

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

Samuel Soares Ferreira

**AVALIAÇÃO DE DESGASTE DE ELETRODO NA USINAGEM POR
ELETROEROSÃO UTILIZANDO SINAIS DE EMISSÃO ACÚSTICA**

Belo Horizonte

2020

Samuel Soares Ferreira

**AVALIAÇÃO DE DESGASTE DE ELETRODO NA USINAGEM POR
ELETROEROSÃO UTILIZANDO SINAIS DE EMISSÃO ACÚSTICA**

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

Orientador: Prof. Dr. Luis Henrique Andrade Maia

Coorientador: Prof. Dr. Fred Lacerda Amorim

Belo Horizonte

2020

FICHA CATALOGRÁFICA

Elaborada pela Biblioteca da Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais

F383a Ferreira, Samuel Soares
Avaliação de desgaste de eletrodo na usinagem por eletroerosão utilizando sinais de emissão acústica / Samuel Soares Ferreira. Belo Horizonte, 2020.
128 f. : il.

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

1. Usinagem. 2. Usinagem por eletroerosão. 3. Acústica. 4. Usinagem por eletroerosão - Testes. I. Maia, Luis 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 Renata Diniz Guimarães de Oliveira - CRB 6/2646

Samuel Soares Ferreira

**AVALIAÇÃO DE DESGASTE DE ELETRODO NA USINAGEM POR
ELETROEROSÃO UTILIZANDO SINAIS DE EMISSÃO ACÚSTICA**

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

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

Prof. Dr. Fred Lacerda Amorim – PUCPR (Coorientador)

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

Prof. Dr. Alexandre Mendes Abrão – UFMG (Banca Examinadora)

Belo Horizonte, 13 de Fevereiro de 2020.

*“A tarefa não é tanto ver aquilo que ninguém viu,
mas pensar o que ninguém ainda pensou sobre
aquilo que todo mundo vê.”*
Arthur Schopenhauer

AGRADECIMENTOS

Primeiro a Deus que sempre guiou e deu forças aos meus passos para a obtenção de grandes conquistas.

Aos meus pais Lucia e Helton, e avos Ivete e Antônio que sempre na humildade me incentivaram a estudar e progredir para alcançar meus objetivos sem medir esforços. Levarei todos como exemplo de vida.

Aos meus irmãos Sara e Silas que sempre demonstraram companheirismo, apoio e amizade incondicional.

À Iara, quem sempre me incentivou e permaneceu presente.

Ao Luis Maia pela paciência e motivação em todos momentos para a conclusão desta conquista.

A todos os meus professores que sempre foram os meus guias de ensinamento, alimentando o anseio de aprender e contribuindo para o meu crescimento profissional.

À VLI Multimodal S.A. juntamente com Luis Aguiar que me possibilitou alcançar mais esta conquista se colocando à disposição.

À João Marcos que contribuiu neste trabalho, se colocando sempre à disposição.

À Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais e ao Departamento de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, pela oportunidade de realizar este trabalho.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pela concessão da bolsa de estudos para o curso de mestrado.

RESUMO

Eletroerosão é um processo não convencional de usinagem que se baseia na remoção de material por sucessivas descargas elétricas. O domínio dos processos de fabricação é de fundamental importância para o crescimento econômico dos países industrializados. Assim, a eficiência dos processos de fabricação são alvos de constantes estudos na engenharia contemporânea. Dentro deste escopo, propõe-se o estudo dos sinais de emissão acústica (EA) como identificadores de mecanismos de desgastes na eletroerosão (EDM). Portanto, foram realizados ensaios de EDM com dois parâmetros diferentes. Neste paralelo foi efetuado a avaliação dos sinais de EA e o desempenho dos eletrodos durante a operação. No primeiro teste de eletroerosão foram usados os seguintes parâmetros: tempo de duração do pulso de tensão t_e de 150 μs ; tempo de intervalo entre dois sucessivos pulsos de tensão t_o em 14,84 μs ; uma corrente elétrica de 33 A; e eletrodo com polaridade positiva. Para o segundo teste verificou-se: tempo de duração do pulso de tensão t_e em 2 μs ; tempo de intervalo entre dois sucessivos pulsos de tensão t_o em 4,90 μs ; uma corrente elétrica de 18 A; e eletrodo com polaridade negativa. Desta forma obteve-se uma taxa de desgaste 28,3 vezes maior no eletrodo de cobre eletrolítico no primeiro teste, mais agressivo, para um mesmo intervalo em comparação ao segundo teste. Também se caracterizou o acabamento superficial da peça de Aço AISI H13 em função dos parâmetros selecionados em cada teste por meio da rugosidade, encontrando o resultado de 6,4 vezes maior no primeiro teste. Por fim, foi relacionado os desgastes dos eletrodos com os sinais de EA da usinagem, sinais estes que foram analisados por meio das técnicas de Transformada de Fourier de Tempo Curto (STFT), Valor Eficaz (RMS) e Entropia de Shannon. Os resultados demonstraram que os sinais de emissão acústica são sensíveis a taxa de desgaste do eletrodo.

Palavras-chave: Usinagem. Eletroerosão. EDM. Emissão Acústica.

ABSTRACT

Electrical discharge machining is an unconventional machining process that relies on material removal by successive electrical discharges. Mastery of manufacturing processes is of fundamental importance for the economic growth of industrialized countries. Thus, the efficiency of manufacturing processes are targets of constant studies in contemporary engineering. Within this scope, it is proposed to study the acoustic emission signals (AE) as identifiers of mechanisms of wear in the electroerosion (EDM). Therefore, EDM tests were performed with two different parameters. In this parallel, the AE signals evaluation and the electrodes performance during the operation were performed. In the first electroerosion test the following parameters were used: duration of the voltage pulse t_e of 150 μs ; time interval between two successive voltage pulses t_o at 14.84 μs ; an electric current of 33 A; and electrode with positive polarity. For the second test it was verified: duration of the voltage pulse t_e in 2 μs ; time interval between two successive voltage pulses t_o at 4.90 μs ; an electric current of 18 A; and electrode with negative polarity. This resulted in a 28.3 times higher rate of wear on the electrolytic copper electrode in the first, more aggressive test, for the same interval compared to the second test. The surface finish of the AISI H13 steel part was also characterized according to the parameters selected in each test by roughness, finding the result 6.4 times higher in the first test. Finally, the electrode wear and the machining AE signals were related, which signals were analyzed using Short Time Fourier Transform (STFT), Root Mean Square (RMS) and Shannon Entropy techniques. The results demonstrated that acoustic emission signals are sensitive to electrode wear rate.

Keywords: Machining. Electrical Discharge Machining. EDM. Acoustic Emission.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Circuito de Lazarenko	30
Figura 2 – Componentes básicos do processo de eletroerosão.....	31
Figura 3 – Remoção de material no processo de eletroerosão	32
Figura 4 – Representação da (a) eletroerosão por penetração e da (b) eletroerosão a fio	33
Figura 5 – Fenômeno de eletroerosão	37
Figura 6 – Fases de uma descarga elétrica no processo de EDM.....	38
Figura 7 – Menor distância D entre duas superfícies	39
Figura 8 – Representação esquemática da fase de ignição	40
Figura 9 – Representação esquemática da formação do canal de plasma	41
Figura 10 – Representação esquemática da fusão de material no anodo e no catodo	42
Figura 11 – Fim da descarga, extinção do canal de plasma e remoção do material.....	44
Figura 12 – Fotografia de uma cratera produzida em EDM.....	44
Figura 13 – Evolução da tensão e corrente elétricas durante a descarga de uma faísca.....	45
Figura 14 – Taxas de remoção de EDM e rugosidade para diferentes materiais	49
Figura 15 – Diferença entre as taxas de erosão do anodo e catodo	51
Figura 16 – Sistema de lavagem no processo EDM por Pressão	52
Figura 17 – Sistema de lavagem no processo EDM por Jateamento.....	53
Figura 18 – Sistema de lavagem no processo EDM por Sucção	54
Figura 19 – Transformação do sinal analógico em discreto	62
Figura 20 – Sinal (a) e sua respectiva STFT (b).....	65
Figura 21 – Fluxograma da metodologia aplicada no trabalho	71
Figura 22 – Corpo de prova Bipartido.....	72
Figura 23 – Eletrodo	73
Figura 24 – Máquina EDM 440 NC	75
Figura 25 – Usinagem por Eletroerosão	76
Figura 26 – Sensor Piezoelétrico fixado no tanque de usinagem da máquina EDM.....	77
Figura 27 – Spartan 2000 e computador utilizado.....	78
Figura 28 – Rugosímetro Surtronic S-128.....	79
Figura 29 – Balança de precisão.....	80
Figura 30 – MEV (Microscópio Eletrônico de Varredura)	81
Figura 31 – Fluxograma do processamento dos sinais EA.....	83

Figura 32 – Primeiro Teste de EDM - Bloco Maciço	86
Figura 33 – Resultado da (a) peça bipartida e (b) eletrodo do primeiro teste de EDM	87
Figura 34 – Segundo Teste de EDM - Bloco Maciço	88
Figura 35 – Resultado da (a) peça bipartida e (b) eletrodo do segundo teste de EDM.....	89
Figura 36 – Desgaste dos eletrodos em função do tempo.....	90
Figura 37 – Sinal EA (a) e Entropia Espectral (b) em 0 min de erosão no primeiro teste.....	92
Figura 38 – STFT do sinal de EA em 0 min de erosão no primeiro teste.....	94
Figura 39 – Sinal EA (a) e Entropia Espectral (b) em 25 min de erosão no primeiro teste.....	95
Figura 40 – STFT do sinal de EA em 25 min de erosão para o primeiro teste de EDM	95
Figura 41 – Entropia Espectral em função do desgaste do primeiro teste	96
Figura 42 – Valor Eficaz em função do desgaste do primeiro teste	98
Figura 43 – Sinal EA (a) e Entropia Espectral (b) em 0 min de erosão no segundo teste	99
Figura 44 – STFT do sinal de EA em 0 min de erosão para o segundo teste de EDM.....	100
Figura 45 – Sinal EA (a) e Entropia Espectral (b) em 25 min de erosão no segundo teste ...	100
Figura 46 – STFT do sinal de EA em 25 min de erosão para o segundo teste de EDM.....	101
Figura 47 – Entropia Espectral em função do desgaste do segundo teste.....	102
Figura 48 – Valor Eficaz em função do desgaste do segundo teste	103
Figura 49 – Eletrodo virgem de Cobre Eletrolítico.....	105
Figura 50 – Histograma do eletrodo virgem de Cobre Eletrolítico.....	106
Figura 51 – Peça Virgem do Aço AISI H13	107
Figura 52 – Histograma da peça virgem do Aço AISI H13	107
Figura 53 – Eletrodo 1 após usinagem.....	108
Figura 54 – Histograma do Eletrodo 1	109
Figura 55 – Eletrodo 11 após usinagem.....	109
Figura 56 – Histograma do Eletrodo 11	110
Figura 57 – Superfície da peça após usinagem do primeiro teste.....	111
Figura 58 – Acabamento do Aço AISI H13 após eletroerosão.....	112
Figura 59 – Histograma da peça do primeiro teste	112
Figura 60 – Eletrodo 12 após usinagem.....	113
Figura 61 – Histograma do Eletrodo 12.....	114
Figura 62 – Eletrodo 22 após usinagem.....	114
Figura 63 – Histograma do Eletrodo 22.....	115
Figura 64 – Superfície da peça após usinagem do segundo teste	116
Figura 65 – Histograma da peça do segundo teste.....	116

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Polaridades de eletrodos para materiais de peças diferentes	50
Tabela 2 – Composição em porcentagem (%) de peso do aço AISI H13	73
Tabela 3 – Parâmetros utilizados nos testes	82
Tabela 4 – Tempo de duração de usinagem por eletrodo – Primeiro teste.....	85
Tabela 5 – Tempo de duração de usinagem por eletrodo – Segundo teste.....	87
Tabela 6 – Resultado das rugosidades das peças.....	89
Tabela 7 – Resultado do desgaste.....	91

LISTA DE SIGLAS

ABINFER	Associação Brasileira da Indústria de Ferramentais
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
AISI	Instituto Americano do Ferro e do Aço (American Iron and Steel Institute)
ASM	Sociedade Americana de Metais (American Society for Metals)
CNC	Controle Numérico Computadorizado
DC	Corrente Contínua
E	Tensão Elétrica
EDM	Eletroerosão (Electrical Discharge Machining)
EDS	Espectroscopia de Energia Dispersiva (Energy Dispersive Spectroscopy)
EMI	Interferência Magnética (Electromagnetic Interference)
MEV	Microscópio Eletrônico de Varredura
NBR	Norma Brasileira
PCD	Diamante Policristalino (Polycrystalline Diamond)
PIB	Produto Interno Bruto
PSO	Otimização por Enxame de Partículas (Particle Swarm Optimization)
Ra	Rugosidade Aritmética Principal
RC	Circuito Resistivo-Capacitivo
RMS	Valor Eficaz (Root mean Square)
RNA	Redes Neurais Artificiais
RPM	Rotações Por Minuto
Rz	Rugosidade Total
se	Entropia Espectral (Spectral Entropy)
STFT	Transformada de Fourier de Tempo Curto (Short-time Fourier Transform)
TRM	Taxa de Remoção de Material
TS	Transistor Standard
VDI	Norma Alemã DEM, definição e terminologia (Verien Deutscher Ingenieure)
WEDM	Eletroerosão a Fio (Wire Electrical Discharge Machining)

LISTA DE SÍMBOLOS DE COMPOSTOS QUÍMICOS

Al	Alumínio
Al ₂ O ₃	Óxido de alumínio
C	Carbono
CO	Monóxido de Carbono
Cr	Crômio
Cu	Cobre
Mn	Manganês
Mo	Molibdênio
Ni	Níquel
O	Oxigênio
P	Fósforo
S	Enxofre
Si	Silício
V	Vanádio
W	Tungstênio
Zn	Zinco
ZnO	Óxido de Zinco

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	23
1.1 Objetivos.....	25
1.1.1 <i>Objetivo Geral.....</i>	25
1.1.2 <i>Objetivos Específicos.....</i>	26
1.2 Justificativa	26
1.3 Escopo do Projeto	28
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	29
2.1 Eletroerosão	29
2.1.1 <i>Fenomenologia.....</i>	36
2.1.1.1 <i>Fase de ignição da faísca</i>	39
2.1.1.2 <i>Formação de canal de plasma.....</i>	40
2.1.1.3 <i>Fusão e evaporação de material nos eletrodos.....</i>	41
2.1.1.4 <i>Ejeção do material fundido</i>	43
2.1.2 <i>Parâmetros de controle do processo EDM</i>	45
2.1.3 <i>Influência dos parâmetros do processo.....</i>	46
2.1.4 <i>Sistema de Lavagem</i>	51
2.1.4.1 <i>Lavagem por pressão.....</i>	51
2.1.4.2 <i>Lavagem por jato</i>	52
2.1.4.3 <i>Lavagem por sucção.....</i>	53
2.1.5 <i>Fluido dielétrico</i>	54
2.2 Emissão acústica	56
2.3 Processamento de sinais	61
2.3.1 <i>Transformadas.....</i>	63
2.3.2 <i>Valor Efícaz</i>	65
2.3.3 <i>Entropia Espectral.....</i>	67
3 METODOLOGIA.....	71
3.1 Materiais.....	72
3.2 Métodos	74
3.2.1 <i>Usinagem por Eletroerosão.....</i>	74
3.2.2 <i>Aquisição dos sinais EA</i>	76
3.2.3 <i>Análise superficial de rugosidade</i>	78
3.2.4 <i>Medição do desgaste do Eletrodo</i>	79
3.2.5 <i>Microscopia Eletrônica de Varredura</i>	80
3.2.6 <i>Procedimentos</i>	81
4 RESULTADOS	85
4.1 Usinagem EDM.....	85
4.1.1 <i>EDM do primeiro teste</i>	85
4.1.2 <i>EDM do segundo teste.....</i>	87
4.2 Rugosidade superficial	89
4.3 Resultados do desgaste do eletrodo.....	90
4.4 Resultados da Emissão Acústica	92
4.4.1 <i>EA do primeiro teste de EDM.....</i>	92
4.4.2 <i>EA do segundo teste de EDM</i>	99
4.5 Resultados do MEV	105
4.5.1 <i>MEV do Primeiro teste de EDM.....</i>	108

<i>4.5.2 MEV do Segundo teste de EDM</i>	113
5 CONCLUSÃO	119
6 SUGESTÃO PARA TRABALHOS FUTUROS	121
REFERÊNCIAS	123