using Online Acoustic Emission Technique. **Silicon**, [S.l.], v. 10, n. 6, p. 2635–2642, 12 nov. 2018.

LEDECZI, A. *et al.* Wireless Acoustic Emission Sensor Network for Structural Monitoring. **IEEE Sensors Journal**, [S.l.], v. 9, n. 11, p. 1370–1377, nov. 2009.

LI, Shaobo *et al.* An Ensemble Deep Convolutional Neural Network Model with Improved D-S Evidence Fusion for Bearing Fault Diagnosis. **Sensors**, [S.l.], v. 17, n. 8, p. 1729, 28 jul. 2017.

LIAO, Y. S.; YU, Y. P. Study of specific discharge energy in WEDM and its application. **International Journal of Machine Tools and Manufacture**, [S.l.], v. 44, n. 12–13, p. 1373–1380, out. 2004.

LUZIA, Cezar Augusto Oleinik *et al.* Recast layer mechanical properties of tool steel after electrical discharge machining with silicon powder in the dielectric. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, [S.l.], v. 103, n. 1–4, p. 15–28, 2019.

MAIA, Luis Henrique Andrade. **Avaliação de Desempenho de Recobrimento em Ferramentas de Metal Duro no Torneamento do Aço ABNT 4340 Temperado por meio de Sinais de Emissão**. 2015. Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2015.

MARGALIOT, Michael; HESPANHA, João P. Root-mean-square gains of switched linear systems: A variational approach. **Automatica**, [S.l.], v. 44, n. 9, p. 2398–2402, set. 2008.

MARNET, Luiza Ribeiro *et al.* **Monitoramento de Defeitos em Dutos Rígidos por Parâmetros de Emissão Acústica e Redes Neurais**. ABM Proceedings, São Paulo, 2018.

MILLER, Ronnie K.; MCINTIRE, Paul. **Acoustic emission testing**. 2. ed. Columbus: American Society for Nondestructive Testing, 1987.5 v.

MING, Wuyi *et al.* Critical review on sustainable techniques in electrical discharge machining. **Journal of Manufacturing Processes**, [S.l.], v. 72, p. 375–399, dez. 2021.

MING, Wuyi *et al.* Progress in modeling of electrical discharge machining process. **International Journal of Heat and Mass Transfer**, [S.l.], v. 187, p. 122563, maio 2022.

MOLLIK, Md Shohag *et al.* A machine learning-based classification model to identify the effectiveness of vibration for μ EDM. **Alexandria Engineering Journal**, [S.l.], v. 61, n. 9, p. 6979–6989, set. 2022.

MOREIRA, Antônio Carlos Inácio. **Controle do valor eficaz de tensão em linhas de transmissão operando sob condições de carregamento extremo**. 2012. Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2012.

NADDA, Rahul *et al.* Experimental investigation and optimization of cobalt bonded tungsten carbide composite by hybrid AHP-TOPSIS approach. **Alexandria Engineering Journal**, [S.l.], v. 57, n. 4, p. 3419–3428, dez. 2018.

NALON, José Alexandre. **Introdução ao Processamento Digital de Sinais**. Rio de Janeiro: LTC, 2009.

NEAL, Radford M. **Bayesian learning for neural networks**. New York: [s.n.], 118 v.

NEMIROVSKY, Jonathan; SHIMRON, Efrat. Utilizing Bochners Theorem for Constrained Evaluation of Missing Fourier Data. [S.l.], jun. 2015.

NGUYEN, Trung-Thanh *et al.* Experiments and optimization of the hole EDM electrode's parameters. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, [S.l.], v. 127, n. 11–12, p. 5373–5390, 12 ago. 2023.

NYQUIST, H. Certain Topics in Telegraph Transmission Theory. **Transactions of the American Institute of Electrical Engineers**, [S.l.], v. 47, n. 2, p. 617–644, abr. 1928.

OLINIKI, Ricardo. **Influência da Combinação Entre os Parâmetros de Usinagem por Eletroerosão na Integridade Superficial do Aço Aisi H13 Temperado e Revenido**. 2009. Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2009.

OPPENHEIM, Alan V.; SCHAFER, Ronald W.; BUCK, John R. **Discrete-Time Signal Processing**. 2. ed. New Jersey: Prentice-Hall, 1999.

OPPENHEIM, Alan V.; WILLSKY, Alan S. **Sinais e Sistemas**. 2. ed. [S.l.]: Pearson, 2010.

PAN, Y. N.; CHEN, J.; LI, X. L. Spectral entropy: A complementary index for rolling element bearing performance degradation assessment. **Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science**, [S.l.], v. 223, n. 5, p. 1223–1231, 1 maio 2009.

PATEL, Mukund R. *et al.* Theoretical models of the electrical discharge machining process. II. The anode erosion model. **Journal of Applied Physics**, [S.l.], v. 66, n. 9, p. 4104–4111, 1 nov. 1989.

PINHEIRO, Carlos Alberto Murari; MACHANDO, Jeremias Barbosa; FERREIRA, Luís Henrique de Carvalho. **Sistemas de Controles Digitais e Processamento de Sinais**. Rio de Janeiro: Interciência, 2017.

PRASAD, Y. V. R. K.; RAO, K. P. Mechanisms of high temperature deformation in electrolytic copper in extended ranges of temperature and strain rate. **Materials Science and Engineering: A**, [S.l.], v. 374, n. 1–2, p. 335–341, jun. 2004.

QIN, Jiahang; HOU, Yongping; MA, Liying. **Research on Automatic Removal of Outliers in Fuel Cell Test Data and Fitting Method of Polarization Curve**. 9 abr. 2024.

RAHUL, N. A. *et al.* Analysis on surface characteristics of electro-discharge machined Inconel 718. **International Journal of Materials and Product Technology**, [S.l.], v. 56, n. 1/2, p. 135, 2018.

RAJENDRA, Duwarahan *et al.* **Physics-based classification of acoustic emission waveforms**. mar. 2011. Disponível em: <http://proceedings.spiedigitallibrary.org/proceeding.aspx?doi=10.1117/12.880668>. Acesso em: 4 nov. 2021

RAZEGHIYADAKI, Amin *et al.* Modeling of Material Removal Rate and Surface Roughness Generated during Electro-Discharge Machining. **Machines**, [S.l.], v. 7, n. 2, p. 47, 20 jun. 2019.

REBELO, J. C. *et al.* Influence of EDM pulse energy on the surface integrity of martensitic steels. **Journal of Materials Processing Technology**, [S.l.], v. 84, n. 1–3, p. 90–96, dez. 1998.

REVAZ, B.; WITZ, G.; FLUKIGER, R. Effect of thermo-capillary (Marangoni) convection in Electronic Discharge Machining (EDM). **High Temperature Material Processes (An International Quarterly of High-Technology Plasma Processes)**, [S.l.], v. 11, n. 1, p. 115–124, 2007.

RIFFEL, Germano. **Influência da Fenda de Trabalho e da Lavação nas Condições de Operação de Eletroerosão por Faísca**. 1992. Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 1992.

SABO, Igor Schmidt e Sarita Canabarro. **Processos de Eletroerosão**. [S.l.: s.n.], 2008.

SAMPAIO, Rubens; CATALDO, Edson; BRANDÃO, Alexandre S. **Análise e Processamento de Sinais**. Rio de Janeiro: SBMAC, 2006.

SANTOS, Irapuan. **Análise dos Parâmetros de Entrada na Eletroerosão de Penetração da Liga de Titânio TI-6AL-4V**. 2010. Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2010.

SCHOFIELD, B. H. **Acoustic emission under applied stress**. Boston: Lessels and Associates, 1961.

SEA. **Grafite para Eletroerosão**. [S.l.]: SEA Grafite, 2021. Disponível em: <https://www.seagrafite.com.br/grafite-eletroerosao>. Acesso em: 17 nov. 2021.

SELVARAJAN, L. *et al.* An experimental investigations and optimization of performance measures in EDM using copper and graphite electrodes. **Materials Today: Proceedings**, [S.l.], v. 46, p. 9341–9347, 2021.

SHABGARD, Mohammadreza *et al.* Mathematical and numerical modeling of the effect of input-parameters on the flushing efficiency of plasma channel in EDM process. **International Journal of Machine Tools and Manufacture**, [S.l.], v. 65, p. 79–87, fev. 2013.

SHANMUGAM, Karthik; ANNAMALAI, Sivakumar; THANGARAJ, Nathiya. Multiobjective optimization of EDM machining parameters of TIB2 ceramic materials using regression and gray relational analysis. **High Temperature Materials and Processes**, [S.l.], v. 44, n. 1, 18 fev. 2025.

SHANNON, C. E. Communication in the Presence of Noise. **Proceedings of the IRE**, [S.l.], v. 37, n. 1, p. 10–21, jan. 1949.

SHANNON, Claude E. Mathematical Theory of Communication. **The Bell System Technical Journal**, [S.l.], v. 27, p. 379–423, out. 1948.

SHARMA, Vikas; PAREY, Anand. A Review of Gear Fault Diagnosis Using Various Condition Indicators. **Procedia Engineering**, [S.l.], v. 144, p. 253–263, 2016.

SIKORSKI, Wojciech (ED.). **Acoustic Emission - Research and Applications**. [S.l.]: InTech, 2013.

SILVA, Ernane Rodrigues da. **Comparação do Desempenho do Fluido Dielétrico Vegetal com Mineral Sintético e Querosene na Eletroerosão do Aço AISI H13**. 2007. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2007.

SINGH, Ranjit; SINGH, Ravi Pratap; TREHAN, Rajeev. State of the art in processing of shape memory alloys with electrical discharge machining: A review. **Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture**, [S.l.], v. 235, n. 3, p. 333–366, 26 fev. 2021.

SINGH THAKUR, Surendra; PRADHAN, Sharad K.; SHARMA, Usha. Modeling and parametric analysis of ceramic, mixed EDM process. **Materials Today: Proceedings**, [S.l.], jun. 2022.

SMITH, Craig; KOSHY, Philip. Applications of acoustic mapping in electrical discharge machining. **CIRP Annals**, [S.l.], v. 62, n. 1, p. 171–174, 2013.

TELES, Vinícius Carvalho; RASLAN, Alberto Arnaldo. **Degradação dos Fluidos Dielétricos na Usinagem por Descargas Elétricas (EDM)**. 6th COBEF, Caxias do Sul, 2011.

VASEGHI, Saeed V. **Advanced Digital Signal Processing and Noise Reduction**. 4. ed. Chichester: John Wiley and Sons Ltd., 2008.

VERBAND DEUTSCHER INGENIEURE. **VDI 3402**: Electrical discharge machining; design, operation and security of equipment. Dusseldorf: VDI, 1990.

VORA, Jay *et al.* Optimization of Activated Tungsten Inert Gas Welding Process Parameters Using Heat Transfer Search Algorithm: With Experimental Validation Using Case Studies. **Metals**, [S.l.], v. 11, n. 6, p. 981, 19 jun. 2021.

WANG, Kang *et al.* Machine Tool Wear Prediction Technology Based on Multi-Sensor Information Fusion. **Sensors**, [S.l.], v. 24, n. 8, p. 2652, 21 abr. 2024.

WANG, Peng *et al.* Non-linear mechanism in electrical discharge machining process. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, Londres, v. 97, n. 5–8, p. 1687–1696, jul. 2018.

WILLIAMS, Christopher K.; RASMUSSEN, Carl Edward. **Gaussian Processes for Machine Learning**. 3. ed. Cambridge: MIT, 2006.2 v.

WU, Haihui; WANG, Tong; WANG, Junqi. Research on discharge state detection of finishing in high-speed wire electrical discharge machine. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, Londres, v. 103, n. 5–8, p. 2301–2317, ago. 2019.

WU, Xiaoyu; LI, Shujuan. Experimental investigations of a hybrid machining combining wire electrical discharge machining (WEDM) and fixed abrasive wire saw. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, [S.l.], v. 95, n. 5–8, p. 2613–2623, 25 mar. 2018.

YADAV, Avinash *et al.* Sustainability of vegetable oil based bio-diesel as dielectric fluid during EDM process – A review. **Materials Today: Proceedings**, [S.l.], v. 46, p. 11155–11158, 2021.

YANG, Xingxin *et al.* A new BRTCN model for predicting discharge status of WEDM based on acoustic emission. **Journal of Manufacturing Systems**, [S.l.], v. 64, p. 409–423, jul. 2022.

YAO, Zequan *et al.* On-machine evaluation of micro-EDM process signature in radio frequency (RF) domain: A step towards cost-effective data collection in a multiphysical process. **Journal of Materials Processing Technology**, [S.l.], v. 335, p. 118663, jan. 2025.

ZEILMANN, R. P.; IVANINSKI, T.; WEBBER, C. Surface integrity of AISI H13 under different pulse time and depths by EDM process. **Procedia CIRP**, [S.l.], v. 71, p. 472–477, 2018.

ZHANG, Min *et al.* Research on a single pulse discharge to discriminate EDM and EAM based on the plasma tunnel and crater geometry. **Journal of Materials Processing Technology**, [S.l.], v. 219, p. 248–256, maio 2015a.

ZHANG, Xin *et al.* Acoustic emission detection of rail defect based on wavelet transform and Shannon entropy. **Journal of Sound and Vibration**, [S.l.], v. 339, p. 419–432, mar. 2015b.

ZHAO, W. S.; MENG, Q. G.; WANG, Z. L. The application of research on powder mixed EDM in rough machining. **Journal of Materials Processing Technology**, [S.l.], v. 129, n. 1–3, p. 30–33, out. 2002.

ZHU, Ziqi *et al.* Multi-kernel Gaussian process latent variable regression model for high-dimensional sequential data modeling. **Neurocomputing**, [S.l.], v. 348, p. 3–15, jul. 2019.

APÊNDICE A – Resultados do EDM

Figura A1 – Taxa de remoção de material [mm³/mim] – Hidrocarboneto + Cobre

$t_i(\mu s)$	Corrente (A)			
	3	6	9	12
6	0,6897	2,2077	3,1384	3,8343
10	0,7252	2,8201	4,6712	6,6493
50	2,2007	7,3629	16,6779	27,0871
100	1,5717	6,4373	13,1802	25,0170

Fonte: Elaborado pelo Autor.

Figura A2 – Taxa de remoção de material [mm³/mim] – Hidrocarboneto + Grafite

$t_i(\mu s)$	Corrente (A)			
	3	6	9	12
6	0,9951	1,9432	2,3181	2,3562
10	1,0504	2,9192	3,9412	4,6981
50	1,1510	3,8690	9,3197	17,5437
100	0,7346	2,7835	6,5843	12,5060

Fonte: Elaborado pelo Autor.

Figura A3 – Taxa de desgaste do eletrodo [mm³/mim] – Hidrocarboneto + Cobre

$t_i(\mu s)$	Corrente (A)			
	3	6	9	12
6	0,0263	0,4457	1,0543	1,4497
10	0,0317	0,5594	1,4373	2,4376
50	0,0218	0,1161	0,8872	3,1908
100	0,0048	0,0366	0,1552	0,7520

Fonte: Elaborado pelo Autor.

Figura A4 – Taxa de desgaste do eletrodo [mm³/mim] – Hidrocarboneto + Grafite

$t_i(\mu s)$	Corrente (A)			
	3	6	9	12
6	0,1768	0,4842	0,7049	0,8291
10	0,2071	0,5284	0,8260	1,0524
50	0,0025	0,0436	0,0758	0,1534
100	-0,0206	-0,0154	-0,0295	-0,0404

Fonte: Elaborado pelo Autor.

APÊNDICE B – Resultados da EA

Figura B1 – Média Entropia Espectral – Hidrocarboneto + Cobre

$t_i(\mu s)$	Corrente (A)			
	3	6	9	12
6	0,6786	0,6594	0,6671	0,6630
10	0,6581	0,6524	0,6580	0,6535
50	0,6360	0,6389	0,6377	0,6415
100	0,6391	0,6408	0,6410	0,6502

Fonte: Elaborado pelo Autor.

Figura B2 – Média Entropia Espectral – Hidrocarboneto + Grafite

$t_i(\mu s)$	Corrente (A)			
	3	6	9	12
6	0,6484	0,6395	0,6378	0,6373
10	0,6453	0,6351	0,6366	0,6321
50	0,6384	0,6326	0,6340	0,6289
100	0,6400	0,6344	0,6364	0,6310

Fonte: Elaborado pelo Autor.

Figura B3 – Média Entropia Espectral – Hidrocarboneto + Cobre

$t_i(\mu s)$	Corrente (A)			
	3	6	9	12
6	0,6367	0,6312	0,6324	0,6321
10	0,6348	0,6304	0,6312	0,6292
50	0,6333	0,6313	0,6327	0,6254
100	0,6335	0,6308	0,6354	0,6338

Fonte: Elaborado pelo Autor.

Figura B4 – Média Entropia Espectral – Hidrocarboneto + Grafite

$t_i(\mu s)$	Corrente (A)			
	3	6	9	12
6	0,6518	0,6498	0,6506	0,6491
10	0,6511	0,6466	0,6478	0,6472
50	0,6473	0,6484	0,6485	0,6477
100	0,6476	0,6492	0,6496	0,6478

Fonte: Elaborado pelo Autor.

Figura B5 – Média valor RMS (V) – Hidrocarboneto + Cobre

$t_i(\mu s)$	Corrente (A)			
	3	6	9	12
6	0,1010	0,4488	0,5416	0,5114
10	0,1438	0,3797	0,4493	0,3876
50	0,1142	0,2440	0,2135	0,5089
100	0,1935	0,2430	0,2288	0,4513

Fonte: Elaborado pelo Autor.

Figura B6 – Média valor RMS (V) – Hidrocarboneto + Grafite

$t_i(\mu s)$	Corrente (A)			
	3	6	9	12
6	0,3148	0,3453	0,2806	0,3174
10	0,3018	0,3484	0,3100	0,4055
50	0,2755	0,2680	0,2719	0,2874
100	0,2594	0,2656	0,2510	0,2699

Fonte: Elaborado pelo Autor.

Figura B7 – Média valor RMS (V) – Hidrocarboneto + Cobre

$t_i(\mu s)$	Corrente (A)			
	3	6	9	12
6	0,0650	0,5983	0,8301	0,6753
10	0,0751	0,4639	0,5988	0,3957
50	0,0429	0,2248	0,1368	0,3304
100	0,1472	0,2372	0,2361	0,3756

Fonte: Elaborado pelo Autor.

Figura B8 – Média valor RMS (V) – Hidrocarboneto + Grafite

$t_i(\mu s)$	Corrente (A)			
	3	6	9	12
6	0,3848	0,4031	0,3428	0,3883
10	0,4127	0,4366	0,3852	0,4234
50	0,3125	0,3230	0,3409	0,3215
100	0,2945	0,3108	0,3068	0,3263

Fonte: Elaborado pelo Autor.

ANEXO A – Tabela técnica AISI H13 fornecedor Favorit

AÇOS FERRAMENTAS																		 Aços Especiais		
Equivalências		Denominações dos fabricantes			Composições Químicas Médias (%)								Estado normal de fornecimento		Tratamentos Térmicos					
AISI/SAE	WERKSTOFF N°	Gerdau	Villares	Böhler	C	Si	Mn	Cr	Mo	Ni	V	W	Outros	Recozimento (°C)	Dureza (HB)	Têmpera (°C)	Têmpera Meio	Dureza (HRC)	Revenimento (°C)	
AÇOS PARA TRABALHO QUENTE																				
H 13	12.344	H 13	VH 13	W 302	0,4	1	0,35	5,15	1,4	-	1	-	-	ESFEROIDIZADO / RECOZIDO	Máx. 230	1000/1040	Banho de Sal / Óleo /Ar Soprado	50/56	400 500 550 600 650 700	
-	12.367	-	VH Super	W303 ISOBLOC	0,35 0,4	0,3 0,5	0,3 0,5	4,3 5,2	2,7 3,2	-	0,4 0,6	-	-	ESFEROIDIZADO / RECOZIDO	Máx. 229	-	-	50/55	- - - - -	
L6	12.714	2714	VMO	W 500	0,55	0,25	0,8	1,1	0,5	1,65	0,1	-	-	ESFEROIDIZADO / RECOZIDO	Máx. 248	830/870	Banho de Sal / Óleo	52/56	50 48 43 40 36 -	
ABNT L10	12.721	-	VCO	-	0,45 0,55	0,15 0,5	0,4 0,6	0,9 1,2	-	3 3,5	-	-	-	ESFEROIDIZADO / RECOZIDO	Máx. 240	830	Óleo	55/58	50 45 44 43 - -	

