PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA DO PARANÁ

CESAR AUGUSTO OLEINIK LUZIA

MODIFICAÇÃO DA SUPERFÍCIE DO AÇO AISI H13 ATRAVÉS DA ADIÇÃO DO PÓ DE SILÍCIO EM SUSPENSÃO NO DIELÉTRICO DURANTE O PROCESSO DE USINAGEM POR ELETROEROSÃO

CURITIBA
Maio – 2017

PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA DO PARANÁ

CESAR AUGUSTO OLEINIK LUZIA

MODIFICAÇÃO DA SUPERFÍCIE DO AÇO AISI H13 ATRAVÉS DA ADIÇÃO DO PÓ DE SILÍCIO EM SUSPENSÃO NO DIELÉTRICO DURANTE O PROCESSO DE USINAGEM POR ELETROEROSÃO

Dissertação apresentada como requisito parcial à obtenção do grau de Mestre em Engenharia Mecânica, Curso de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Escola Politécnica, Pontifícia Universidade Católica do Paraná.

Orientador: Prof. Dr. Eng. Fred L. Amorim
Co-orientador: Prof. Dr. Eng. Carlos A. H. Laurindo

CURITIBA
Maio – 2017

Dados da Catalogação na Publicação
Pontifícia Universidade Católica do Paraná
Sistema Integrado de Bibliotecas – SIBI/PUCPR
Biblioteca Central

L979m
2017

Luzia, Cesar Augusto Oleinik
Modificação da superfície do aço AISI H13 através da adição do pó de silício em suspensão no dielétrico durante o processo de usinagem / Cesar Augusto Oleinik Luzia ; orientador, Fred L. Amorim ; coorientador, Carlos H. Laurindo. -- 2017
73 f. : il.; 30 cm

Dissertação (mestrado) – Pontifícia Universidade Católica do Paraná, Curitiba, 2015
Bibliografia: f. 71-73

1. Engenharia mecânica. 2. Usinagem por eletroerosão. 3. Desgaste mecânicos. 4. Moldagem por injeção de plástico. I. Amorim, Fred Lacerda. II. Laurindo, Carlos Augusto Henning. III. Pontifícia Universidade Católica do Paraná. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica. IV. Título.

CDD 20. ed. – 620.1

Pontifícia Universidade Católica do Paraná
Escola Politécnica
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica

TERMO DE APROVAÇÃO

César Augusto Oleinik Luzia

Modificação da Superfície do Aço AISI H13 Através da Adição do Pó de Silício em Suspensão no Dielétrico Durante o Processo de Usinagem por Eletroerosão

Dissertação aprovada como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre no Curso de Mestrado em Engenharia Mecânica, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, da Escola Politécnica da Pontifícia Universidade Católica do Paraná, pela seguinte banca examinadora:

Prof. Dr. Paulo Victor Prestes Marcondes
(UFPR)

Prof. Dr. Luciano Antonio Mendes
(PUCPR)

Prof. Dr. Carlos Augusto Henning Laurindo
(Co- Orientador), PUCPR

Prof. Dr. Fred Lacerda Amorim
(PUCPR), Orientador

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA
PUCPR
GRUPO MARISTA

Curitiba, 30 de maio de 2017

Aos meus pais,

Cesar Pedrozo Luzia e Maria Ana Oleinik Luzia

AGRADECIMENTOS

Quero agradecer à minha família pelo total apoio, não somente nesta etapa, mas também em toda a minha vida.

Ao Professor Fred Amorim pela orientação deste trabalho, como também pelos conselhos, que sempre são de grande valia.

Ao Professor Carlos Laurindo, pela co-orientação do trabalho.

Aos Professores do PPGEM da PUCPR, pelo conhecimento repassado através das disciplinas, como também durante todo o trabalho.

Ao ex-técnico do LAUS, Julio Martinez, pelo auxílio prático durante o dia-a-dia do laboratório, e também pela amizade.

Aos demais técnicos dos laboratórios onde foram realizadas os ensaios e análises.

Aos meus amigos, pelo apoio e compreensão nos momentos em que estive ausente.

Ao Engenheiro Mecânico Jorge Krenchiglova, que durante sua graduação me auxiliou na realização dos ensaios tribológicos.

À Temperapar, na pessoa da Srta. Vivian Pigari, que prontamente aceitou realizar o tratamento térmico das amostras.

Aos colegas da pós-graduação pelo apoio mútuo.

À Srta. Jane Marques, secretária do PPGEM, sempre pronta para nos atender e trazer uma palavra de incentivo.

RESUMO

O processo de eletroerosão com pó em suspensão (PMEDM – *Powder Mixed Electrical Discharge Machining*) teve seus estudos iniciados em 1980, através da aplicação de elementos no dielétrico com o objetivo de investigar a influência de partículas no desempenho do processo. Em seguida, os estudos se concentraram na produção de camadas com baixa rugosidade e aspecto espelhado, denominada *"mirror-like".* Em meados da década de 1990, as pesquisas se voltaram à análise da integridade e melhoria da camada resolidificada, a qual normalmente apresenta uma grande quantidade de poros e trincas afetando a vida em fadiga da peça eletroerodida. Além disso, evidenciou-se a capacidade da PMEDM na produção de camadas com maior dureza, através da mudança na composição química contribuindo para uma maior resistência ao desgaste da peça. Apesar dos avanços contínuos, poucos estudos citam resultados que avaliem a resistência ao desgaste da camada produzida, o que é de especial interesse a moldes de injeção, peça submetida a meios corrosivos e de desgaste abrasivo e uma das principais aplicações da EDM. Sendo assim, este trabalho teve por objetivo: melhorar o acabamento da camada resolidificada, reduzindo a rugosidade e a quantidade de poros e trincas, como também avaliar a influência da PMEDM nas propriedades de dureza e resistência ao desgaste. Os experimentos foram conduzidos em uma EDM Charmilles ROBOFORM 30, no Laboratório de Pesquisa em Usinagem – LAUS, da Pontifícia Universidade Católica do Paraná, sendo as análises realizadas nos laboratórios do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da mesma instituição. Foi utilizado o pó de silício numa concentração de 5 g/L, sendo variados o tempo de descarga, a corrente de descarga e o tempo total de processo. O material utilizado foi aço AISI H13 temperado e revenido. Para que o pó se mantivesse em suspensão no dielétrico, e também a fim de evitar a sua ida para o sistema de filtragem do equipamento uma cuba foi utilizada, onde foi instalada uma bomba que agitava constantemente o líquido dielétrico. Foram realizadas análises de microscopia óptica e eletrônica, onde foi possível observar que em determinadas condições foi possível obter camadas sem trincas e poros, e com uma boa uniformidade. Para a condição de 2 A e 6,4 μs de corrente e tempo de descarga, respectivamente, foi obtida a maior dureza em consequência da formação da fase martensítica tetragonal de corpo centrado (TCC), o que influenciou diretamente no aumento da resistência ao desgaste da peça. Sendo assim, conclui-se que ao se utilizar o pó de silício no meio dielétrico durante o processo de eletroerosão, foi possível obter no aço AISI H13 camadas íntegras com melhoria nas propriedades de dureza e resistência ao desgaste.

Palavras-chave: PMEDM. Resistência ao Desgaste. Moldes de Injeção.

ABSTRACT

The Powder Mixed Electrical Discharge Machining (PMEDM) process, has been investigated since 1980, through the application of elements in the dielectric with the objective of investigating the influence of particles in the performance of the EDM process. As a next step, the studies focused on the production of layers with low roughness and mirrored appearance, called "mirror-like". In the mid-1990s, the researches turned to the analysis of the integrity and improvement of the resolidified layer, which normally presents a great amount of pores and cracks affecting the fatigue life of the EDMed piece. In addition, the PMEDM's ability to produce layers with greater hardness was evidenced by the change in the chemical composition contributing to a higher wear resistance of the workpiece. Despite of the continuous advances, few studies have reported results that evaluate the wear resistance of the layer produced, which is of special interest to injection molds, tools subjected to corrosive and abrasive wear environment and one of the main applications of EDM. The aim of this work was to improve the finishing of the resolidified layer, reducing the roughness and pores and cracks, as well as to evaluate the influence of PMEDM on the properties of hardness and wear resistance. The experiments were conducted in a Charmilles ROBOFORM 30 sinker EDM, at the Laboratório de Pesquisa em Usinagem - LAUS, of the Pontifícia Universidade Católica do Paraná, the analyzes were carried out in the laboratories of the Department of Mechanical Engineering. The silicon powder at a concentration of 5 g/L was used, where were varied, the discharge duration, discharge current and the machining time. The material used was the AISI H13 steel, quenched and tempered. In order to keep the powder in suspension in the dielectric, and also to prevent its passage to the filtration system of the equipment, a tank was used, where a pump was installed that constantly stirred the dielectric liquid. Optical and electron microscopy analyzes were performed, where it was possible to observe that under certain conditions was obtained layers without cracks and pores, and with good uniformity. Setting of 2 A and 6.4 μs of discharge current and discharge duration, respectively, showed the higher hardness as consequence of martensite phase formation with body centered tetragonal (BCT) structure, which directly influenced in increase the wear resistance of workpiece. Thus, it was concluded that when the silicon powder was suspended in the dielectric during the EDM process, it was possible to obtain intact layers in the AISI H13 steel with improved properties of hardness and wear resistance.

Keywords: PMEDM. Wear Resistance. Injection Molds.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Classificação dos processos de remoção de material 9
Figura 2 – Série de descargas elétricas durante a EDM 10
Figura 3 – Esquematização da geração de descargas por meio do circuito de relaxação 10
Figura 4 – Fenda de trabalho 11
Figura 5 – Exemplos da aplicação do processo de eletroerosão 11
Figura 6 – Principais componentes da máquina de EDM 12
Figura 7 – Fases de uma descarga elétrica 13
Figura 8 – Cratera formada por uma única descarga 14
Figura 9 – Parâmetros elétricos da EDM 16
Figura 10 – Rugosidades padronizadas pela norma VDI 3400 16
Figura 11 – Classificação dos processos não-tradicionais de remoção conforme princípio físico 17
Figura 12 – Descrição da faísca de EDM 18
Figura 13 – Camadas mais comuns formadas após a eletroerosão 18
Figura 14 – Camada resolidificada típica após a eletroerosão do aço 19
Figura 15 – Influência das partículas no processo de EDM 25
Figura 16 – Princípio do processo de PMEDM 25
Figura 17 – Mecanismo da deposição de elementos químicos durante a PMEDM 26
Figura 18 – Representação esquemática do equipamento para PMEDM 28
Figura 19 – Corpo de prova eletroerodido com pó de molibdênio 30
Figura 20 – Parâmetros e resultados obtidos na eletroerosão do aço AISI H13 adicionando pó de molibdênio no dielétrico 30
Figura 21 – Camada formada utilizando pó de silício 31
Figura 22 – Imagens obtidas por microscopia eletrônica de varredura das micro fendas eletroerodidas em diferentes condições de dielétrico 32
Figura 23 – Fluxograma da sequência experimental da pesquisa 33
Figura 24 – Direita: cuba a ser utilizada durante os experimentos. Esquerda: cuba adaptada ao equipamento de EDM 34
Figura 25 – Representação dos períodos de avanço U e retração R durante o processo de EDM. 36

Figura 26 – Representação esquemática da disposição dos componentes para o ensaio tribológico utilizando o método de deslizamento recíproco linear.....39
Figura 27 – Camada formada após o processo de PMEDM, utilizando pó silício. Aumento: 500x. Corrente elétrica: 1 A, tempo de descarga: 3,2 us. Tempo de processo: (a) 15 minutos, (b) 30 minutos, (c) 2 horas e (d) 4 horas.....40
Figura 28 – Camada formada após o processo de PMEDM, utilizando pó de silício. Aumento: 2500x. Corrente elétrica: 1 A, tempo de descarga: 3,2 µs. Tempo de processo: (a) 15 minutos, (b) 30 minutos, (c) 2 horas e (d) 4 horas.....41
Figura 29 – Camada formada após o processo de PMEDM, utilizando pó silício. Aumento: 500x. Corrente elétrica: 1 A, tempo de descarga: 6,4 us. Tempo de processo: (a) 15 minutos, (b) 30 minutos, (c) 2 horas e (d) 4 horas 42
Figura 30 – Camada formada após o processo de PMEDM, utilizando pó de silício. Aumento: 2500x. Corrente elétrica: 1 A, tempo de descarga: 6,4 µs. Tempo de processo: (a) 15 minutos e (b) 4 horas.....42
Figura 31 – Camada formada após o processo de PMEDM, utilizando pó silício. Aumento: 500x. Corrente elétrica: 1 A, tempo de descarga: 12,8 us. Tempo de processo: (a) 15 minutos, (b) 30 minutos, (c) 2 horas e (d) 4 horas 43
Figura 32 – Camada formada após o processo de PMEDM, utilizando pó silício. Aumento: 500x. Corrente elétrica: 2 A, tempo de descarga: 3,2 us. Tempo de processo: (a) 15 minutos, (b) 30 minutos, (c) 2 horas e (d) 4 horas 44
Figura 33 – Camada formada após o processo de PMEDM, utilizando pó silício. Aumento: 500x. Corrente elétrica: 2 A, tempo de descarga: 6,4 us. Tempo de processo: (a) 15 minutos, (b) 30 minutos, (c) 2 horas e (d) 4 horas 45
Figura 34 – Camada formada após o processo de PMEDM, utilizando pó silício. Aumento: 500x. Corrente elétrica: 2 A, tempo de descarga: 12,8 us. Tempo de processo: (a) 15 minutos, (b) 30 minutos, (c) 2 horas e (d) 4 horas 46
Figura 35 – Espessura das camadas formadas utilizando corrente de 1 A.....47
Figura 36 – Espessura das camadas formadas utilizando corrente de 2 A.....47
Figura 37 – Rugosidade da superfície eletroerodida com corrente de 1 A.....48
Figura 38 – Rugosidade da superfície eletroerodida com corrente de 2 A.....49
Figura 39 – Microdureza das camadas formadas. Tempo de processo: 4 horas, corrente: 1 A.....50
Figura 40 – Fotografia realizada através da lente ocular do microdurômetro mostrando a indentação e trincas geradas na camada, setas em vermelho.....50

Figura 41 – Microdureza das camadas formadas. Tempo de processo: 4 horas, corrente: 2 A.....51
Figura 42 – Microdureza das melhores camadas formadas no tempo de 15 minutos 52
Figura 43 – Microdureza das melhores camadas formadas no tempo de 4 horas....52
Figura 44 – DRX do aço AISI H13 temperado e revenido.....53
Figura 45 – DRX das amostras eletroerodidas durante 15 minutos e 4 horas, com corrente de 1 A e tempo de descarga de 12,8 μs 54
Figura 46 – DRX das amostras eletroerodidas durante 15 minutos e 4 horas, com corrente de 2 A e tempo de descarga de 3,2 μs 55
Figura 47 – DRX das amostras eletroerodidas durante 15 minutos e 4 horas, com corrente de 2 A e tempo de descarga de 6,4 μs 55
Figura 48 – MEV da seção transversal da amostra eletroerodida com corrente de descarga de 1 A e tempo de descarga de 12,8 μs. Tempo de processo: 15 minutos 56
Figura 49 – Variação da porcentagem mássica dos elementos em relação à profundidade da camada formada, 1 A, 12,8 us, 15 minutos 57
Figura 50 – MEV da seção transversal da amostra eletroerodida com corrente de descarga de 1 A e tempo de descarga de 12,8 μs. Tempo de processo: 4 horas 57
Figura 51 – Variação da porcentagem mássica dos elementos em relação à profundidade da camada formada, 1 A, 12,8 us, 4 horas.....58
Figura 52 – MEV da seção transversal da amostra eletroerodida com corrente de descarga de 2 A e tempo de descarga de 3,2 μs. Tempo de processo: 15 minutos.59
Figura 53 – Variação da porcentagem mássica dos elementos em relação à profundidade da camada formada, 2 A, 3,2 us, 15 minutos 59
Figura 54 – MEV da seção transversal da amostra eletroerodida com corrente de descarga de 2 A e tempo de descarga de 3,2 μs. Tempo de processo: 4 horas 60
Figura 55 – Variação da porcentagem mássica dos elementos em relação à profundidade da camada formada, 2 A, 3,2 us, 4 horas.....60
Figura 56 – MEV da seção transversal da amostra eletroerodida com corrente de descarga de 2 A e tempo de descarga de 6,4 μs. Tempo de processo: 15 minutos.61
Figura 57 – Variação da porcentagem mássica dos elementos em relação à profundidade da camada formada, 2 A, 6,4 μs, 15 minutos 62

Figura 58 – MEV da seção transversal da amostra eletroerodida com corrente de descarga de 2 A e tempo de descarga de 6,4 µs. Tempo de processo: 4 horas 62
Figura 59 – Variação da porcentagem mássica dos elementos em relação à profundidade da camada formada, 2 A, 6,4 us, 4 horas.....63
Figura 60 – Coeficiente de atrito máximo para as amostras eletroerodidas durante 15 minutos.....64
Figura 61 – Coeficiente de atrito máximo para as amostras eletroerodidas durante 4 horas 64
Figura 62 – Comportamento do coeficiente de atrito das amostras eletroerodidas durante 15 minutos.....65
Figura 63 – Comportamento do coeficiente de atrito das amostras eletroerodidas durante 4 horas 65
Figura 64 – Taxa de desgaste das amostras eletroerodidas durante 15 minutos 66
Figura 65 – Taxa de desgaste das amostras eletroerodidas durante 4 horas.....67

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Parâmetros utilizados nos experimentos.....35

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

EDM	Electrical Discharge Machining
PMEDM	Powder Mixed Electrical Discharge Machining
LAUS	Laboratório de Pesquisa em Usinagem
VDI	Verein Deutscher Ingenieure
ZAT	Zona Afetada Termicamente
EDC	Electrical Discharge Coating
AISI	American Iron and Steel Institute
PUCPR	Pontifícia Universidade Católica do Paraná
Co	Concentração
Mt	Machining Time
EDS	Energy Dispersive Spectroscopy
DRX	Difratometria de Raios-X
MEV	Microscopia Eletrônica de Varredura
rpm	Rotações por minuto
%Wt	Percentage by Weight
BCT	Body Centered Tetragonal
TCC	Tetragonal de Corpo Centrado
HV	Hardness Vickers

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO 7
2 O PROCESSO DE USINAGEM POR ELETROEROSÃO 9
2.1 INÍCIO DAS PESQUISAS E DESENVOLVIMENTO DO EQUIPAMENTO 10
2.2 CARACTERÍSTICAS DA EDM POR PENETRAÇÃO 11
2.3 PRINCÍPIO FÍSICO DO PROCESSO DE EDM 13
2.4 PARÂMETROS DO PROCESSO 15
2.5 PARÂMETROS DE AVALIAÇÃO DO PROCESSO 16
3 MODIFICAÇÃO DA SUPERFÍCIE PELA EDM 17
3.1 EFEITO DA EDM SOBRE A SUPERFÍCIE DO AÇO 17
3.2 TÉCNICAS PARA MELHORIA DA SUPERFÍCIE ATRAVÉS DA EDM 20
3.2.1 Modificação através de eletrodos de pós compactados 20
3.2.2 Modificação através da adição de pó no meio dielétrico 22
4 ELETROEROSÃO COM ADIÇÃO DE PÓ EM SUSPENSÃO NO DIELÉTRICO 24
4.1 INFLUÊNCIA DA PMEDM 24
4.1.1 No processo 24
4.1.2 Na peça usinada 26
4.2 MODIFICAÇÃO DO EQUIPAMENTO 27
4.3 PARÂMETROS DO PROCESSO 28
4.4 INVESTIGAÇÕES EXPERIMENTAIS NA PMEDM 28
4.5 APLICAÇÕES TECNOLÓGICAS DA PMEDM 31
5 METODOLOGIA EXPERIMENTAL 33
6 RESULTADOS E DISCUSSÕES 40
6.1 MICROSCOPIA ÓPTICA 40
6.2 ESPESSURA 47
6.3 RUGOSIDADE 48
6.4 MICRODUREZA VICKERS 49
6.5 DIFRAÇÃO DE RAIOS-X (DRX) 53
6.6 MICROSCOPIA ELETRONICA DE VARREDURA (MEV) 56
6.7 COEFICIENTE DE ATRITO 63
6.8 RESISTÊNCIA AO DESGASTE 66
7 CONCLUSÕES 68

8 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....70
REFERÊNCIAS.....71

1 INTRODUÇÃO

O processo de usinagem por eletroerosão *(Electrical Discharge Machining*) é um processo denominado “não-convencional”. No entanto, devido às suas características únicas, é largamente utilizado pela indústria. Inicialmente, foi aplicado principalmente na confecção de moldes para injeção de plásticos, e matrizes de estampagem e forjamento. Com os desenvolvimentos tecnológicos trazidos pela pesquisa na área da EDM, foi possível aumentar o campo de atuação desse processo, sendo atualmentel empregado na indústria aeroespacial, eletroeletrônica e na área médica. A possibilidade de usinar geometrias complexas e de tamanhos reduzidos faz com que a EDM seja também utilizada na confecção de microcomponentes, área cada vez mais crescente na mecânica de precisão (HO & NEWMAN, 2003).

Mesmo sendo a EDM, inegavelmente, um processo de remoção, em condições apropriadas pode se tornar um método para tratamento de superfície e/ou adição de material (KUNIEDA et al., 2005). O processo mais conhecido e pesquisado sob esse aspecto é a PMEDM *(Powder Mixed EDM)*, que concentra aproximadamente 20% das pesquisas na área da eletroerosão (PAWADE & BANWAIT, 2013). A PMEDM consiste na adição de um elemento metálico, ou não, na forma de pó no dielétrico, líquido que envolve o conjunto de eletrodos ferramenta-peça, durante o processo.

As primeiras pesquisas datam da década de 1980, onde foram empregados os pós de alumínio, silício e grafita (NARUMIYA et al., 1989). Entre os principais benefícios trazidos pela PMEDM, estão: produção de uma superfície polida, decréscimo do tempo de acabamento, aumento na resistência à corrosão e abrasão, aumento da fenda de trabalho e estabilidade do processo (KUMAR et al., 2009). Além dessas vantagens, é possível citar a economia de tempo e recursos na produção de uma peça, pois pode-se descartar processos ou tratamentos posteriores à usinagem, que teriam como objetivo a melhoria da peça com relação às propriedades acima destacadas (STEVENS, 1998).

Até a presente data, vários tipos de elementos já foram testados, entre eles estão o níquel, cobalto, ferro, alumínio, cromo, cobre, titânio e grafita, onde foram avaliadas as influências dos parâmetros do processo de eletroerosão, concentração de pó, tipo

de dielétrico e tamanho das partículas do pó, entre outros aspectos, na integridade de superfície das peças após EDM; obtendo-se vantagens e desvantagens na aplicação de cada um deles. Um dos pós mais utilizados é o de silício (PECAS & HENRIQUES, 2003; NARUMIYA et al., 1989; WONG et al., 1998), enquanto outros elementos como o manganês, cromo e molibdênio são pouco explorados (KUMAR et al., 2009). É observado que na maioria dos trabalhos o enfoque da pesquisa é com relação ao acabamento da superfície, sendo aspectos importantes como resistência à corrosão e ao desgaste pouco investigados.

Deste modo, o presente trabalho tem por objetivo, a partir do trabalho desenvolvido por Molinetti (2010), investigar a influência dos parâmetros do processo de eletroerosão, particularmente a corrente de descarga, tempo de descarga e o tempo de processo, sobre a camada resolidificada, utilizando pó de silício no meio dielétrico. São analisados aspectos relacionados à integridade da camada resolidificada como também algumas propriedades mecânicas. O material utilizado nos ensaios é o aço ferramenta AISI H13 temperado e revenido, muito utilizado na indústria de fabricação de moldes de injeção.

2 O PROCESSO DE USINAGEM POR ELETROEROSÃO

Neste capítulo serão abordadas as principais características relacionadas ao processo de eletroerosão, um pouco do seu histórico, princípio físico, parâmetros de controle e de avaliação do processo.

O processo de usinagem por eletroerosão, apesar de sua larga aplicação industrial, é considerado um processo não convencional dentre aqueles que tem como objetivo a remoção de material, figura 1.

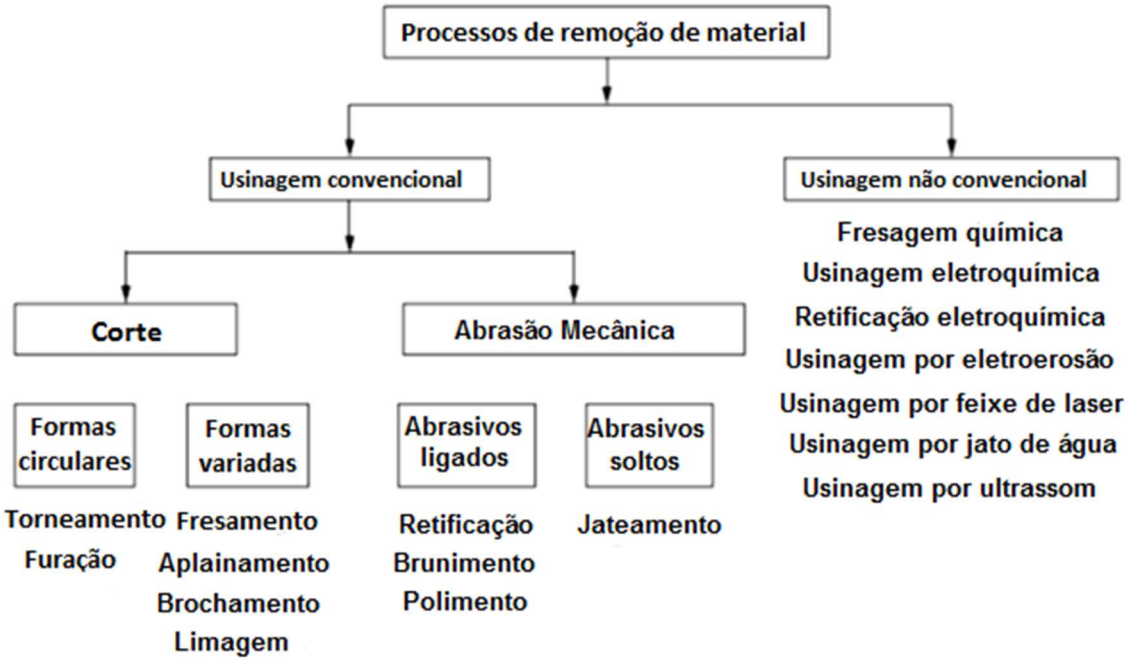


Figura 1. Classificação dos processos de remoção de material. Adaptado de EL-HOFY (2005).

A EDM tornou-se ao longo das últimas seis décadas um processo indispensável na indústria de manufatura, podendo ser aplicada na fabricação de moldes para injeção de plásticos e compósitos, matrizes, componentes automotivos, cirúrgicos e aeroespaciais (EL-HOFY, 2005; HO & NEWMAN, 2003).

Em termos gerais, a remoção de material ocorre em função de descargas elétricas que ocorrem entre o eletrodo-ferramenta e o eletrodo-peça, ou simplesmente ferramenta e peça de trabalho, respectivamente. Cada descarga, ou faísca, remove uma pequena porção de material de ambos os eletrodos, porém a maior parte é retirada da peça de trabalho. A sucessão das descargas elétricas em alta frequência,

entre 500 e 500.000 por segundo, permite que o processo tenha eficiência. A figura 2 mostra uma foto tirada durante o processo, onde é possível ver as descargas elétricas.

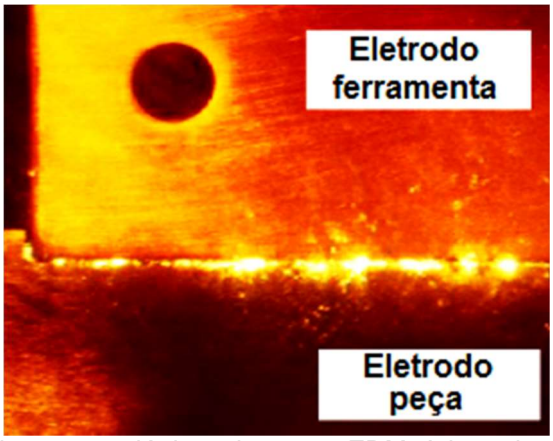


Figura 2. Série de descargas elétricas durante a EDM. Adaptado de AMORIM (2002).

2.1 INÍCIO DAS PESQUISAS E DESENVOLVIMENTO DO EQUIPAMENTO

Atribui-se ao cientista inglês Joseph Priestly a descoberta do efeito erosivo de descargas elétricas, remontando ao ano de 1770. No entanto, foi somente em 1943 que as propriedades desse efeito destrutivo tiveram suas primeiras investigações, estas realizadas pelo casal cientista russo B.R. e N.I. Lazarenko na Universidade de Moscou. Eles desenvolveram um processo controlado para a usinagem de metais denominados *difficult-to-machine* (difícil para usinar), através da vaporização de material a partir da superfície. A geração das descargas elétricas era feita utilizando um circuito de relaxação (resistivo-capacitivo) como mostra a figura 3. Este sistema foi largamente aplicado na década de 1950, servindo como modelo para o sucessivo desenvolvimento na eletroerosão (HO & NEWMAN, 2003).

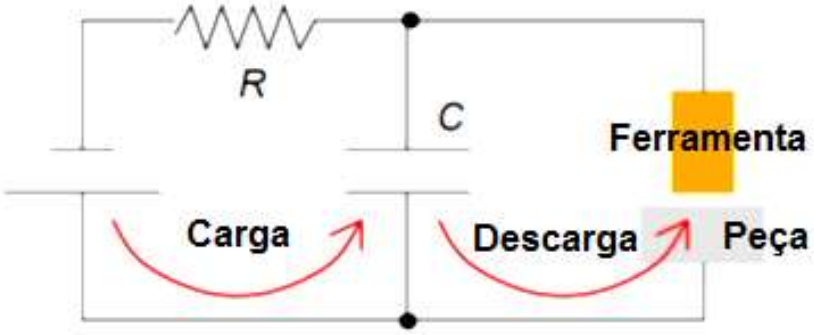


Figura 3. Esquematização da geração de descargas por meio do circuito de relaxação. Adaptado de KUNIEDA (2005).

2.2 CARACTERÍSTICAS DA EDM POR PENETRAÇÃO

Na EDM por penetração a peça é usinada conforme o formato da ferramenta em função das descargas elétricas ocorrerem em toda a superfície do eletrodo-ferramenta. Um aspecto importante do processo de EDM, tanto por penetração quanto à fio, é que não há contato entre ferramenta e peça, sendo estas separadas por um espaço chamado fenda de trabalho *(gap)*, como mostra a figura 4.

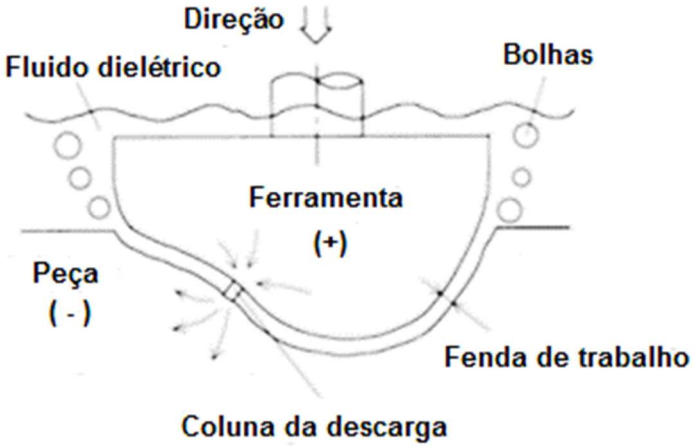


Figura 4. Fenda de trabalho. Adaptado de KUNIEDA (2005).

Portanto, são duas as maneiras de usinagem em relação ao formato da ferramenta. A primeira é a ferramenta possuir o formato exato daquele que se quer obter na peça, como mostra a figura 5(a) (EDM Handbook, 2005). A segunda é através da combinação de movimentos de uma ferramenta com menor complexidade geométrica, para a formação de uma geometria de maior complexidade, exemplificada na figura 5(b) (EDM Handbook, 2005).

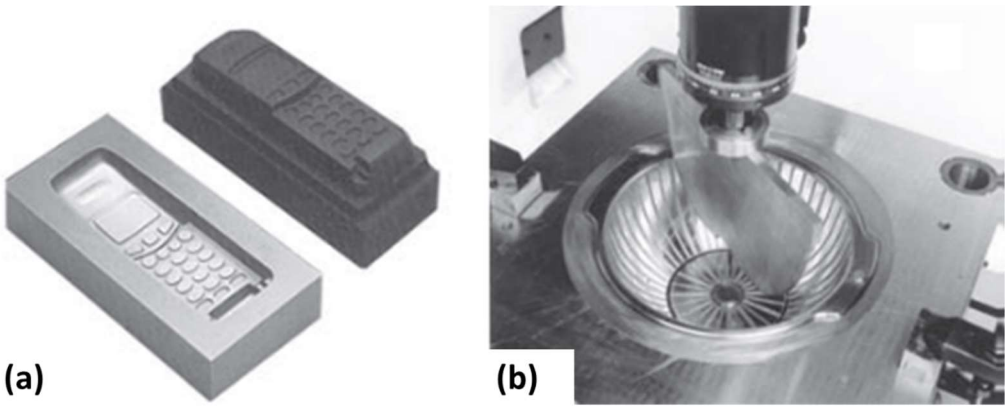


Figura 5. Exemplos da aplicação do processo de eletroerosão. (a). Eletrodo confeccionado na forma desejada do molde. (b). Eletrodo de geometria simples. Adaptado de EDM Handbook (2005).

Os materiais utilizados como eletrodo-ferramenta devem possuir um alto ponto de fusão (metais) e boa condutividade elétrica. O grafite é o material mais utilizado em função da sua boa usinabilidade e baixo desgaste durante a operação. O cobre também é muito utilizado, geralmente para regimes de acabamento para obtenção de uma rugosidade na peça na faixa de 0,5 µm R_a. Em condições especiais podem ser utilizadas as ligas cobre-tungstênio, prata-tungstênio e latão como materiais para eletrodo (EL-HOFY, 2005).

Os componentes da máquina de eletroerosão podem ser separados em: sistema elétrico (CNC e gerador), sistema mecânico (estrutura da máquina e servo) e sistema dielétrico (tanques, filtros e bomba), figura 6.

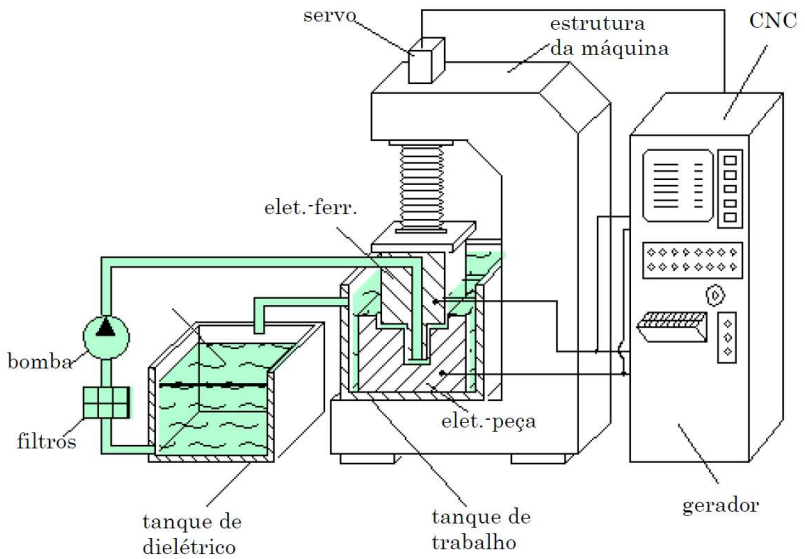


Figura 6. Principais componentes da máquina de EDM. Adaptado de AMORIM (2002).

Uma característica fundamental da EDM por penetração é a presença do fluido dielétrico que envolve ferramenta e peça durante o processo. As principais funções do dielétrico são: lavar as partículas da fenda de trabalho, proporcionar isolamento entre a ferramenta e a peça, como também arrefecer o local aquecido pelo efeito das descargas elétricas.

Outro importante aspecto da EDM é a lavagem das partículas para fora da fenda de trabalho afim de evitar curtos circuitos que podem se formar pelo acúmulo das mesmas. A lavagem pode ser feita através de fluxo aberto, através de furo no eletrodo-

ferramenta ou na peça, por sucção e também pela combinação de sucção e furo no eletrodo-ferramenta.

2.3 PRINCÍPIO FÍSICO DO PROCESSO DE EDM

Segundo Stevens (1998), os fenômenos físicos que ocorrem durante uma descarga elétrica podem ser divididos em quatro etapas subsequentes:

1ª: Fase de ignição;
2ª: Formação do canal de plasma;
3ª: Fusão e evaporação de uma pequena quantidade de material da peça;
4ª: Ejeção do material fundido.

A figura 7, mostra esquematicamente essas etapas e a respectiva evolução da tensão e corrente no decorrer de cada uma delas.

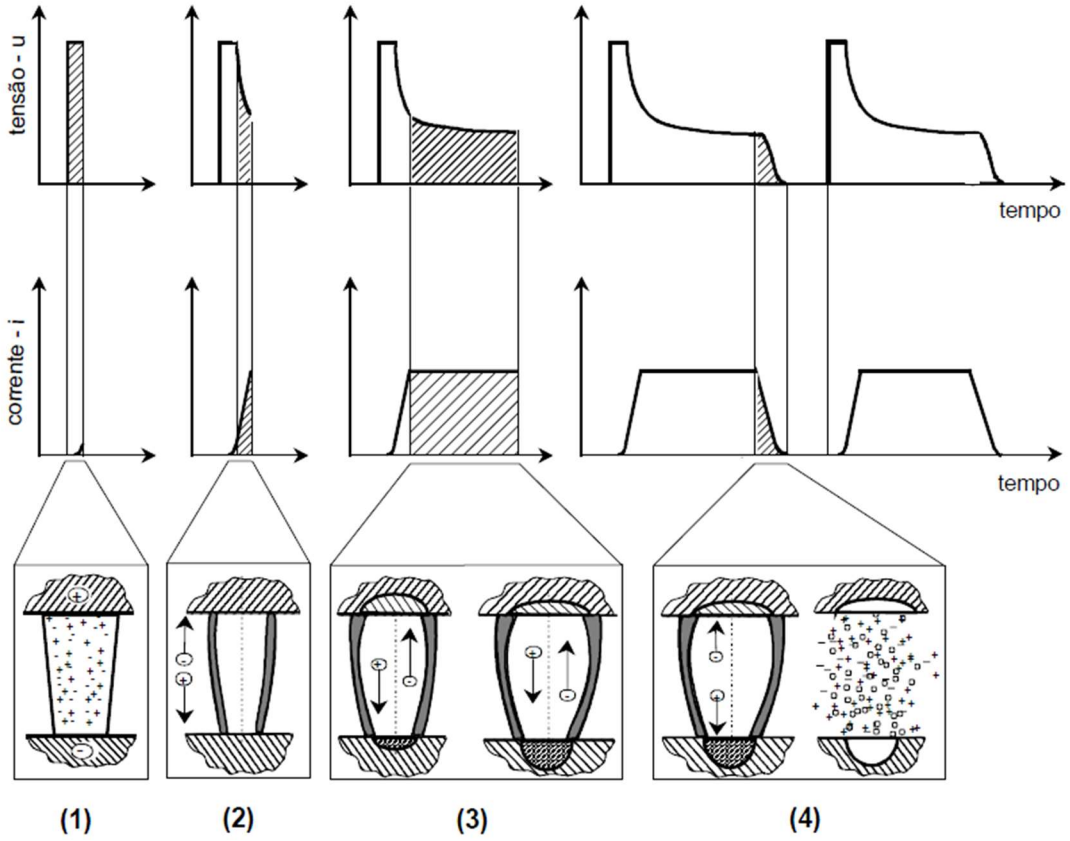


Figura 7. Fases de uma descarga elétrica. AMORIM (2002).

Na fase de ignição o eletrodo fica próximo a peça (0,5 a 1 mm) enquanto uma tensão em aberto é aplicada, nesta fase não há corrente. Elétrons do catodo são emitidos e acelerados pelo dielétrico em direção ao anodo. Neste movimento se chocam com moléculas do dielétrico liberando elétrons e íons positivos que vão em direção do catodo. Na segunda etapa os íons positivos que se chocam com o catodo causam a liberação de mais elétrons que se deslocam ao anodo, aumentando cada vez mais o fenômeno conhecido como ionização por impacto, o dielétrico por sua vez começa a vaporizar em pequena quantidade. A tensão em aberto diminui até a tensão de ruptura do dielétrico e a corrente atinge o valor pré-determinado.

Na terceira fase, o canal de plasma é mantido durante o tempo especificado e o seu diâmetro aumenta no decorrer da faísca como consequência da transferência de energia para a vizinhança. Com a alta temperatura a superfície do eletrodo e da peça se fundem continuamente, porém a pressão exercida sobre o material, pelo canal de plasma, não permite que o mesmo evapore em uma grande quantidade.

Quando o tempo de descarga termina, inicia-se a última fase, onde a corrente elétrica é cortada instantaneamente, dando início ao tempo de intervalo t_0 até o início de um novo ciclo. Os fenômenos envolvidos ao final da descarga elétrica serão melhor descritos no próximo capítulo.

A figura 8A exemplifica o efeito uma única faísca na superfície de um material, enquanto na figura 8B pode-se observar o mesmo efeito, porém, tridimensionalmente.

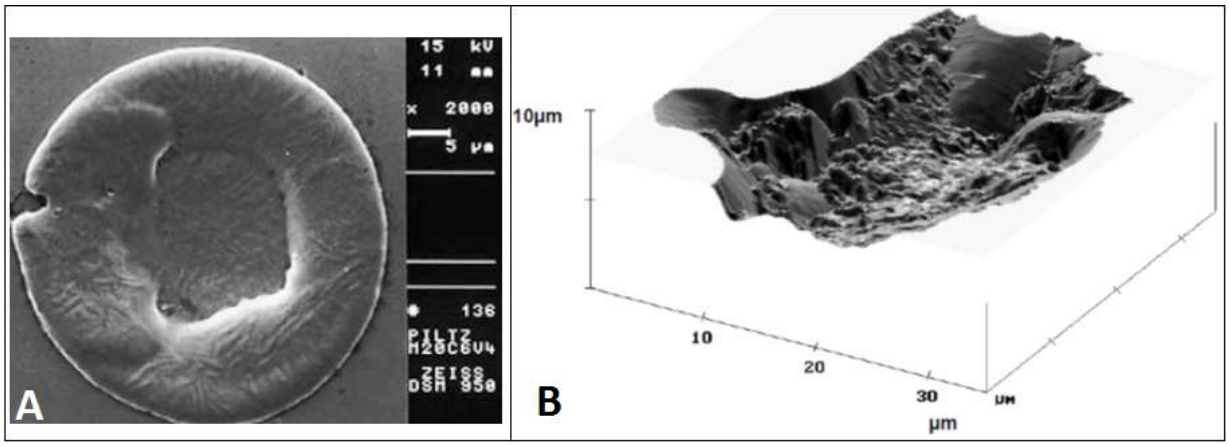


Figura 8. A, cratera formada por uma única descarga, vista de topo. (AGIE CHARMILLES, disponível em http://www.agiecharmilles.us). B, Cratera vista tridimensionalmente. JAHAN (2013).

2.4 PARÂMETROS DO PROCESSO

De acordo com a norma VDI 3402 de 1990, os principais parâmetros no processo de EDM são definidos da seguinte forma:

$\hat{u}_i$ - tensão em aberto [V] - tensão na fenda de trabalho quando não há fluxo de corrente;

$\bar{u}_e$ - tensão média da descarga [V] - representa a tensão na fenda no decorrer de uma faísca elétrica;

U - tensão média de trabalho [V] - significa a média aritmética da tensão na fenda de trabalho 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] - representa o tempo de aplicação de tensão na fenda de trabalho, correspondendo à soma do tempo de ignição t_d mais a duração da descarga t_e;

t_0 - tempo de intervalo entre dois sucessivos pulsos de tensão t_i [µs];

t_p - tempo do período do ciclo de uma descarga [µs] - representa a soma da duração do pulso de tensão t_i mais o tempo de intervalo t_0;

$\hat{i}_e$ - corrente máxima durante a descarga [A];

$\bar{i}_e$ - corrente média durante a descarga [A];

τ - relação de contato - representa a razão entre o tempo de pulso t_i e o tempo de período do ciclo da descarga t_p.

A figura 9 apresenta de maneira esquemática, o significado físico dos principais parâmetros do processo durante o ciclo de uma descarga elétrica, nas curvas de corrente e tensão.

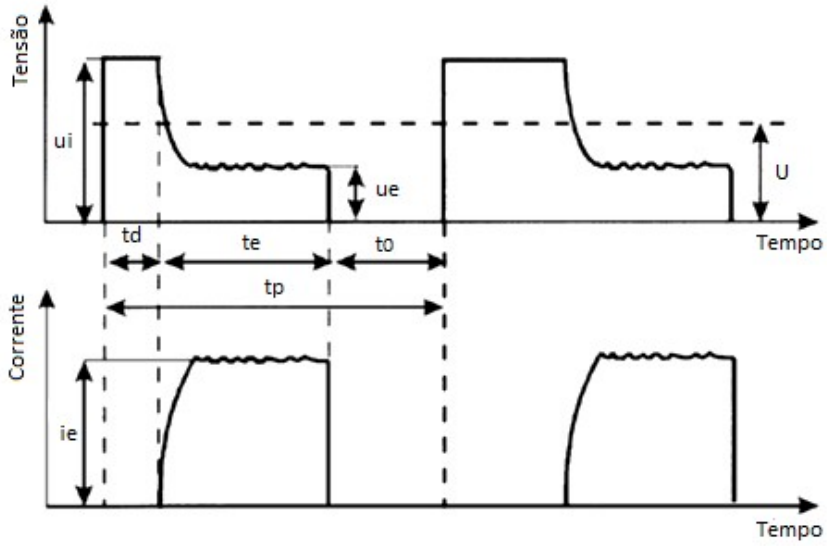


Figura 9. Parâmetros elétricos da EDM. STEVENS (1998).

2.5 PARÂMETROS DE AVALIAÇÃO DO PROCESSO

Os parâmetros pelos quais o processo de eletroerosão é avaliado, segundo Konig & Klocke (1997), são:

Taxa de remoção - V_w [mm³/min] - é o volume de material removido da peça na unidade de tempo;

Taxa de desgaste - V_e [mm³/min] - é o volume de material desgastado no eletrodo-ferramenta na unidade de tempo;

Desgaste relativo - v - é a relação entre a taxa de desgaste V_e e a taxa de remoção V_w.

Rugosidade - para a qualificação das superfícies produzidas são medidas as rugosidades R_a e R_z.

A rugosidade é classificada em níveis estipulados pela norma VDI 3400, como mostra a figura 10.

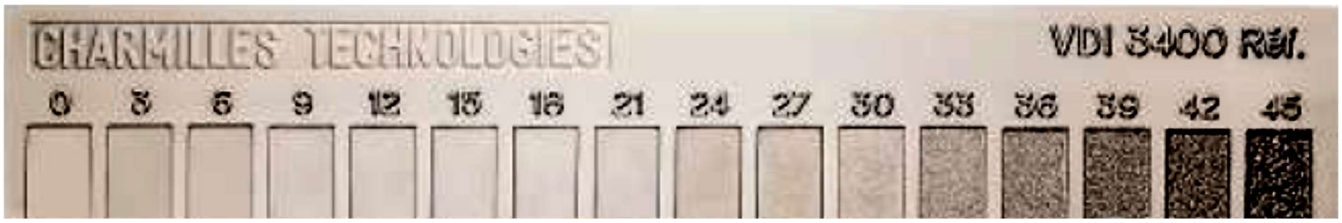


Figura 10. Rugosidades padronizadas pela norma VDI 3400. (AGIE CHARMILLES, disponível em http://www.agiecharmilles.us).

3 MODIFICAÇÃO DA SUPERFÍCIE PELA EDM

Neste capítulo são abordadas as modificações causadas pelo processo de EDM à superfície da peça, como também as técnicas utilizadas para o melhoramento da mesma.

3.1 EFEITO DA EDM SOBRE A SUPERFÍCIE DO AÇO

Como mencionado anteriormente o processo de eletroerosão está classificado como um processo de remoção não convencional, ou não tradicional. Além da EDM, outros processos são assim também denominados, os quais são divididos em grupos conforme o princípio de remoção envolvido: mecânico, térmico ou químico/eletroquímico, conforme mostra a figura 11 (EL-HOFY, 2005).

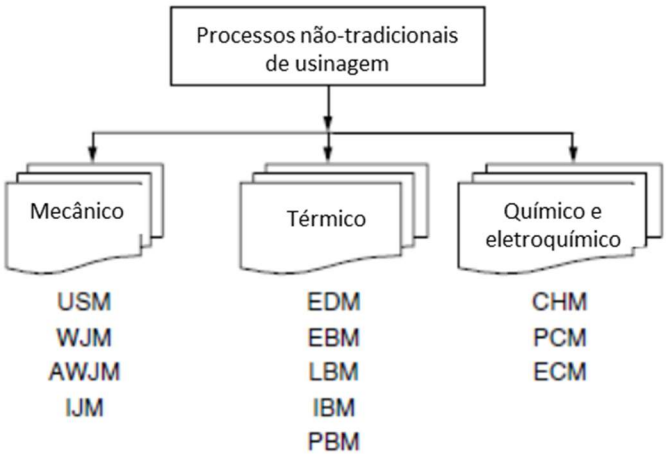


Figura 11. Classificação dos processos não-tradicionais de usinagem conforme princípio físico. Adaptado de EL-HOFY (2005).

Como pode ser observado a EDM está localizada no grupo de processos térmicos, isto devido à temperatura alcançada, aproximadamente entre 8000 e 12000ºC, e ao fluxo de calor, acima de 10^{17} W/m², como consequência da colisão de elétrons e íons na superfície da peça e do eletrodo, respectivamente (EL-HOFY, 2005). Durante a faísca, o dielétrico ao entorno da mesma é evaporado, fazendo com que a pressão no canal de plasma chegue a 200 atmosferas, o que evita a evaporação do metal superaquecido. Ao final do tempo de descarga a pressão cai abruptamente, sendo uma parte do metal fundido expelida, e outra solidificada. O material retirado é resfriado pelo dielétrico, formando finas esferas que são dispersadas no fluido, através

da lavagem. A parte não retirada é chamada de camada resolidificada, ou ainda, camada branca. A figura 12, mostra esquematicamente os elementos envolvidos durante uma faísca.

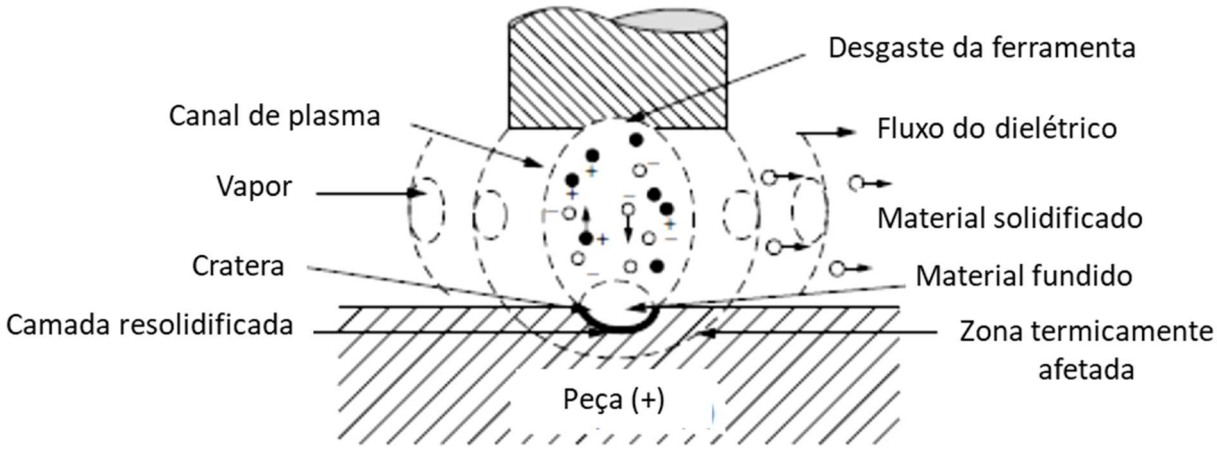


Figura 12. Descrição da faísca de EDM. Adaptado de EL-HOFY (2005).

Além da produção da camada resolidificada, há também o efeito da temperatura na porção do material localizada imediatamente abaixo da mesma, a qual é conhecida como zona termicamente afetada (ZTA). Stevens (1998), no seu trabalho, cita vários autores, os quais identificam diversas camadas dentro da ZTA, porém em quantidades e denominações diferentes. A figura 13, mostra esquematicamente a nomenclatura típica das camadas encontradas em uma peça submetida ao processo de eletroerosão.

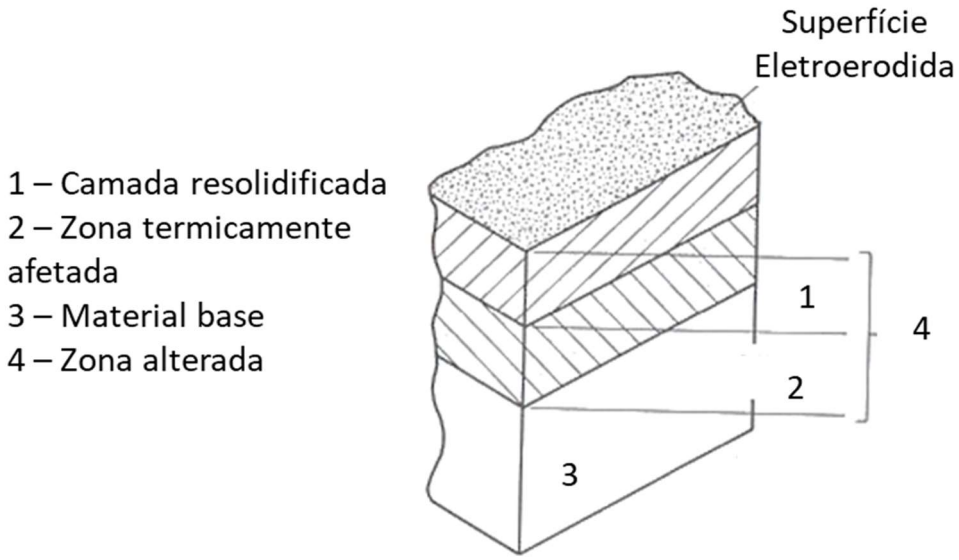


Figura 13. Camadas mais comuns formadas após a eletroerosão. Adaptado de LASCOE (1988).

A camada resolidificada é formada pelo rápido resfriamento do material fundido não expelido após o fim do tempo de descarga e consequente colapso do canal de plasma, (KUMAR, 2009). A denominação “camada branca”, é utilizada porque nos aços ferramenta, o ataque com reagentes químicos para a visualização da microestrutura é mais difícil para essa camada. Como consequência das mudanças na estrutura e composição, ocorrem alterações nas propriedades mecânicas na superfície da peça, como dureza, resistência ao desgaste e corrosão. Principalmente em regimes de desbaste, muitos poros e microtrincas, que se estendem até o início da zona termicamente afetada, são formadas na camada branca, como pode ser observado na figura 14. Caso essa camada não seja reduzida ou removida por polimento, as trincas podem crescer através do material e causar a falha prematura da peça (KUMAR, 2009).

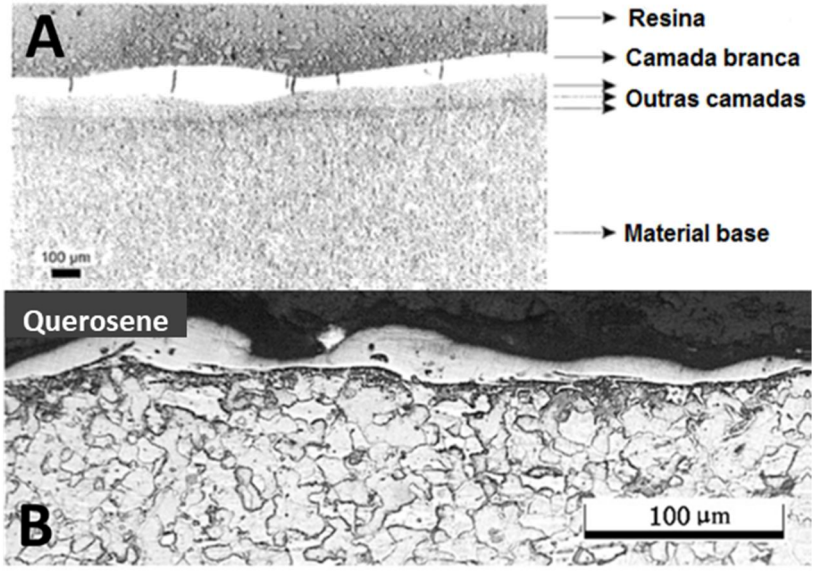


Figura 14. Camada resolidificada típica após a eletroerosão do aço. A: Detalhe para as trincas na camada branca. Adaptado de STEVENS (1998). B: Detalhe para os poros. Adaptado de ZHANG (2011).

Em função do resfriamento rápido a camada resolidificada é temperada, o que dá origem às fases martensita e austenita retida (EL-HOFY, 2005; STEVENS, 1998; LASCOE, 1988). Além disso, o dielétrico, que é um hidrocarboneto, tem suas moléculas quebradas durante a faísca (pirólise), sendo incorporado carbono na camada resolidificada na forma de fases como a cementita (Fe_3C) entre outros carbetos. A formação destas fases justifica o aumento da dureza na superfície da peça.

A zona termicamente afetada, está situada logo abaixo da camada resolidificada. A ZTA não é fundida, sendo o calor gerado durante o processo de EDM suficiente para mudar a sua estrutura. Segundo Stevens (1998), apesar de não haver contato direto com o dielétrico, ou com o eletrodo, a composição química na ZTA, também pode ser alterada através do mecanismo de difusão, evidenciado pelo o aumento na concentração de carbono.

Abaixo da ZTA, encontra-se o material base, que por sua vez não é afetado pelo processo de EDM, sendo mantidas a composição e estrutura originais do material.

3.2 TÉCNICAS PARA MELHORIA DA SUPERFÍCIE ATRAVÉS DA EDM

Segundo Kumar (2009), a modificação da superfície do material usinado através da eletroerosão pode se dar de três maneiras:

(a) através de eletrodos de materiais convencionais;
(b) eletrodos fabricados de pós compactados e
(c) utilização de pós em suspensão no dielétrico.

As modificações na superfície da peça trazem melhorias na qualidade da mesma evitando processos posteriores como revestimento, tratamento térmico e polimento. Consequentemente não é necessária a utilização de outras máquinas como também o reposicionamento da peça, reduzindo o tempo total de usinagem e custos (STEVENS, 1998).

A seguir, serão discutidos os métodos empregados para a melhoria da superfície através da utilização de eletrodos de pós compactados e da utilização de pós em suspensão no dielétrico.

3.2.1 Modificação através de eletrodos de pós compactados

Samuel e Philip (1997), compararam o desempenho de eletrodos compactados com eletrodos convencionais em condições normais de eletroerosão, ou seja, condições que não são favoráveis à modificação da superfície. Os eletrodos compactados se

mostraram mais sensíveis às mudanças na corrente e tempo de pulso e os seus impactos nos parâmetros de saída como taxa de remoção de material e desgaste do eletrodo, foram diferentes quando comparados com eletrodos convencionais. Este estudo estabeleceu que eletrodos compactados são tecnicamente viáveis para o processo de EDM e suas propriedades podem ser controladas através da compactação e parâmetros de sinterização. Um exemplo de melhoria nesse tipo de eletrodos pode ser verificado no trabalho de Li et al. (2001), onde níquel foi adicionado com o objetivo de melhorar a densificação. Ainda no trabalho de Samuel e Philip (1997), foi também encontrado que sob certas condições de operação, eletrodos compactados podem adicionar material ao invés de remover material.

Wang et al. (2002), utilizaram eletrodos compactados de titânio, na polaridade negativa, para eletroerodir aço carbono. Eles encontraram que para baixa corrente de descarga (2 – 10 A) e curta duração de pulso (2 – 12 μs) a concentração de carbeto de titânio na superfície atinge 51% e a dureza é aumentada mais de três vezes quando comparada com a do material base. Ele denominou o processo como revestimento por descargas elétricas *(electrical discharge coating – EDC)*, sugerindo a sua aplicação para reparo de superfície e aumento da resistência em ferramentas de corte e moldes.

Em outros trabalhos com eletrodos compactados de Ti, foi possível aumentar a vida de trabalho de moldes entre três e sete vezes (MORO et al., 2001). As propriedades tribológicas da superfície submetida à eletroerosão com eletrodos compactados também se mostram superiores como reportado por Kumar (2009), no seu trabalho de revisão. Ele cita que Shunmugam et al. (1994), conseguiram um aumento entre 25 e 60% na resistência ao desgaste abrasivo, quando utilizados eletrodos compactados de WC na usinagem de aço com baixo carbono.

A explicação para o aumento da dureza e da resistência ao desgaste na superfície dos materiais, é a criação de fases cerâmicas ou compostos intermetálicos durante o processo de EDM. Gangadhar et al. (1991) utilizaram eletrodos compactados de bronze (90% Cu – 10% Sn) na eletroerosão de aço com baixo carbono e encontraram, através da análise por difração de raios-X, que a fase mais presente na superfície era o composto Cu_3Sn. No trabalho de Shunmugam et al. (1994), foi constatada a

presença de carbeto de tungstênio, além de outras fases, na superfície do material usinado.

Com relação ao acabamento da superfície, é reportado que a quantidade de trincas é reduzida (SIMAO et al. 2002, MOHRI et al. 1993). Isso explica o aumento da vida útil dos componentes usinado com eletrodos compactados, pois como foi visto no início do capítulo, as trincas presentes na camada branca podem crescer através do material base e causar falha por fadiga. No trabalho de Simao et al. (2002), foi utilizado eletrodo compactado de WC/Co para a eletroerosão do aço AISI H13. A espessura média da camada obtida foi de 30 μm, e a dureza da superfície atingiu 1319 HK.

Estudos comparativos para determinação do efeito da polaridade e do meio dielétrico durante o processo também foram realizados. Utilizando eletrodo compactado (70% Fe e 30% WC) na usinagem de aço com baixo teor de carbono, Pantelis et al. (1998) encontraram zonas com alto teor de tungstênio na camada branca quando o eletrodo foi usado na polaridade negativa. É de conhecimento geral que, para um melhor resultado no acabamento de superfície na peça, deve ser utilizado o eletrodo-ferramenta na polaridade negativa. A explicação para esse comportamento será tratada no capítulo seguinte.

Bai & Koo (2006), compararam o efeito entre o uso de água destilada e querosene como fluido dielétrico no processo de EDM de um aço superliga conhecido como Haynes 230. O eletrodo utilizado foi de Al-Mo e o tempo de usinagem foi de seis minutos. Com água destilada foi possível obter maiores valores de dureza, enquanto o querosene mostrou melhores resultados no acabamento da superfície, espessura da camada e menor taxa de oxidação. Foi concluído que, com relação aos efeitos na modificação da superfície, o querosene é melhor do que a água destilada como fluido dielétrico.

3.2.2 Modificação através da adição de pó no meio dielétrico

As vantagens da PMEDM sobre a EDM abrangem o desempenho do processo, como taxa de remoção e estabilidade das descargas elétricas, a qualidade da superfície eletroerodida e as suas propriedades mecânicas. A fim de compreender a influência

das novas variáveis inseridas ao processo (concentração de pó, tamanho de partículas, forma das partículas, etc.) além das variáveis habituais da EDM, estudo tem sido realizados desde então (KANSAL et al. 2007).

No capítulo seguinte a PMEDM será tratada de forma mais profunda, onde serão abordados os seguintes temas: influência no processo e superfície, modificações necessárias no equipamento, parâmetros e resultados das pesquisas desenvolvidas.

4 ELETROEROSÃO COM ADIÇÃO DE PÓ EM SUSPENSÃO NO DIELÉTRICO

Serão discutidos neste capítulo as características da PMEDM. Será abordado: sua influência sobre o processo e a superfície usinada, modificações necessárias ao equipamento para sua implementação, pesquisas desenvolvidas com enfoque na camada formada e aplicação tecnológica.

4.1 INFLUÊNCIA DA PMEDM

Várias pesquisas (LUO (1997); ZHAO et al. (2002); TZENG & LEE (2001); JESWANI (1981)), têm observado o comportamento da adição de diferentes tipos de pó no fluido de trabalho com o objetivo de analisar como as partículas presentes na fenda de trabalho afetam a ocorrência da descarga. Consequentemente, o processo é afetado como também a superfície da peça usinada, temas das discussões a seguir.

4.1.1 No processo

Um processo estável, tanto de EDM quanto de PMEDM, depende da uniformidade na distribuição das descargas elétricas, que por sua vez, depende principalmente da concentração e distribuição das partículas no meio dielétrico. Esse efeito foi confirmado por Luo et al. (1997), que observaram como as partículas presentes na fenda de trabalho influenciam na movimentação das descargas elétricas na superfície da peça, figura 15.

No caso da PMEDM, as partículas de pó presentes na fenda de trabalho são energizadas e se movimentam em zigue-zague, figura 16. Estas partículas carregadas são aceleradas pelo campo elétrico e atuam como condutores, afetando a quebra da rigidez do dielétrico e a distância entre peça e ferramenta é aumentada. Isso ocorre em função do efeito ponte ou "*bridge effect*", nome dado em função do arranjo das partículas em forma de corrente que interliga os eletrodos (KANSAL et al. 2007).

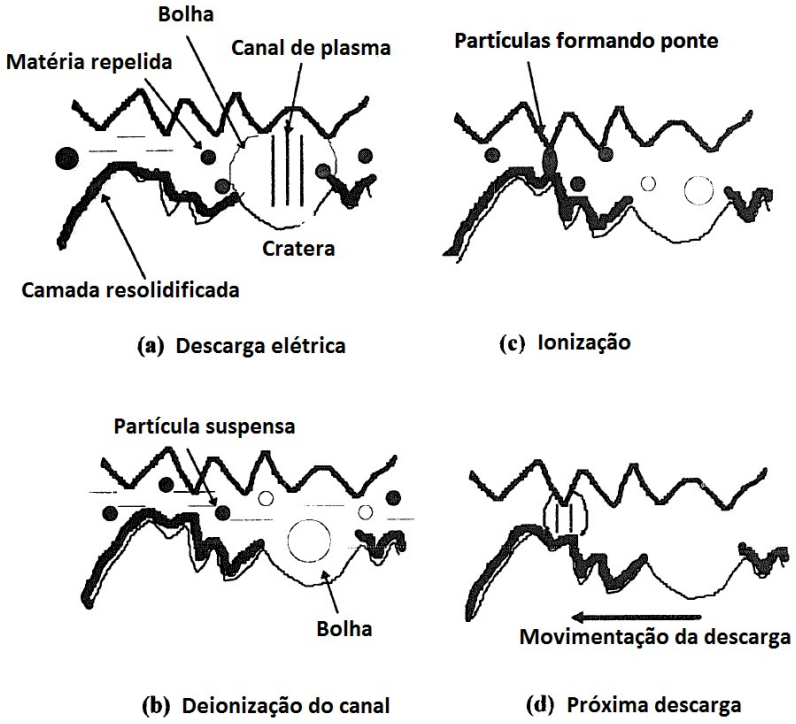


Figura 15. Influência das partículas no processo de EDM. LUO (1997).

Por outro lado, a presença de muitas partículas pode causar curto circuitos e comprometer o processo. Por isso, o aumento gerado na distância entre a ferramenta e a peça é fundamental.

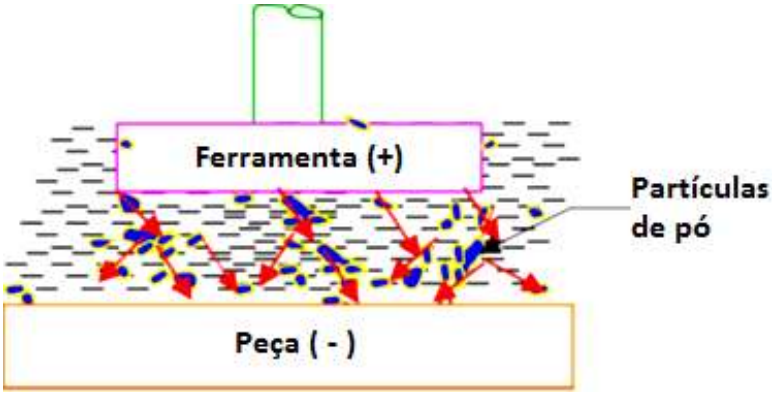


Figura 16. Princípio do processo de PMEDM. KANSAL (2007).

Como resultado do aumento e uniformidade das descargas elétricas, a eficiência do processo é melhorada, sendo refletida na taxa de remoção, desgaste relativo e rugosidade da peça.

4.1.2 Na peça usinada

O fenômeno de modificação da superfície eletroerodida através da PMEDM consiste, em termos gerais, na deposição do elemento suspenso no dielétrico sobre a camada resolidificada, e ocorre em duas etapas. Na primeira etapa, as partículas do pó se aderem à superfície na região em que houve a descarga elétrica. A segunda etapa, ocorre quando a mesma região é atingida por uma outra descarga elétrica, consequentemente, o elemento até então apenas aderido, se funde à superfície. Segundo Stevens (1998), o fenômeno de deposição do elemento químico ocorre somente após o fim da duração da descarga, pois durante a sua ocorrência o canal de plasma mantém afastado o pó da poça fundida na peça. A figura 17A ilustra esse fenômeno, cuja ocorrência está relacionada ao comportamento de expansão do canal de plasma, figura 17B.

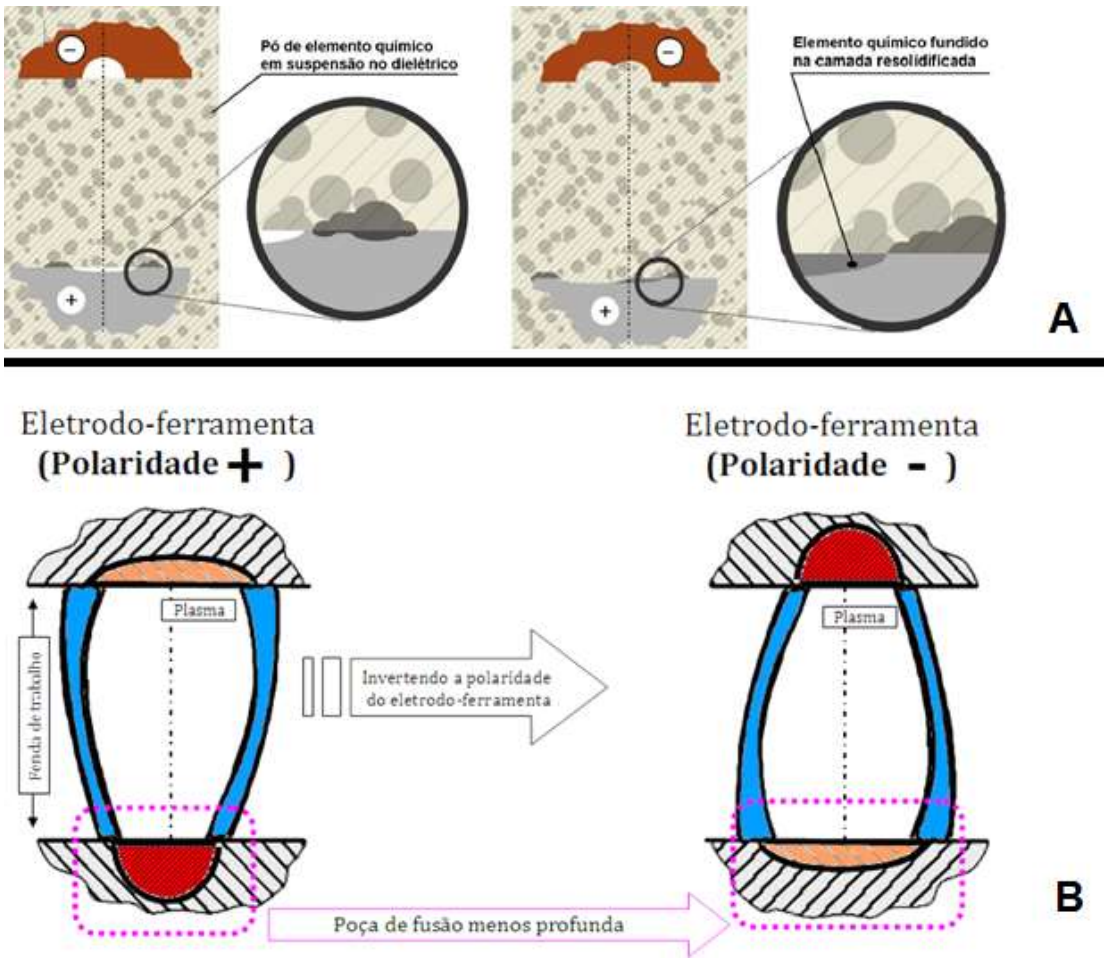


Figura 17. Mecanismo da deposição de elementos químicos durante a PMEDM. Adaptado de DALCIN (2011) e MOLINETTI (2010).

Como pode ser observado na figura 17B, a polaridade do eletrodo e da peça influenciam na expansão do canal de plasma, sendo esta, refletida na profundidade e largura da poça de fusão. Isso justifica a inversão das polaridades para que haja o tratamento durante a PMEDM com relação à configuração usual da EDM, ou seja, o eletrodo é negativamente carregado (catodo) e a peça a ser usinada positivamente carregada (anodo). Sabe-se, a partir dos conhecimentos que envolvem o princípio do fenômeno da EDM, que ao início da fase de descarga, o anodo é primeiramente atingido devido à menor massa dos elétrons com relação aos íons positivos. Como consequência o anodo é fundido antes do catodo, no entanto, com o passar do tempo a poça de fusão possui uma maior profundidade no catodo, em função da maior massa dos íons positivos e consequente transformação da sua energia cinética em calor. A ejeção de material neste polo torna-se mais violenta e uma pequena parte apenas do elemento seria aderido ao material base, no caso de ser utilizada a configuração usual de polaridade. Por outro lado, após a interrupção da descarga e colapso do canal de plasma, as forças fluidodinâmicas de expulsão da poça fundida no anodo (peça) são menores, devido à menor densidade de energia causada pela grande expansão do canal de plasma nesta região. Sendo assim, as partículas podem aderir com maior facilidade à superfície da peça durante a sua solidificação. Quando uma nova descarga atinge essa região, as partículas aderidas se fundem na superfície. A sucessão desses eventos forma ao final do processo, uma camada resolidificada com diferente composição química, quando comparada ao material base. Isso implica na mudança das propriedades mecânicas e tribológicas da camada formada, dando à PMEDM características de um processo de tratamento de superfície.

4.2 MODIFICAÇÃO DO EQUIPAMENTO

No processo de PMEDM algumas alterações no equipamento são necessárias como a introdução de uma cuba com o objetivo de manter as partículas em suspensão e não permitir que os mesmos entrem no sistema de filtragem da máquina, gerando assim desperdício. Também é necessário um sistema de agitação para que as partículas não decantem e fiquem depositadas no fundo da cuba. Um exemplo esquemático do equipamento necessário para o processo de PMEDM é mostrado na figura 18.

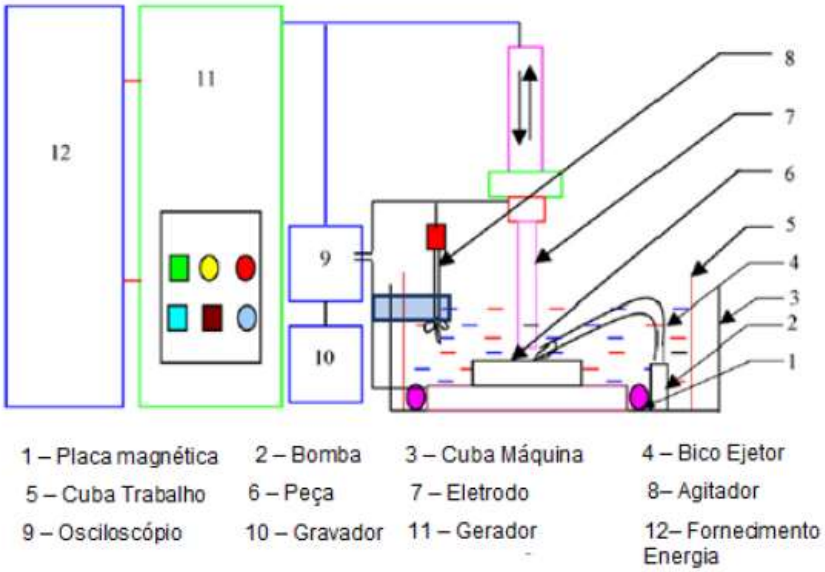


Figura 18. Representação esquemática do equipamento para PMEDM. Adaptado de KANSAL (2007).

4.3 PARÂMETROS DO PROCESSO

Além dos parâmetros convencionais utilizados na usinagem por eletroerosão como por exemplo, tempo de descarga, corrente de descarga, tensão em aberto, outras variáveis são introduzidas no processo, influenciando diretamente o seu desempenho. Entre estes parâmetros estão o tamanho da partícula e a concentração de pó no dielétrico.

Os parâmetros mais influentes na PMEDM são a concentração de pó, a corrente de descarga e duração de pulso. Utilizando o método Taguchi, Kansal et al. (2006), determinaram que a concentração de pó representa 84,01% na contribuição total do processo, enquanto a corrente de descarga representa 8,84% e a duração de pulso 4,2%.

4.4 INVESTIGAÇÕES EXPERIMENTAIS NA PMEDM

Atualmente, mais do que apenas um processo para obtenção de uma superfície com excelente acabamento, a PMEDM tem sido abordada como uma opção no tratamento de superfície, inclusive em casos em que o componente não passaria necessariamente pelo processo de EDM. Este interesse se deve principalmente ao aumento da dureza no material usinado, resultado da combinação entre o elemento

do pó utilizado e o carbono que surge da quebra do fluido dielétrico que é um hidrocarboneto, formando assim carbetos na superfície.

Vários tipos de elementos já foram testados na forma de pó, entre eles estão: níquel, cobalto, ferro, alumínio, cromo, cobre, titânio, grafita, silício e molibdênio, com tamanho de grão que varia entre 1 e 100 µm. Furutani (2001) utilizando pó de titânio suspenso em querosene como dielétrico, obteve uma camada de carbeto de titânio com dureza de 1600 HV, muito acima da esperada para um aço AISI-1049. Aliado ao aumento de dureza, o bom acabamento da superfície, que pode ser entendido como a geração de uma camada ausente de poros ou trincas, evita que as imperfeições da chamada “camada branca” se traduzam em crescimento de trincas em peças solicitadas mecanicamente. Como consequência direta da redução substancial de micro trincas, a resistência à corrosão do material também é aumentada (KUMAR, 2009).

Kansal (2007), cita em seu artigo de revisão sobre a PMEDM que a resistência ao desgaste da superfície também é melhorada. Okada (2000), eletroerodiu uma amostra de aço AISI H13 com eletrodo de titânio e pó de grafite no dielétrico, obtendo uma camada de carbeto de titânio com resistência ao desgaste aproximadamente três vezes maior do que a do material base.

A revisão a seguir, cita os trabalhos desenvolvidos com os pós de silício e molibdênio por Molinetti (2010) e Dalcin (2011), respectivamente, ambos desenvolvidos no Laboratório de Pesquisa em Usinagem (LAUS) da PUC-PR.

No trabalho de Dalcin (2011), foi possível obter uma camada no aço AISI H13 com espessura de 5,0 µm utilizando pó de molibdênio numa concentração de 3 g/l e corrente de descarga de 1 A. Na figura 19 é possível observar a uniformidade da camada com relação à espessura e a ausência de poros e trincas.

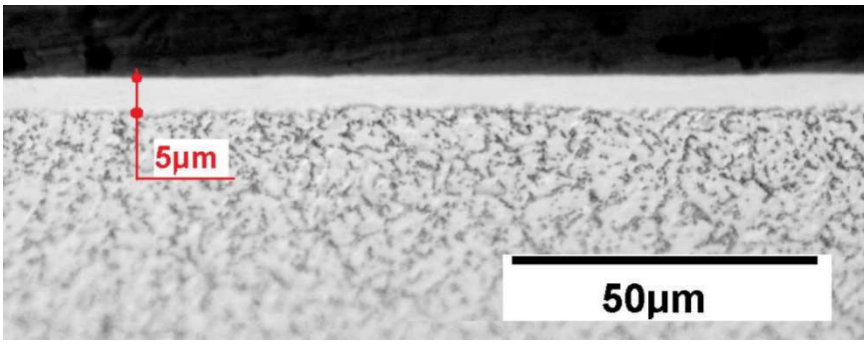


Figura 19. Corpo de prova eletroerodido com pó de molibdênio. DALCIN (2011).

O molibdênio, comumente aplicado como elemento de liga, seja em solução sólida ou como diferentes carbetos, também traz significativas melhorias à superfície do material usinado relacionadas à dureza e à resistência ao desgaste e corrosão.

A figura 20 mostra as principais variáveis dos melhores resultados obtidos no trabalho de Dalcin (2011). Foi sugerido para trabalhos futuros a variação do tempo de descarga (t_e), visto que este foi o mesmo para todos os ensaios, no valor de 12,8 µs. Também foi sugerido a verificação das propriedades tribológicas da camada formada e reduzir o tempo do processo. Essas sugestões são levadas em consideração no trabalho aqui proposto.

		AM 09	AM 05	AM 10	AM 11
Tamanho de partícula de Mo:	[µm]	< 15	< 15	< 15	< 15
Concentração de pó aditivo:	[g/l]	3,0	3,0	3,0	3,0
Vazão do fluido na cubeta:	[m³/h]	~ 2,1	~ 2,1	~ 2,1	~ 2,1
Corrente de descarga (i_e):	[A]	1	1	1	1
Tempo de usinagem (M_t):	[h]	02:00	04:00	04:00	07:00
Espessura da camada modificada:	[µm]	5	5	5	5
Houve aumento do teor de Mo na camada resolidificada?		SIM	SIM	SIM	SIM
Teor mínimo de Mo na camada:	[%]	2,8	1,7	3,3	2,0
Teor máximo de Mo na camada:	[%]	14,5	8,3	18,5	13,6
Dureza média na camada	[GPa]	12,0	13,3	14,4	12,3
Fases cristalinas formadas		FeC Fe_2C Fe_3C Fe-Mo	FeC Fe_2C Fe_3C Fe-Mo MoC	FeC Fe_2C MoC Mo_xC	FeC Fe_2C Fe_3C Mo MoC

Nota: AM – Amostra

Figura 20. Parâmetros e resultados obtidos na eletroerosão do aço AISI H13 adicionando pó de molibdênio no dielétrico. DALCIN (2011).

Molinetti (2010) utilizou pó de silício e manganês adicionado ao dielétrico na eletroerosão do aço AISI H13 e obteve bons resultados, especialmente com o silício, na qualidade da superfície, aumento da dureza e redução da rugosidade. Uma das vantagens do uso de silício é a sua baixa massa específica (2,33 g/cm³), o que favorece a permanência em suspensão do pó no dielétrico.

Os principais parâmetros utilizados no melhor resultado obtido com o pó de silício foram: corrente de descarga de 2 A, concentração de 5 g/l, tempo de descarga de 6,4 µs e polaridade negativa do eletrodo-ferramenta. A espessura máxima da camada obtida foi de 7 µm e como pode-se observar na figura 21, não houve a formação de trincas e poros.

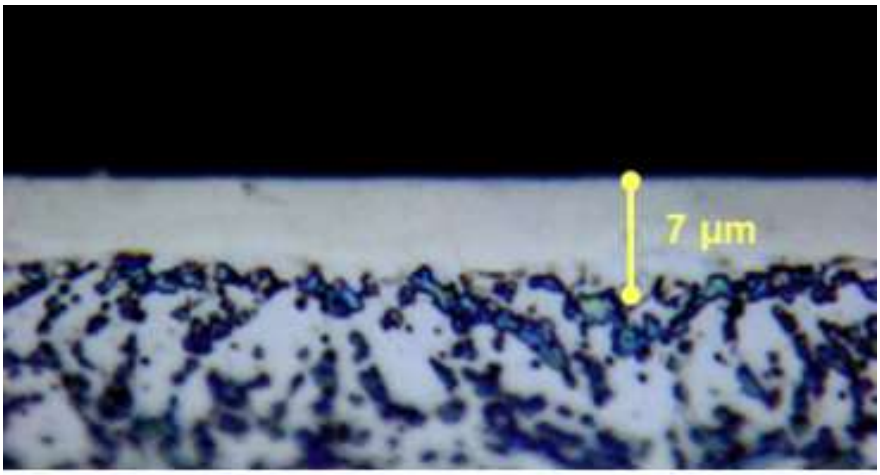


Figura 21. Camada formada utilizando pó de silício. MOLINETTI (2010).

Foi sugerido para trabalhos futuros, a redução da concentração de pó e da corrente de descarga, como também a avalição tribológica da camada formada, sugestões estas, também levadas em consideração no presente trabalho.

4.5 APLICAÇÕES TECNOLÓGICAS DA PMEDM

Na maioria dos trabalhos, os testes são realizados em corpos de prova planos, o que não corresponde à possibilidade da PMEDM ser aplicada como tratamento de superfície em peças com geometria complexa ou tamanho reduzido. Vale lembrar que a EDM tem grande vantagem sobre outros processos na usinagem de superfícies

complexas, sendo a PMEDM uma interessante alternativa de tratamento de superfície, evitando que a peça seja submetida a um novo processo.

Chow (2000) estudou a adição de pó no querosene durante a usinagem de micro fendas em uma liga de titânio através da eletroerosão. Os pós utilizados foram carbeto de silício e alumínio, o eletrodo de cobre possuía uma espessura de 0,1 mm. Apesar do estudo ter como objetivo a avaliação da influência dos pós no processo em si, pode-se observar pelas imagens da figura 22 a melhoria significativa no acabamento da superfície.

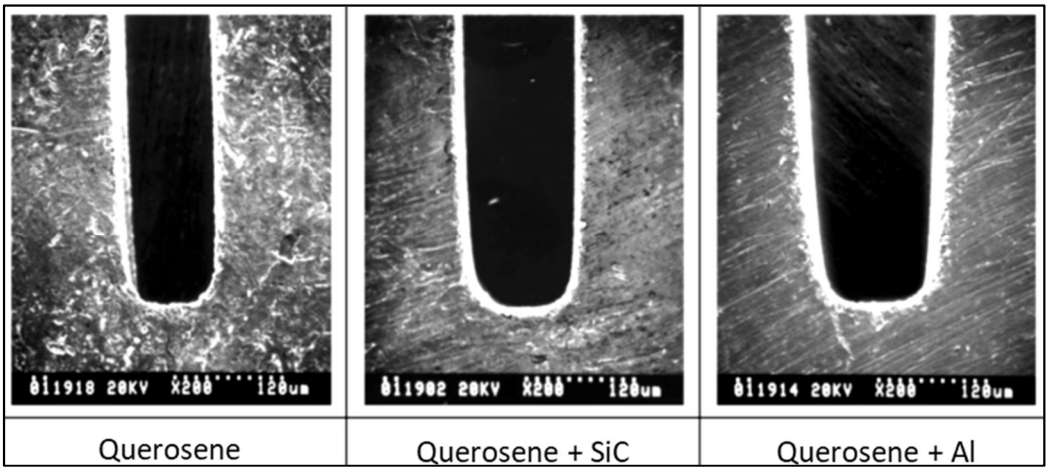


Figura 22. Imagens obtidas por microscopia eletrônica de varredura das micro fendas eletroerodidas em diferentes condições de dielétrico. Adaptado de CHOW (2000).

Estes resultados são importantes para mostrar a capacidade de se obter uma camada uniforme mesmo em usinagens de microcomponentes, área crescente dentro da mecânica atualmente, tema este ressaltado por Kansal (2007), citando a PMEDM como um aliado altamente promissor.

5 METODOLOGIA EXPERIMENTAL

Este capítulo trata da metodologia experimental, apresentando os materiais e equipamentos utilizados e como foram conduzidos os experimentos.

O fluxograma apresentado na figura 23 mostra a metodologia experimental adotada para a execução e análise dos ensaios e resultados da pesquisa.

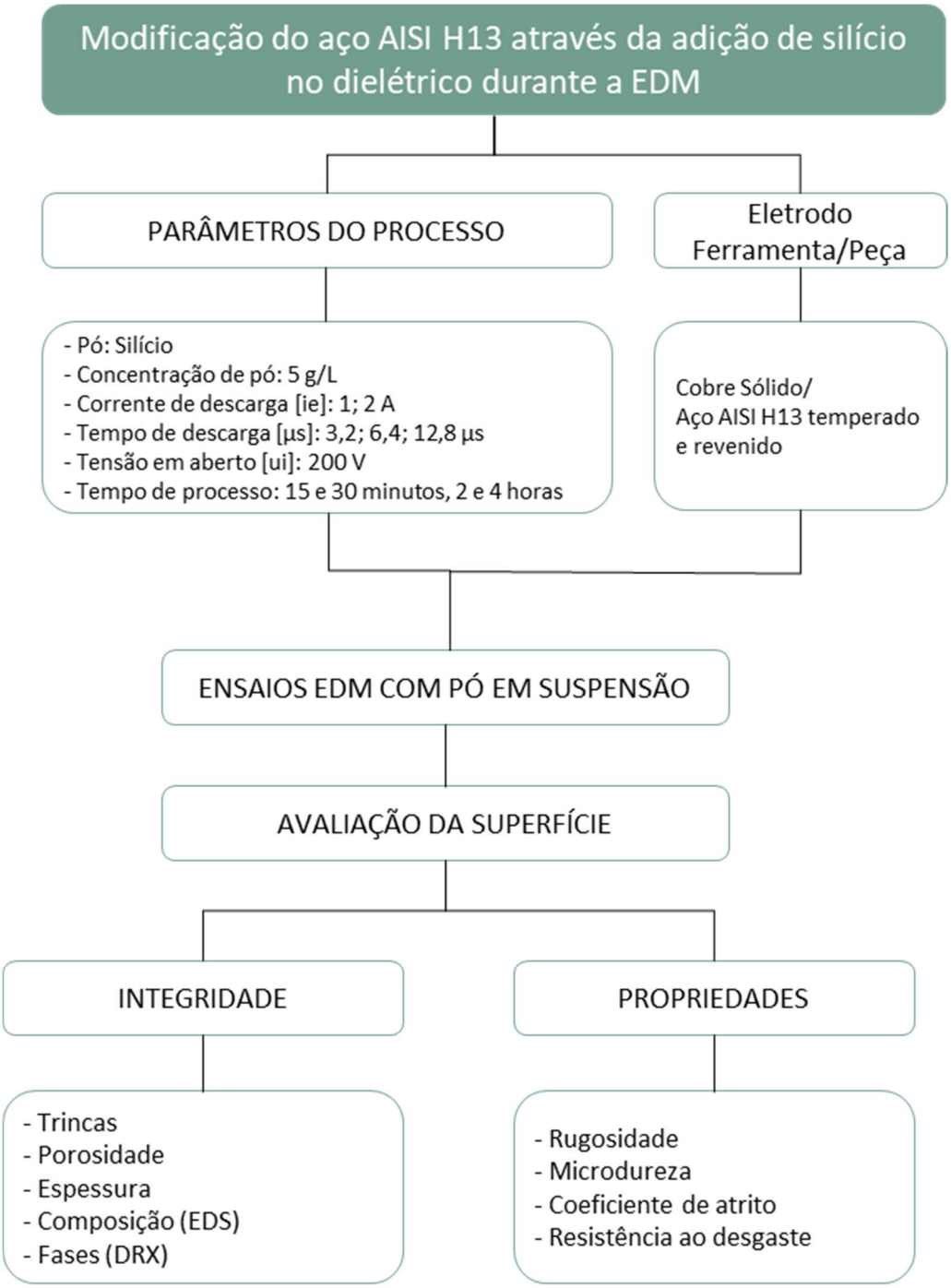


Figura 23. Fluxograma da sequência experimental da pesquisa.

A ferramenta utilizada foi o cobre eletrolítico em função da sua larga utilização industrial, tendo um diâmetro de 20 mm.

A peça foi confeccionada em aço-ferramenta AISI H13 temperado e revenido, devido à sua ampla aplicação industrial em componentes que em sua maioria passam pelo processo de EDM, principalmente em regimes de acabamento. O corpo de prova possuía largura e comprimento de 42 mm, e espessura de 15 mm.

A capacidade da cuba utilizada é de 9 litros, figura 24, e age como um sistema isolado do sistema bomba-filtro da máquina de EDM, pois caso contrário as partículas ficariam retidas no filtro. Para promover a movimentação do pó, evitando que este decante na cuba, uma bomba foi instalada sendo colocados na sua saída dois tubos flexíveis segmentados, dispostos de modo a criar um movimento espiral no fluido dielétrico. Para evitar o aquecimento do fluido acima do limite de segurança, que é de 40 °C, foi adaptado um inversor de frequência para controlar a vazão substituindo o regulador mecânico, que segundo Dalcin (2011), seria a causa para o superaquecimento do dielétrico. A capacidade máxima de vazão é de 3,0 m³/h, sendo 2 m³/h suficientes para a manutenção do pó em suspensão.

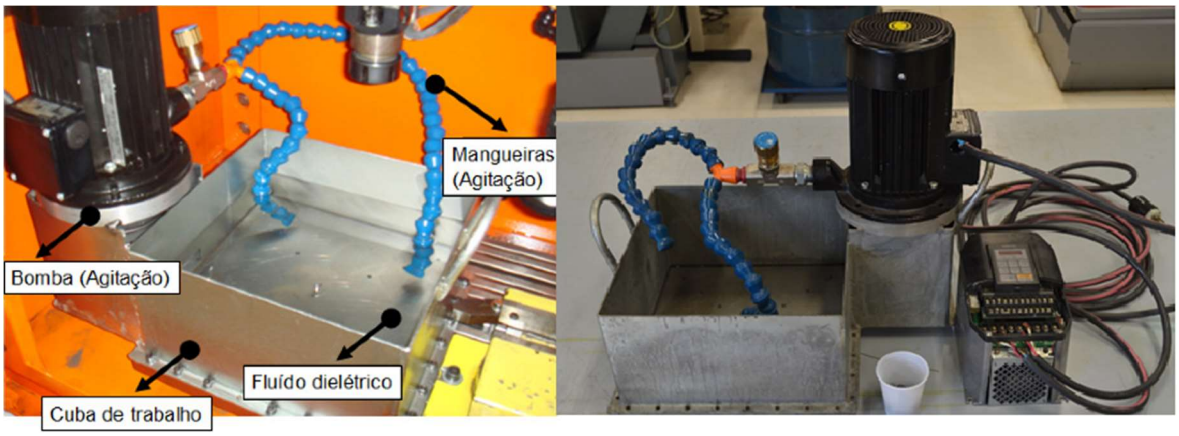


Figura 24. Direita: cuba a ser utilizada durante os experimentos. Esquerda: cuba adaptada ao equipamento de EDM.

Os parâmetros foram definidos de acordo com os melhores resultados obtidos no trabalho de Molinetti (2010). Com a finalidade de avaliar o efeito da duração do tempo de descarga na formação da camada durante o processo de PMEDM, foram realizados ensaios utilizando tempos correspondentes à metade e ao dobro do valor

aplicado no trabalho anterior. Foram avaliados também a influência do tempo total do processo e o efeito da utilização de uma corrente menor, durante o processo.
A tabela 1 apresenta os parâmetros utilizado nos ensaios.

Tabela 1. Parâmetros utilizados nos experimentos.

Tamanho de partícula: < 5 µm; Rotação do eletrodo: 20 rpm; Polaridade do eletrodo: negativa					
Nº Ensaio	i_e [A]	t_e [µs]	u_i [V]	Concentração de pó [g/l]	Tempo de processo
1 a 4	1	3,2	200	5	15, 30 min. 2, 4 horas
5 a 8		6,4			
9 a 12		12,8			
13 a 16	2	3,2	200	5	15, 30 min. 2, 4 horas
17 a 20		6,4			
21 a 24		12,8			

Com relação à corrente, foi inserido um nível mais baixo do que os 2 A aplicados no trabalho de Molinetti (2010), em função do bom resultado encontrado nos testes utilizando molibdênio como pó em suspensão e uma corrente de 1 A.

A tensão em aberto também foi de 200 V, e a concentração de pó foi de 5 g/l, não sendo variada para o não comprometimento do tempo previsto para os ensaios, apesar do interesse em avaliar-se o efeito de concentrações menores por causa das vantagens já explicadas. Foram empregados quatro tempos de processo, 15 minutos, 30 minutos, 2 horas e 4 horas. Outros parâmetros utilizados, inerentes ao processo de eletroerosão e PMEDM, são abordados a seguir.

- Tempo de avanço e retração do eletrodo-ferramenta

No período de avanço (U) ocorre a sucessão de ciclos de descarga, esse tempo no trabalho será de 0,8 s. Conforme a cavidade aumenta, a presença do pó em suspensão deixa de ser uniforme na fenda de trabalho sendo necessário o tempo de retração (R) para a sua reorganização. No período R não ocorrem descargas elétricas, figura 25.

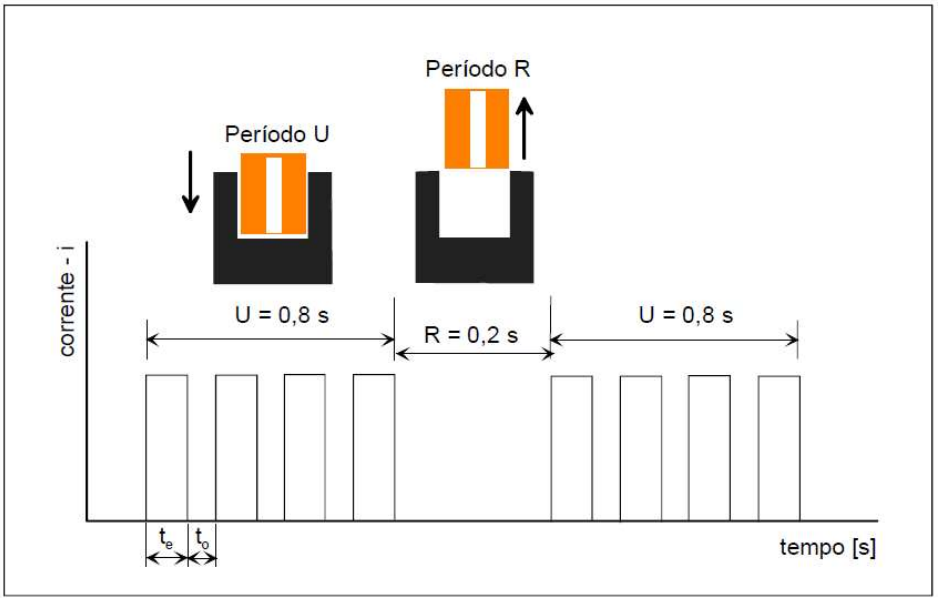


Figura 25. Representação dos períodos de avanço U e retração R durante o processo de EDM. AMORIM (2002).

- Rotação do eletrodo

A rotação do eletrodo tem por objetivo, garantir uma melhor uniformidade na concentração de pó na fenda de trabalho. O valor utilizado será o mesmo que para as pesquisas anteriores: 20 rpm.

- Tamanho de partícula

O tamanho da partícula do pó de silício disponível para a pesquisa é de 5 µm, dentro da faixa recomendada para um eficiente processo de PMEDM.

- Polaridade do eletrodo-ferramenta

A polaridade utilizada no eletrodo será negativa (catodo), pois conforme discutido anteriormente, essa configuração promove melhores resultados na formação de uma camada resolidificada na superfície da peça (anodo), com adição efetiva do pó utilizado em suspensão no dielétrico, bem como um melhor acabamento da peça.

Após os ensaios experimentais, foram realizadas as caracterizações da camada formada sob dois aspectos:

Avaliação da integridade da superfície**:** inclui a observação da camada através do microscópio óptico, verificando se houve ou não a formação de poros e trincas e a sua espessura. Análise através do microscópio eletrônico de varredura para identificar a composição química da camada formada. Análise de difração de raios-X, para identificação das fases formadas na camada resolidificada.

Avaliação de propriedades mecânicas da superfície: neste aspecto estão inseridas as análises de rugosidade Ra, microdureza vickers, resistência ao desgaste e coeficiente de atrito.

A seguir é apresentada, de forma detalhada, a metodologia aplicada para cada análise após os ensaios.

- *Microscopia óptica*

Foi utilizada a técnica de microscopia óptica com o objetivo de avaliar as camadas produzidas pela eletroerosão com pó de silício na superfície do aço AISI H13, observando principalmente seu aspecto quanto à presença de poros e trincas.

A preparação das amostras seguiu as etapas de lixamento, polimento e ataque químico para revelação da microestrutura. As lixas utilizadas eram de carbeto de silício com granulometrias de 200, 320, 500, 800, 1200 e 2400. Para o polimento foi utilizado pasta de diamante de 0,25 µm e nos casos de amostras com uma quantidade maior de riscos foi realizado o polimento com alumina em suspensão de 1 µm como etapa prévia. O ataque foi realizado com Nital 2%, imergindo a amostra de 30 a 40 segundos, na solução. O microscópio utilizado foi da marca Olympus, modelo BX60.

- *Espessura*

A medição da espessura das camadas foi realizada com o auxílio do software ImageJ, a partir das imagens obtidas na microscopia óptica. Foram tomadas várias medidas ao longo da camada, sendo então calculada a média da espessura em função da quantidade total de medidas realizadas.

- *Rugosidade Ra*

A rugosidade das amostras foi medida no laboratório de metrologia da PUCPR. O equipamento utilizado foi o Taylor Hobson, modelo Form Talysurf Series 2, equipado com o software THP FTSS v.6.30. Foi medida a rugosidade Ra, em um curso total de 7,5 mm e cut-off de 2,5 mm.

- *Microdureza Vickers*

A microdureza das camadas produzidas foi medida no laboratório de tribologia da PUCPR. Foi utilizado um microdurômetro da Shimadzu modelo HMV 2T. A análise consistiu na aplicação de diversas cargas (25, 50, 100, 200, 300, 500, 1000 e 2000 gramas), sobre a superfície da amostra, assim, foi possível obter a dureza do sistema de revestimento, que consiste neste caso, na camada resolidificada mais o substrato do material.

A obtenção da microdureza vickers, consiste na medição das diagonais produzidas pela indentação, as quais, pela geometria do indentador, nos permite calcular a profundidade de penetração do mesmo. Obtida a profundidade da indentação, era calculada então a profundidade relativa de penetração (t/x), onde t é a profundidade de indentação e x a espessura da camada.

- *Microscopia Eletrônica de Varredura e Espectroscopia de Energia Dispersiva*

A microscopia eletrônica de varredura (MEV), foi realizada no equipamento da marca TESCAN, modelo Vega3. A espectroscopia de energia dispersiva (EDS – Energy Dispersive X-ray spectroscopy), foi realizada no mesmo equipamento. A análise foi feita em quatro pontos da amostra, partindo da superfície e indo em direção ao material base. Os elementos presentes na determinada região foram identificados, e quantificados na unidade de porcentagem em peso (%Wt).

- *Difração de Raios-X (DRX)*

Foi utilizado o equipamento da Shimadzu, modelo XRD-7000. A técnica utilizada foi a de filmes finos, com um ângulo de incidência de 10º, sendo a amostra analisada entre a região correspondente de 35° a 100º, numa taxa de 1° por minuto. A fonte era de CuKα, nas condições de 40 kV e 20 mA.

- *Tribologia*

Nos ensaios tribológicos, realizados para obtenção do coeficiente de atrito e a taxa de desgaste das amostras, foi utilizado o método de deslizamento recíproco linear, baseado na norma ASTM G133-05 (2010). Os ensaios foram realizados no Laboratório de Tribologia da PUC-PR, no CSM *Tribometer*. Como contra corpo foi utilizada uma esfera de Al_2O_3 de 6 mm de diâmetro, e a carga normal aplicada foi de 10 N. A amplitude para cada ciclo foi de 3 mm, sendo adotada a distância total de 10 metros para o ensaio. A velocidade linear máxima aplicada foi de 1 cm/s. Para obtenção da taxa de desgaste foi utilizado um perfilômetro da Taylor Hobson modelo Surtronic 25. O ensaio foi realizado sem lubrificante. Na figura 26 é apresentado esquematicamente o aparato experimental para o ensaio.

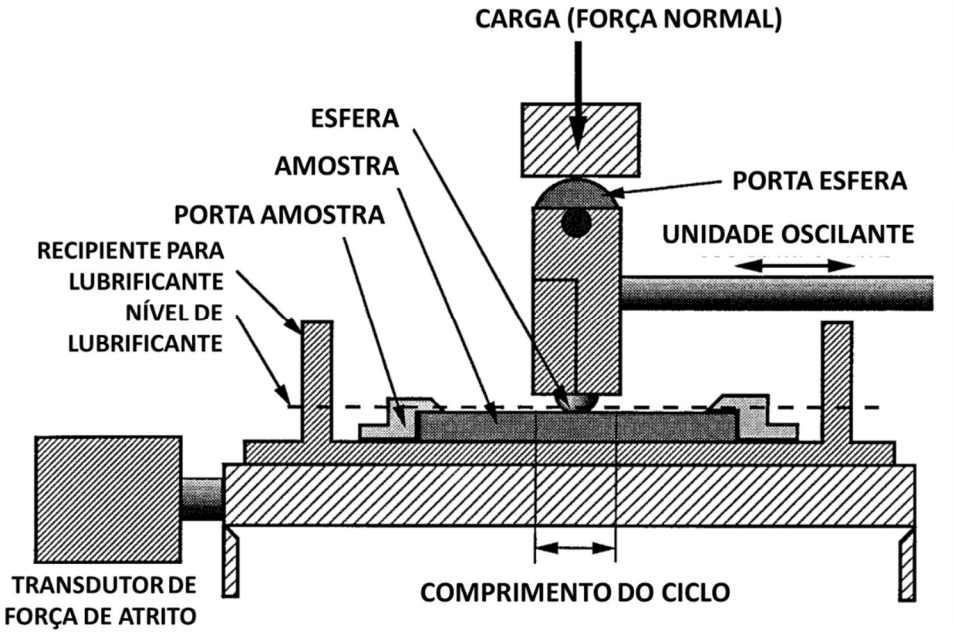


Figura 26. Representação esquemática da disposição dos componentes para o ensaio tribológico utilizando o método de deslizamento recíproco linear. Adaptado da ASTM G133-05 (2010).

6 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo são apresentados os resultados obtidos a partir dos ensaios realizados de eletroerosão com pó de silício em suspensão no dielétrico.

6.1 MICROSCOPIA ÓPTICA

A figura 27, mostra os resultados obtidos para as condições de processo de 1 A e 3,2 µs.

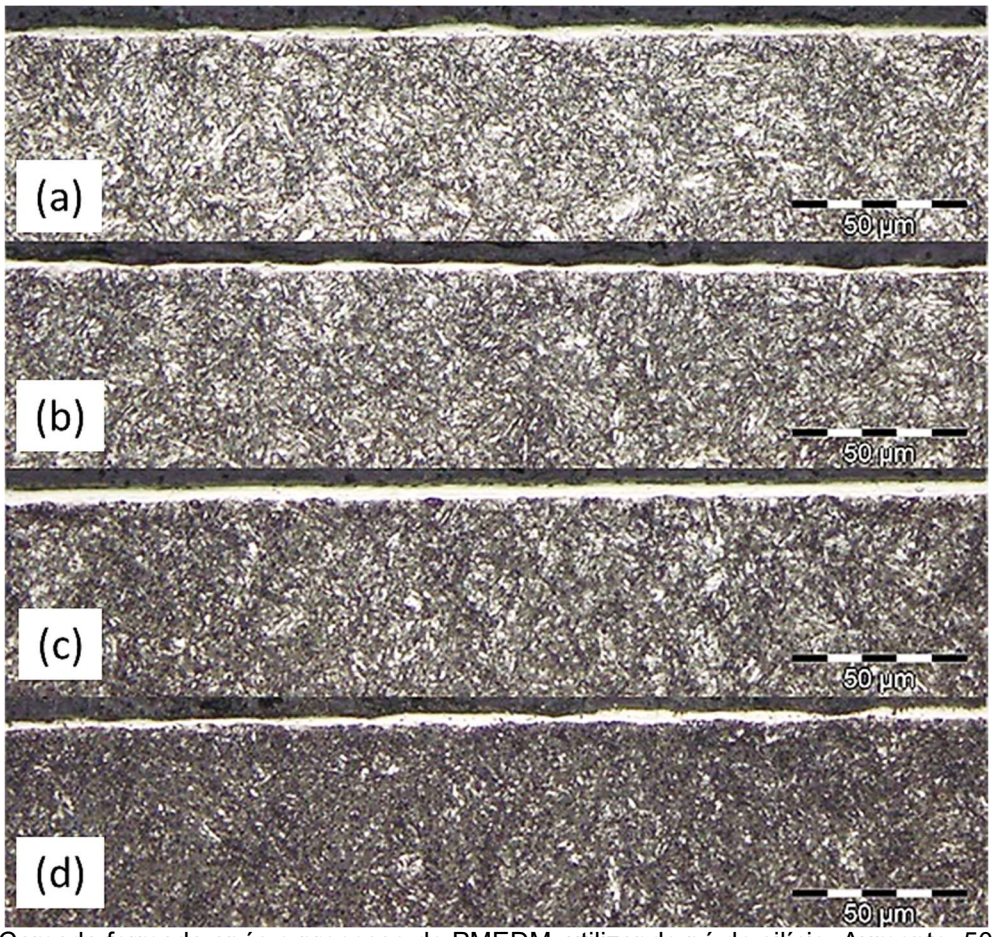


Figura 27. Camada formada após o processo de PMEDM, utilizando pó de silício. Aumento: 500x. Corrente elétrica: 1 A, tempo de descarga: 3,2 µs. Tempo de processo: (a) 15 minutos, (b) 30 minutos, (c) 2 horas e (d) 4 horas.

Pode se observar que as camadas produzidas não possuem significativa variabilidade em função do tempo de processo. Verifica-se também que as camadas não apresentam uma regularidade de espessura, exceto pela camada produzida com 2 horas (c). No entanto como espera-se a formação de camadas regulares em todos os

tempos de processo, pode-se considerar o resultado para esta série insatisfatório. Além disso, a presença de poros e trincas pode ser observada quando aplicado um maior aumento na microscopia óptica como mostra a figura 28, onde foi realizado um aumento de 2500x da camada.

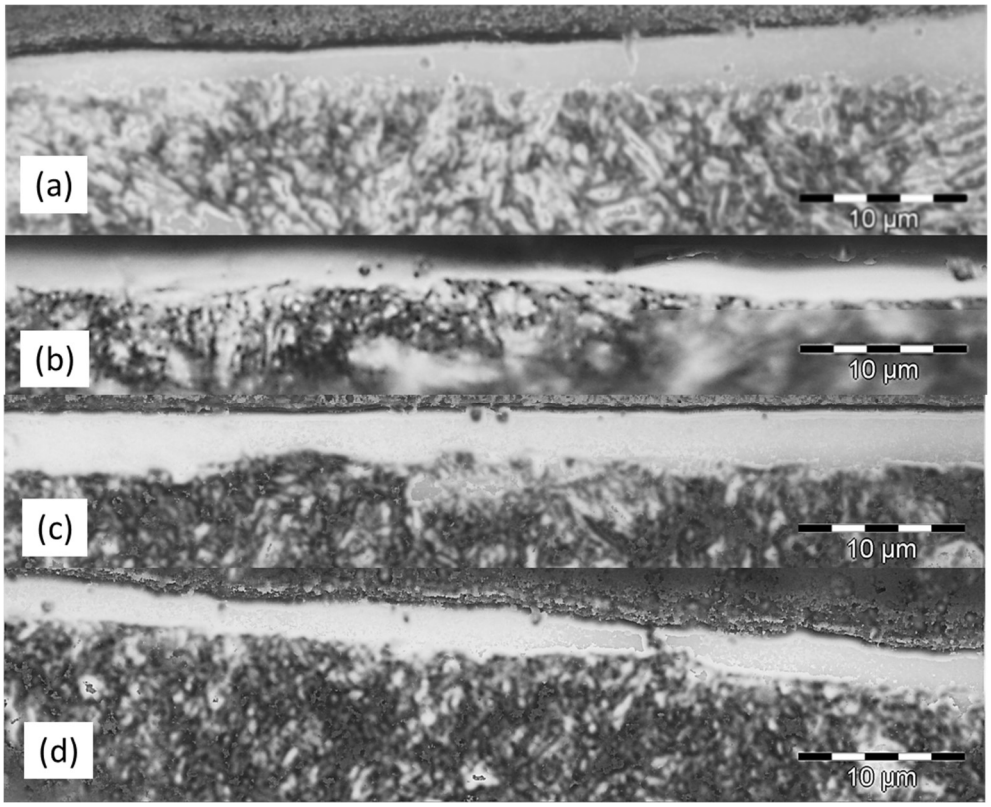


Figura 28. Camada formada após o processo de PMEDM, utilizando pó de silício. Aumento: 2500x. Corrente elétrica: 1 A, tempo de descarga: 3,2 µs. Tempo de processo: (a) 15 minutos, (b) 30 minutos, (c) 2 horas e (d) 4 horas.

Na série apresentada pela figura 29, pode se verificar que a camada produzida em 15 minutos de processo apresentou espessura irregular, enquanto que a camada com 2 horas de processo apresentou trincas e também irregularidade na espessura. A camada formada com tempo de processo de 30 minutos apresentou um bom acabamento, porém o objetivo era obter o mesmo nível de acabamento em todos os tempos da série.

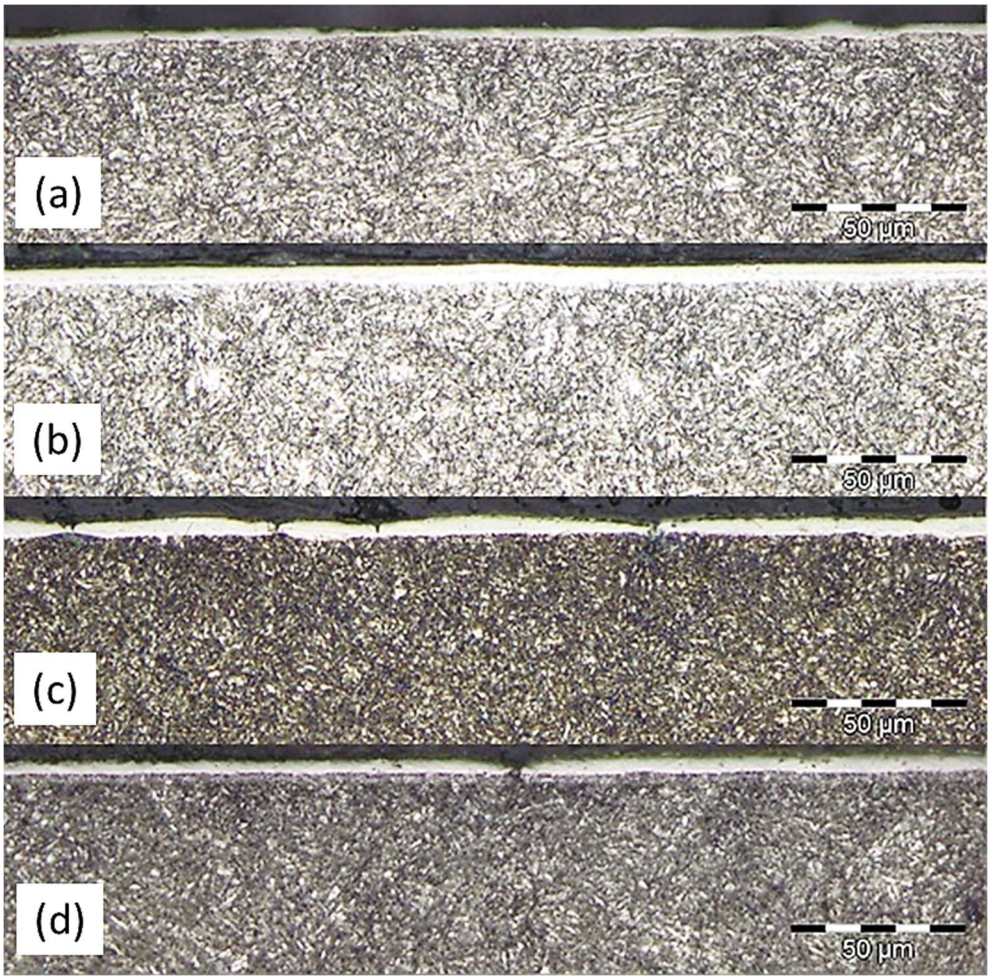


Figura 29. Camada formada após o processo de PMEDM, utilizando pó de silício. Aumento: 500x. Corrente elétrica: 1 A, tempo de descarga: 6,4 µs. Tempo de processo: (a) 15 minutos, (b) 30 minutos, (c) 2 horas e (d) 4 horas.

Foi também realizada para essa série, uma análise da camada com aumento de 2500x, como mostra a figura 30.

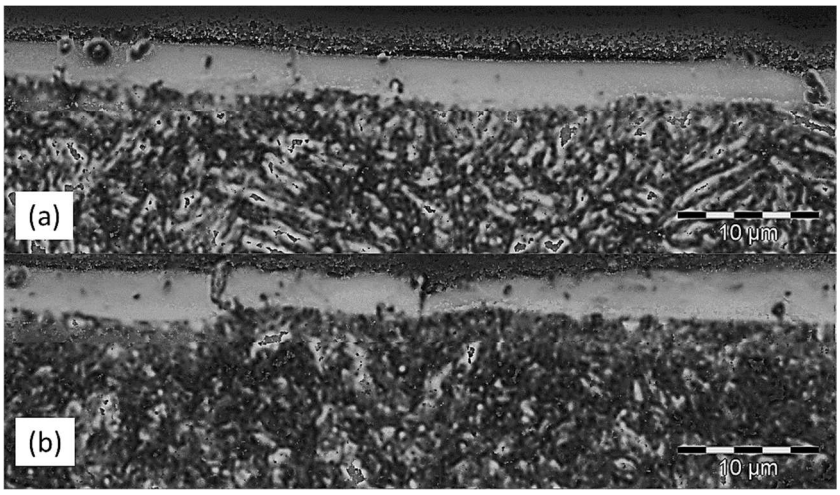


Figura 30. Camada formada após o processo de PMEDM, utilizando pó de silício. Aumento: 2500x. Corrente elétrica: 1 A, tempo de descarga: 6,4 µs. Tempo de processo: (a) 15 minutos e (b) 4 horas.

Pode-se observar para o tempo de 15 minutos, que além da irregularidade na espessura, houve também a formação de poros na camada. Quando aplicado o tempo de 4 horas de processo, verificou-se que a camada apresenta poros e trincas.

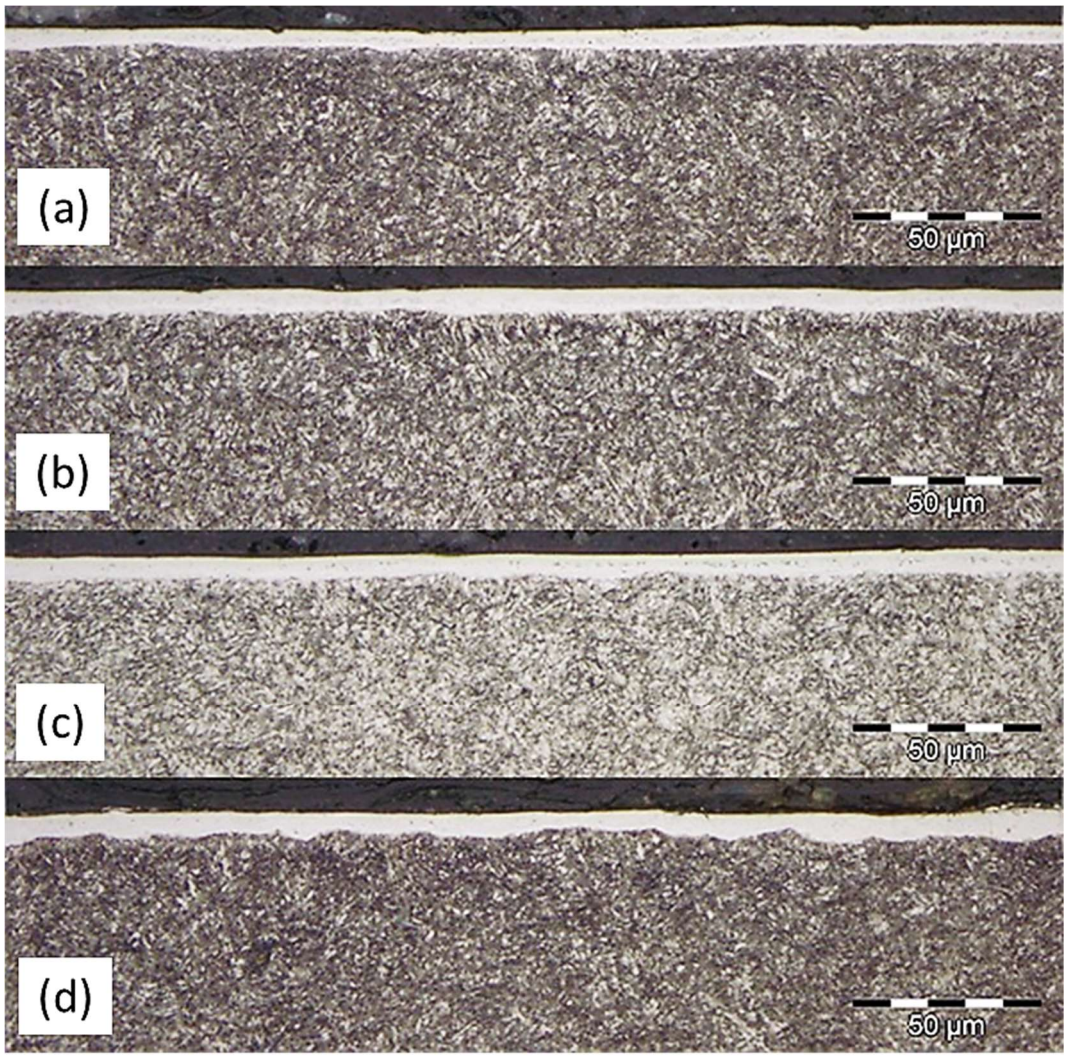


Figura 31. Camada formada após o processo de PMEDM, utilizando pó de silício. Aumento: 500x. Corrente elétrica: 1 A, tempo de descarga: 12,8 µs. Tempo de processo: (a) 15 minutos, (b) 30 minutos, (c) 2 horas e (d) 4 horas.

A série utilizando como corrente 1 A e tempo de descarga de 12,8 µs, como pode ser observado na figura 31, apresentou de modo geral, camadas de superfície regular, sem trincas aparentes. Na camada produzida em 15 minutos de processo pode se observar algumas falhas na superfície, porém não se caracterizam como trincas, e não são observadas na demais camadas. Na camada produzida em 4 horas é encontrada a maior variação de espessura.

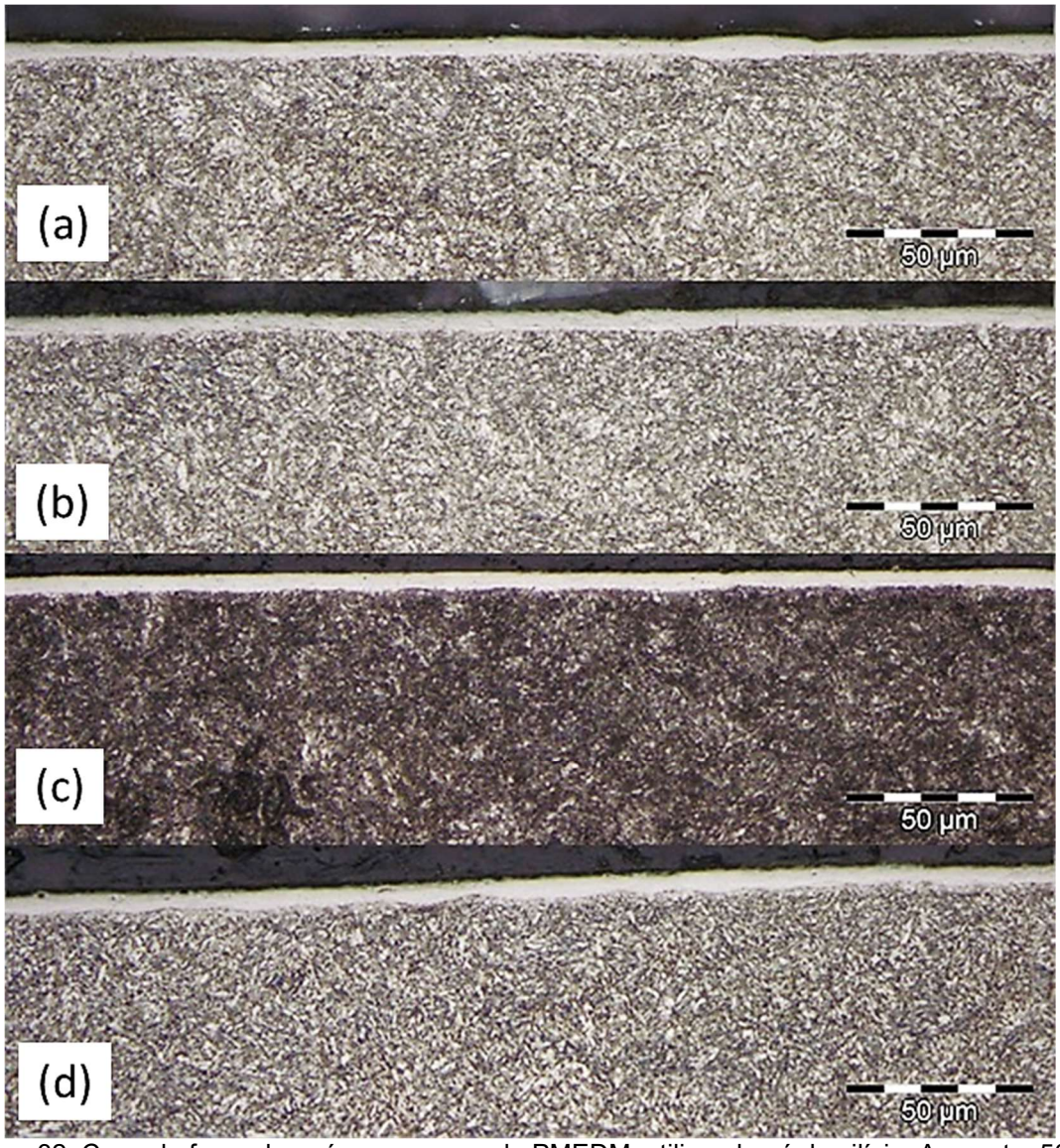


Figura 32. Camada formada após o processo de PMEDM, utilizando pó de silício. Aumento: 500x. Corrente elétrica: 2 A, tempo de descarga: 3,2 µs. Tempo de processo: (a) 15 minutos, (b) 30 minutos, (c) 2 horas e (d) 4 horas.

A figura 32 mostra as camadas produzidas com corrente de 2 A e tempo de descarga de 3,2 µs. Pode se observar que as camadas entre si, nas suas características como espessura e acabamento são próximas, mostrando que para essas condições o processo tem a capacidade de produzir camadas regulares independente do tempo de eletroerosão.

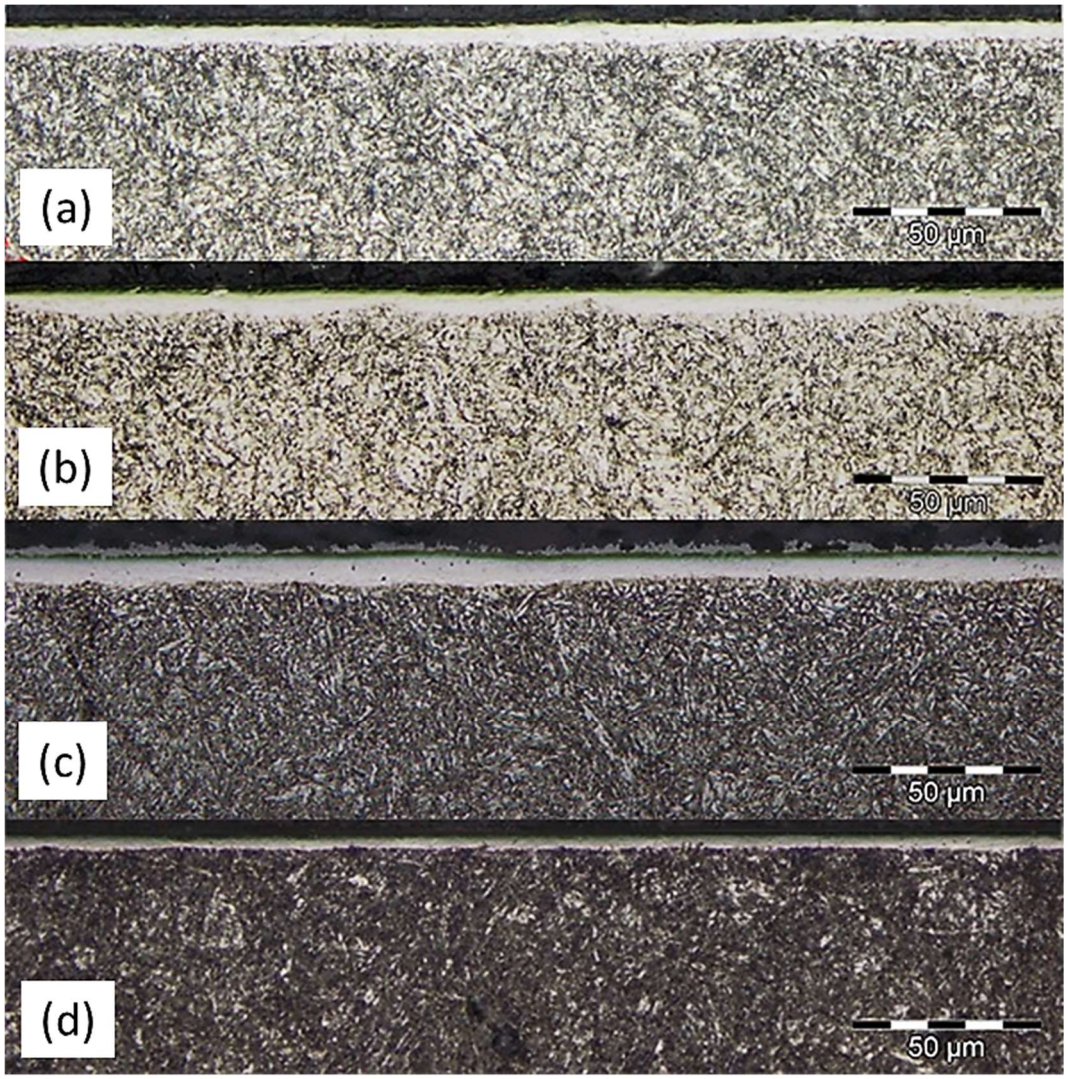


Figura 33. Camada formada após o processo de PMEDM, utilizando pó de silício. Aumento: 500x. Corrente elétrica: 2 A, tempo de descarga: 6,4 µs. Tempo de processo: (a) 15 minutos, (b) 30 minutos, (c) 2 horas e (d) 4 horas.

Nos tempos de 15 minutos, 30 minutos e 2 horas de processo, as camadas produzidas na série com corrente de 2 A e 6,4 µs de tempo de descarga, apresentaram uma espessura próxima, como mostra a figura 33. Para o tempo de 4 horas a camada apresentou uma espessura significativamente menor. Com relação ao acabamento, pode se observar a presença de alguns poros nas camadas produzidas em 2 e 4 horas, sendo, no entanto, inobservada a presença de trincas em todas as camadas. Pode se observar também a regularidade das camadas formadas, mostrando que os parâmetros aplicados à série em questão possuem a capacidade de produzir uma superfície com bom acabamento, em diferentes tempos de processo.

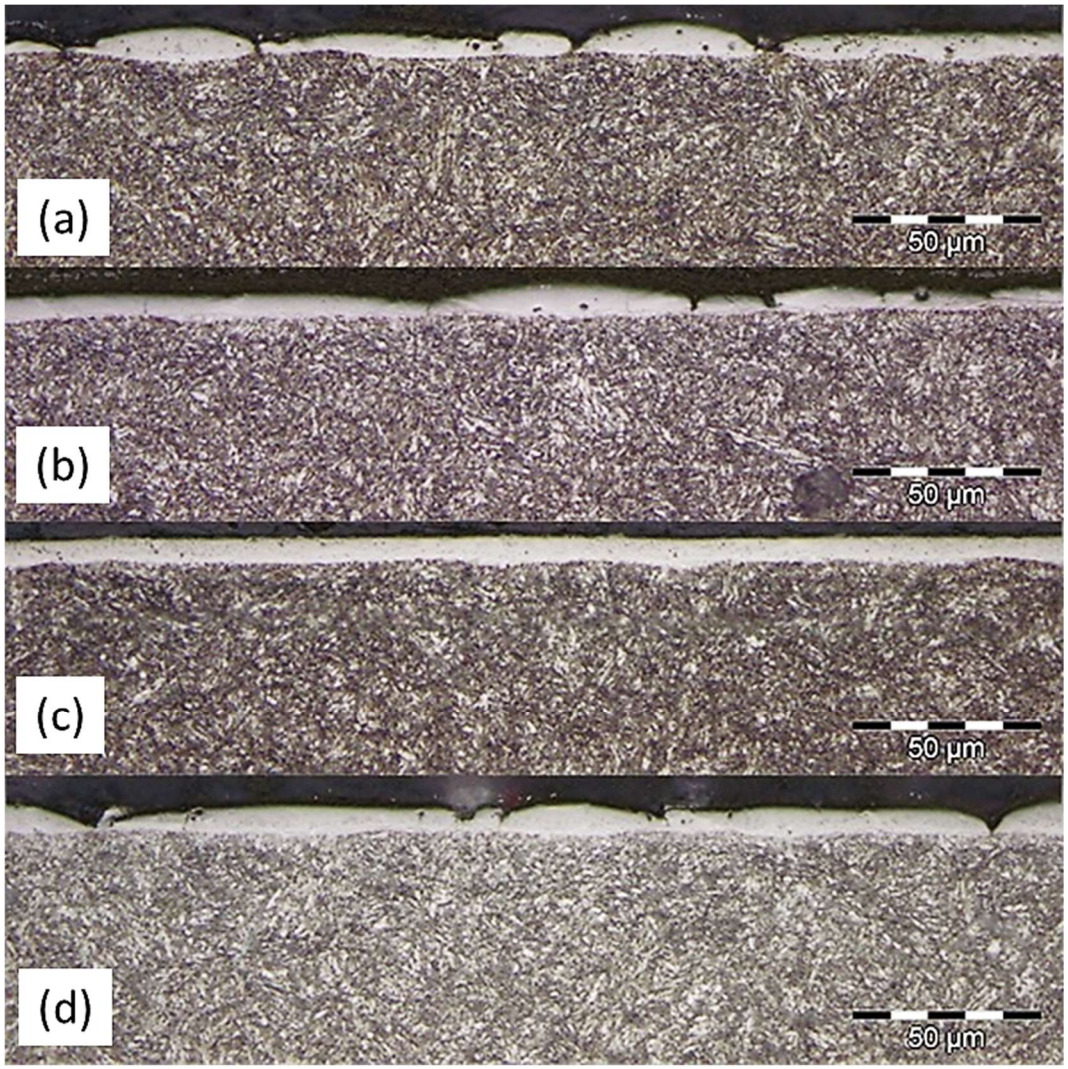


Figura 34. Camada formada após o processo de PMEDM, utilizando pó de silício. Aumento: 500x. Corrente elétrica: 2 A, tempo de descarga: 12,8 µs. Tempo de processo: (a) 15 minutos, (b) 30 minutos, (c) 2 horas e (d) 4 horas.

A figura 34, mostra as camadas formadas utilizado durante o processo de eletroerosão os parâmetros de 2 A de corrente e 12,8 µs de tempo de descarga. Pode se observar que as camadas produzidas nos tempos de 15 minutos, 30 minutos e 4 horas ficaram totalmente irregulares, apresentando porosidade e trincas. Somente a camada produzida no tempo de 2 horas apresentou regularidade, no entanto o objetivo do trabalho é a produção de camadas com bom acabamento independente do tempo de processo. Sendo assim, a série obtida com os parâmetros apresentados não será analisada nas posteriores caracterizações.

6.2 ESPESSURA

Na figura 35 pode ser observada a variação da espessura em função do tempo de processo e do tempo de descarga da faísca para os ensaios realizados com corrente de 1 A. Conforme o aumento do tempo de descarga, verifica-se que há uma tendência do aumento da espessura. Por outro lado, conforme o aumento do tempo de processo, é observado um comportamento aleatório.

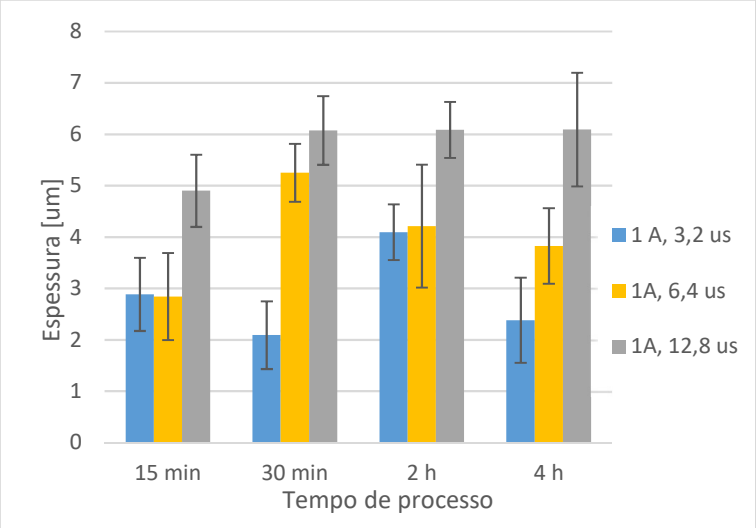


Figura 35. Espessura das camadas formadas utilizando corrente de 1 A.

Na figura 36, é apresentado os resultados de espessura das camadas, aplicando ao processo a corrente de descarga de 2 A. Comparando com os resultados obtidos com a corrente de 1 A, observa-se que as camadas produzidas com 2 A, para um mesmo tempo de descarga e um mesmo tempo de processo possuem uma maior espessura.

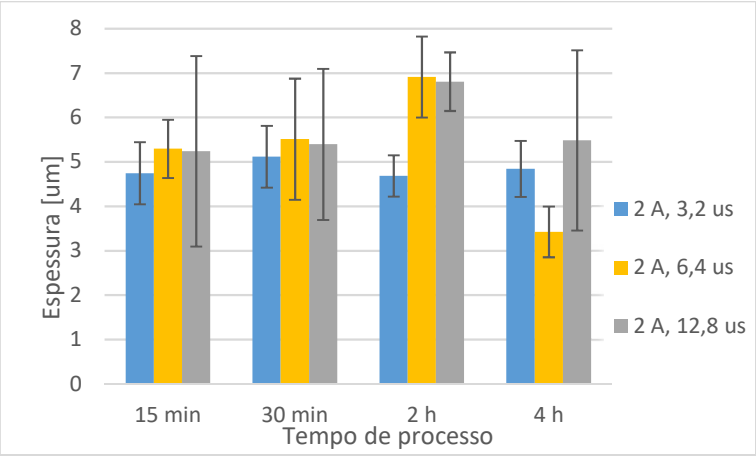


Figura 36. Espessura das camadas formadas utilizando corrente de 2 A.

6.3 RUGOSIDADE

Na figura 37, é apresentado os resultados para a rugosidade quando utilizado no processo a corrente de 1 A. Comparada com a rugosidade da amostra retificada, observa-se que a rugosidade apresentada nas amostras eletroerodidas durante o tempo de 15 minutos é superior, independentemente do tempo de descarga. Ao aplicar-se o processo por 30 minutos, observa-se uma tendência de diminuição da rugosidade para todos os tempos de descarga, sendo que para o tempo de 6,4 µs ela se iguala à da amostra retificada. Quando o tempo de 2 horas de processo é utilizado, a rugosidade das amostras diminui ainda mais, ficando no mesmo nível para a amostra retificada. No caso da amostra eletroerodida com tempo de descarga de 3,2 µs, a rugosidade fica abaixo do aço AISI H13 retificado. Ao aplicar-se o tempo de 4 horas de processo, a rugosidade das amostras eletroerodidas com os tempos de descarga de 3,2 e 12,8 µs, aumentam significativamente, ficando acima da rugosidade da amostra retificada. No entanto, a amostra eletroerodida com o tempo de descarga de 6,4 µs, mantém aproximadamente o mesmo nível de rugosidade quando aplicado o tempo de 2 horas de processo.

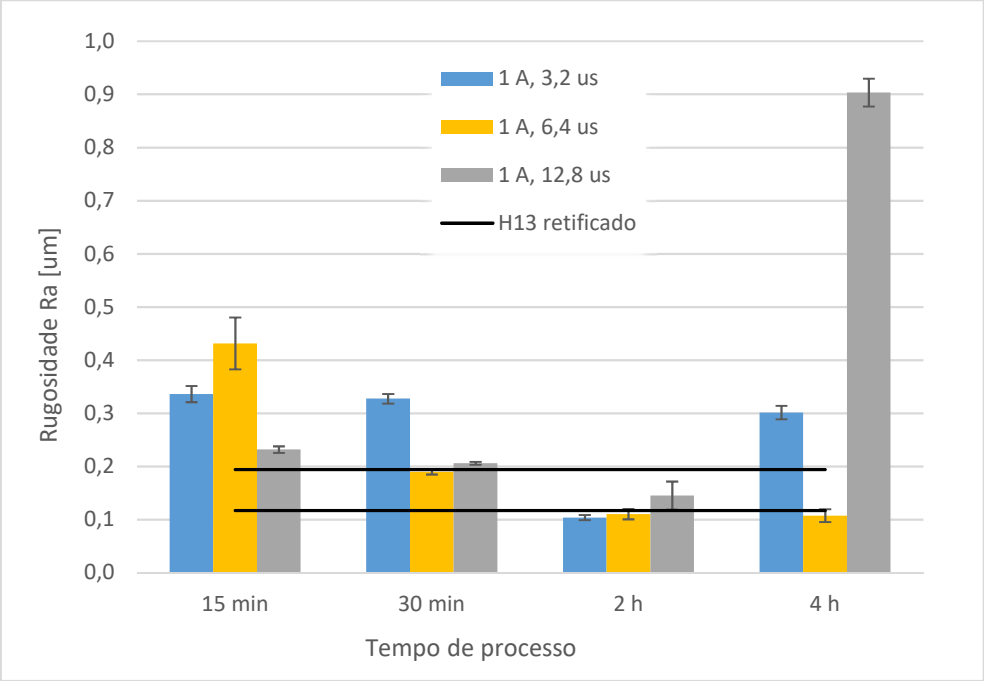


Figura 37. Rugosidade da superfície eletroerodida com corrente de 1 A.

Os resultados apresentados na figura 38, mostram a rugosidade obtida nos ensaios realizados com corrente de descarga de 2 A. Observa-se que, exceto por uma

amostra, a rugosidade ficou, em todos casos, acima da apresentada pelo aço AISI H13 retificado. Comparativamente aos resultados obtidos nos ensaios utilizando 1 A de corrente, não há como estabelecer uma tendência, ou comportamento da rugosidade.

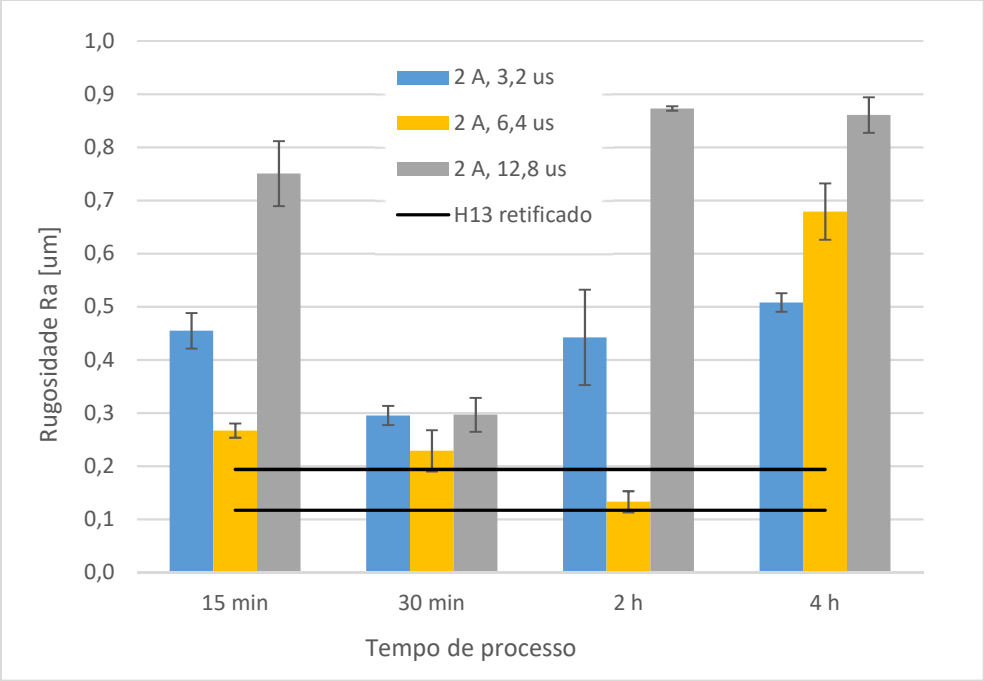


Figura 38. Rugosidade da superfície eletroerodida com corrente de 2 A.

6.4 MICRODUREZA VICKERS

- *Resultados das camadas eletroerodidas durante 4 horas.*

Nesta primeira análise o objetivo foi avaliar o comportamento da microdureza de todas as amostras eletroerodidas no tempo de 4 horas, por ser considerado importante conhecer o comportamento para esta propriedade, mesmo para as amostras descartadas nas demais caracterizações.

A figura 39, apresenta a microdureza obtida nas amostras eletroerodidas com a corrente de descarga de 1 A. Como pode ser observado o comportamento da microdureza é muito próximo, independentemente do tempo de descarga aplicado.

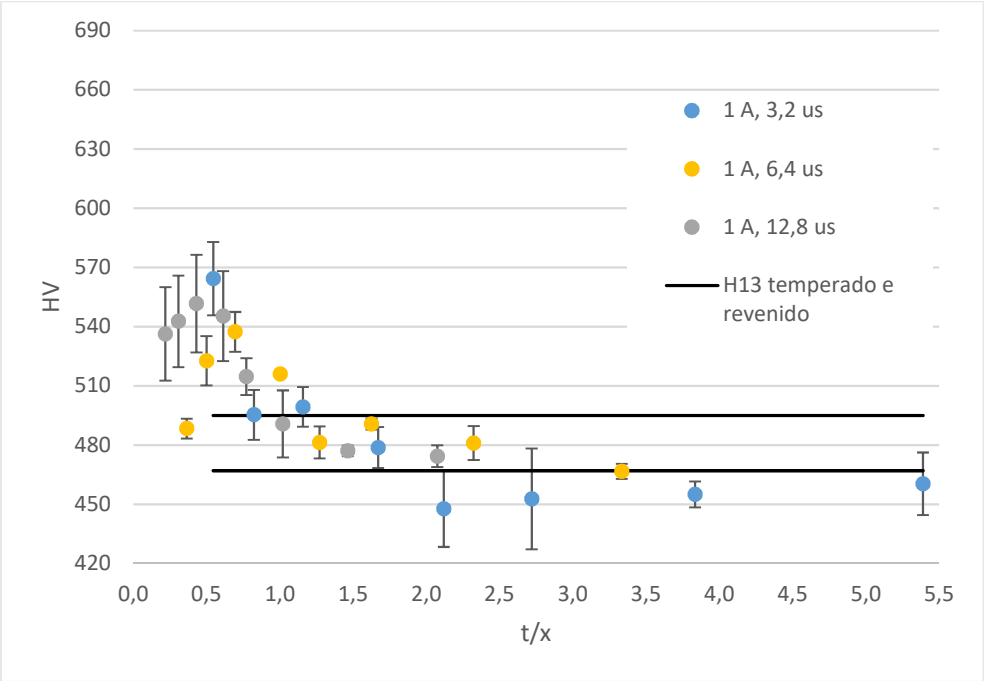


Figura 39. Microdureza das camadas formadas. Tempo de processo: 4 horas, corrente: 1 A. t: profundidade, x: espessura da camada.

Pode-se observar também que para o tempo de descarga de 3,2 µs, o resultado ficou abaixo do limite inferior de microdureza obtida para o aço AISI H13 temperado e revenido. Isso pode ocorrer caso a camada apresente um comportamento frágil, o que foi constatado através da observação pela lente ocular do equipamento, onde podiam ser vistas fissuras nas bordas da indentação, como exemplifica a figura 40.

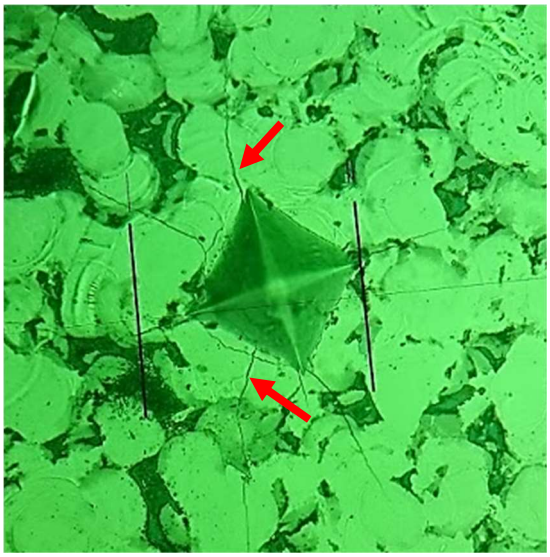


Figura 40. Fotografia realizada através da lente ocular do microdurômetro mostrando a indentação e trincas geradas na camada, setas em vermelho. Linhas pretas paralelas são para medição da distância entre as bordas da indentação.

Quando aplicada a corrente de 2 A, observa-se um aumento significativo da dureza, provavelmente em função da alteração, ou criação de fases na camada resolidificada, para todos os tempos de descarga, como pode ser observado na figura 41. Neste caso, nenhum resultado se mostrou abaixo do limite inferior de microdureza encontrada para o material base.

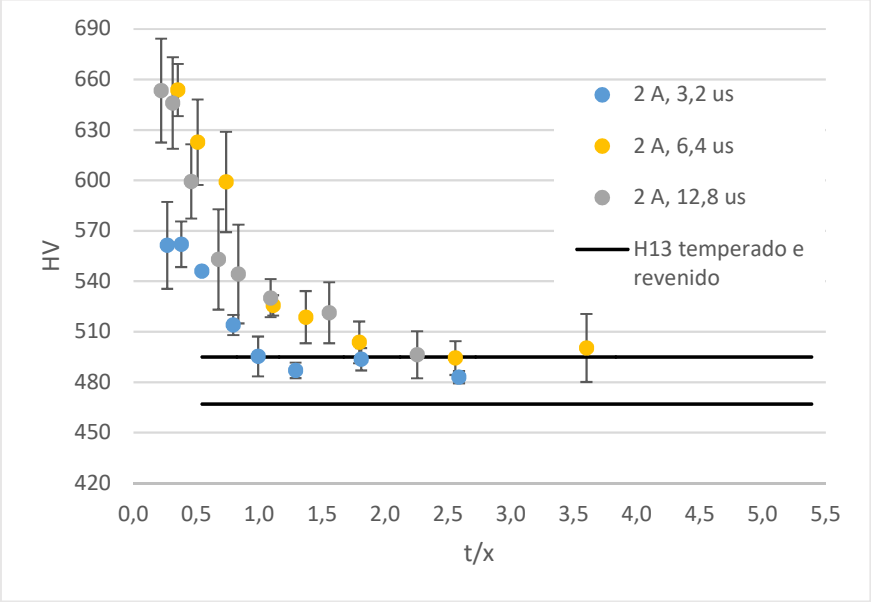


Figura 41. Microdureza das camadas formadas. Tempo de processo: 4 horas, corrente: 2 A. t: profundidade, x: espessura da camada.

- Resultado para melhores camadas eletroerodidas nos tempos de 15 minutos e 4 horas.

Em função dos resultados obtidos na microscopia óptica, onde foi possível observar a integridade e acabamento das camadas resolidificadas, foram analisadas a microdureza das séries que apresentaram os melhores resultados, com relação à essas características. Foram selecionadas as amostras eletroerodidas com os seguintes parâmetros de corrente e tempo de descarga respectivamente: 1 A e 12,8 us; 2 A e 3,2 us; 2 A e 6,4 us. Nesta análise foi incluído o tempo de 15 minutos, a fim de comparar o efeito do tempo de processo na microdureza das peças.

A figura 42 apresenta os resultados obtidos nas amostras eletroerodidas durante 15 minutos. Pode ser observado que não há diferença significativa entre os resultados, estando os pontos sobrepostos, desde os primeiros níveis de carga. Com relação ao

material base, verifica-se que a microdureza média das amostras se mantêm dentro dos níveis mínimo e máximo de dureza do aço AISI H13 temperado e revenido.

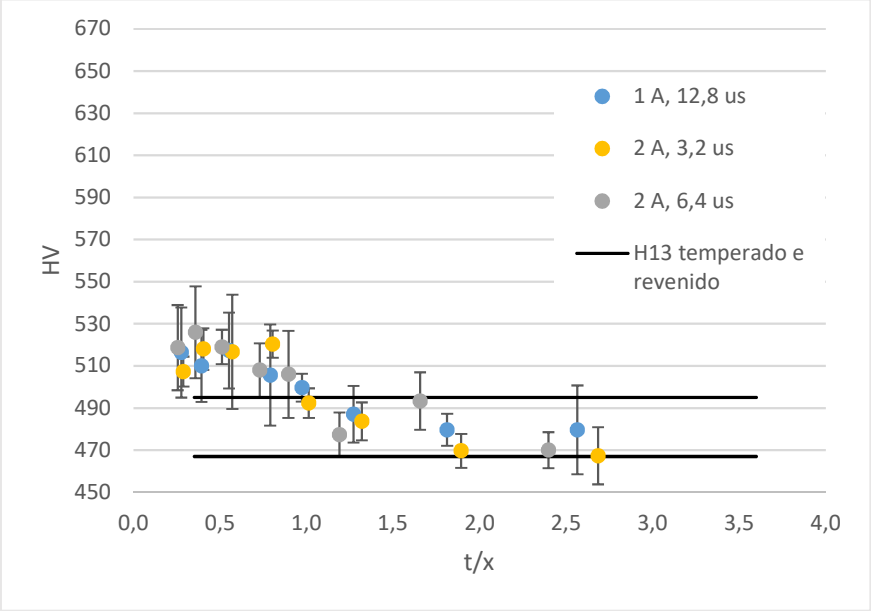


Figura 42. Microdureza das melhores camadas formadas no tempo de 15 minutos. t: profundidade, x: espessura da camada.

Quando aplicado o tempo de 4 horas observa-se que a microdureza aumenta para todos os casos, comparando-se aos resultados de 15 minutos, figura 43. O maior aumento foi nas amostras eletroerodidas nos parâmetros de 2 A e 6,4 us de corrente e tempo de descarga respectivamente, que foi de aproximadamente 24%. Comparado ao material base o aumento foi de aproximadamente 36%.

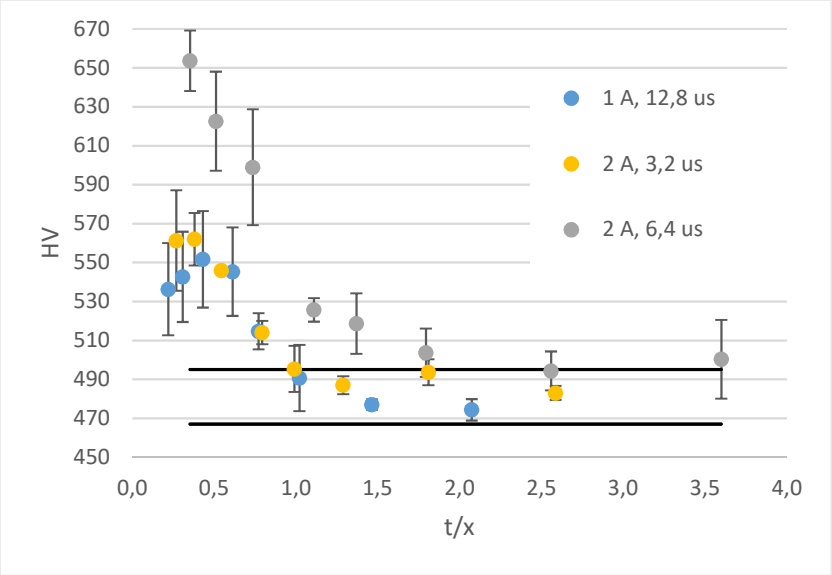


Figura 43. Microdureza das melhores camadas formadas no tempo de 4 horas. t: profundidade, x: espessura da camada.

6.5 DIFRAÇÃO DE RAIOS-X (DRX)

São apresentados os resultados para as camadas selecionadas, conforme o critério explicado anteriormente, comparando a influência do tempo do processo sobre a formação das fases nas diferentes condições de corrente e tempo de descarga.

O aço ferramenta AISI H13 temperado e revenido foi também submetido a análise de DRX, onde pode ser observado na figura 44, a presença da martensita, fase resultante do tratamento térmico aplicado ao material.

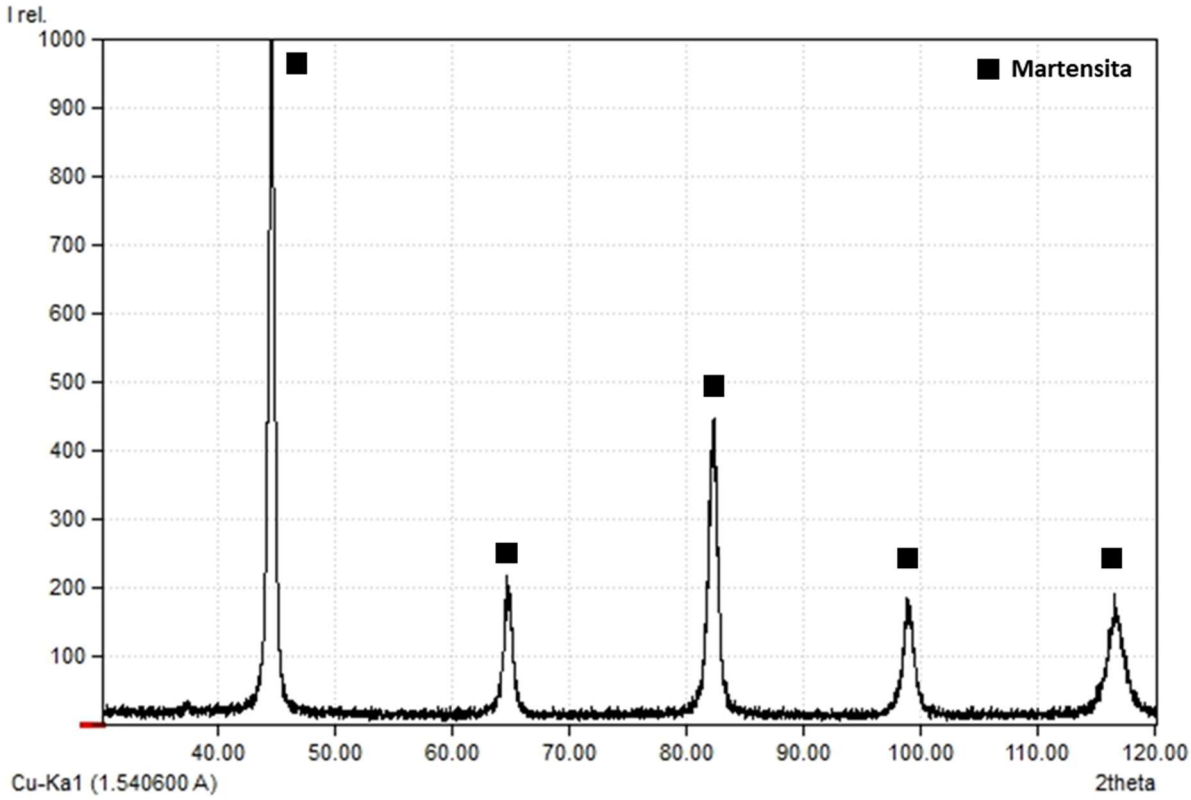


Figura 44. Difratograma do aço AISI H13 temperado e revenido.

A figura 45 apresenta os resultados quando utilizada a corrente de 1 A e tempo de descarga de 12,8 µs. Pode ser observada a manutenção da martensita proveniente do material base para ambas as condições. Duas fases mais, são encontradas na amostra eletroerodida em 15 minutos, sendo elas a austenita retida (Fe-γ) e o carbeto de ferro silício (C0,17 Fe 0,81 Si0,02).

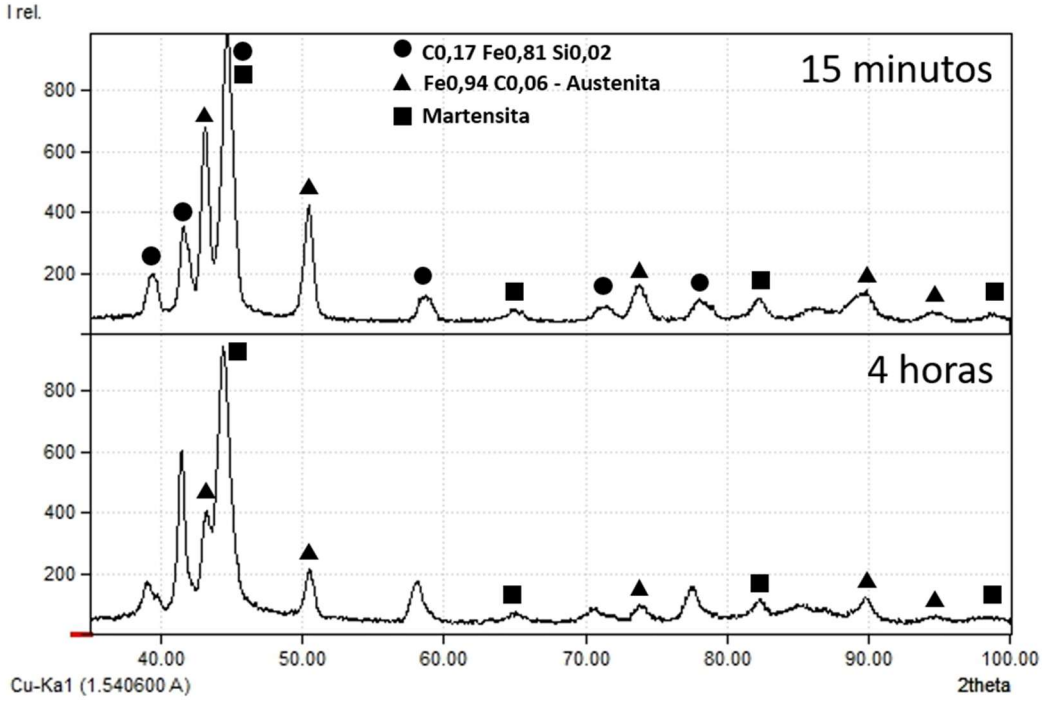


Figura 45. Difratogramas das amostras eletroerodidas durante 15 minutos e 4 horas, com corrente de 1 A e tempo de descarga de 12,8 µs.

A presença da austenita retida corrobora com os resultados encontrados em outros trabalhos, sendo explicada como resultado da tempera à qual é submetido o material fundido ao final da faísca. A formação do carbeto de ferro silício pode ser entendido como influência da presença do pó de silício no dielétrico durante o processo. Para o processo de 4 horas, foram mantidas as fases correspondentes à martensita e à austenita retida, não sendo identificado o carbeto encontrado anteriormente. Porém, pode-se observar que há picos correspondentes à esta fase, presente em 15 minutos de processo, muito próximos aos de 4 horas, o que pode indicar uma outra configuração de carbeto de ferro silício a qual não foi identificada.

Quando utilizada corrente de 2 A e tempo de descarga de 3,2 µs durante 15 minutos, as mesmas fases são encontradas com relação ao resultado anterior para o mesmo tempo de processo, figura 46. Quando aplicado o tempo de 4 horas, observa-se que não é encontrada a fase austenita, surgindo uma nova fase, também martensítica, porém de estrutura tetragonal de corpo centrado (TCC), conforme informado pelo software utilizado na indexação das fases.

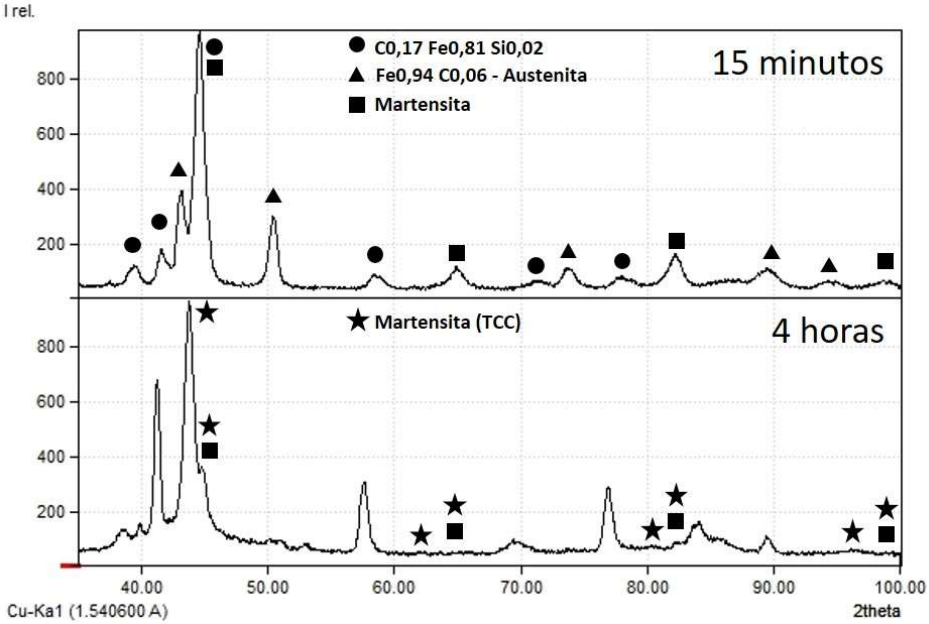


Figura 46. Difratogramas das amostras eletroerodidas durante 15 minutos e 4 horas, com corrente de 2 A e tempo de descarga de 3,2 µs.

Os resultados obtidos nas condições de corrente e tempo de descarga de 2 A e 6,4 µs, respectivamente, foram semelhantes com relação às fases encontradas, como mostra a figura 47. Segundo Ming & He (1995), quando há a adição de pós durante a eletroerosão, é possível observar o aumento na quantidade de martensita e o decréscimo da austenita retida bem como de cementita, o que corrobora com os resultados encontrados, especialmente quando aplicada a corrente de 2 A.

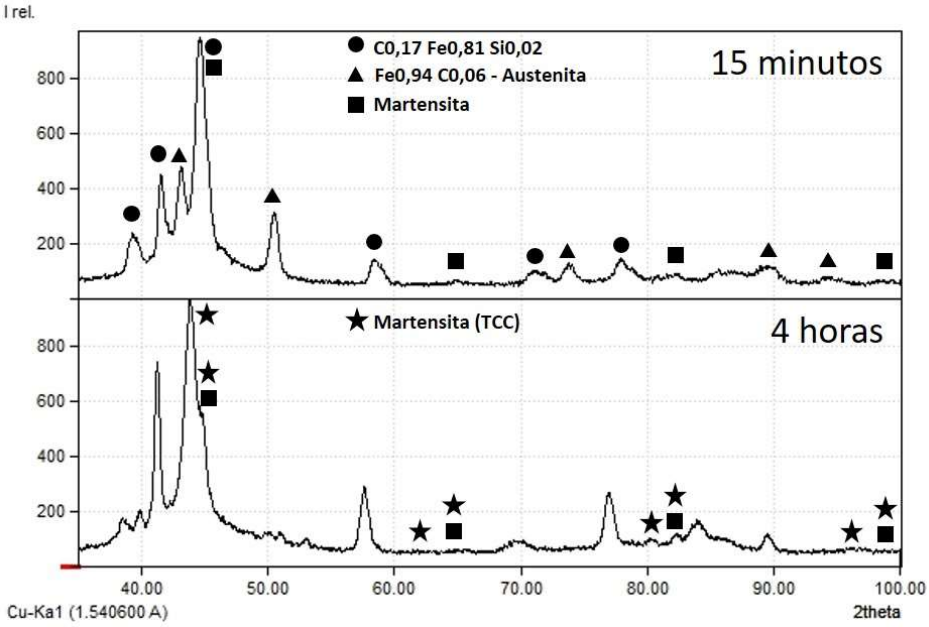


Figura 47. Difratogramas das amostras eletroerodidas durante 15 minutos e 4 horas, com corrente de 2 A e tempo de descarga de 6,4 µs.

6.6 MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA (MEV)

A figura 48, apresenta a seção transversal da amostra eletroerodida durante 15 minutos com as condições de corrente e tempo de descarga de 1 A e 12,8 µs, respectivamente. Pode ser observado que na camada formada após o processo há uma variação na coloração da mesma ou “manchas”, isso indica uma diferença na concentração dos elementos presentes nessas regiões. Com relação ao acabamento pode se perceber que não há presença de trincas e poros na camada.

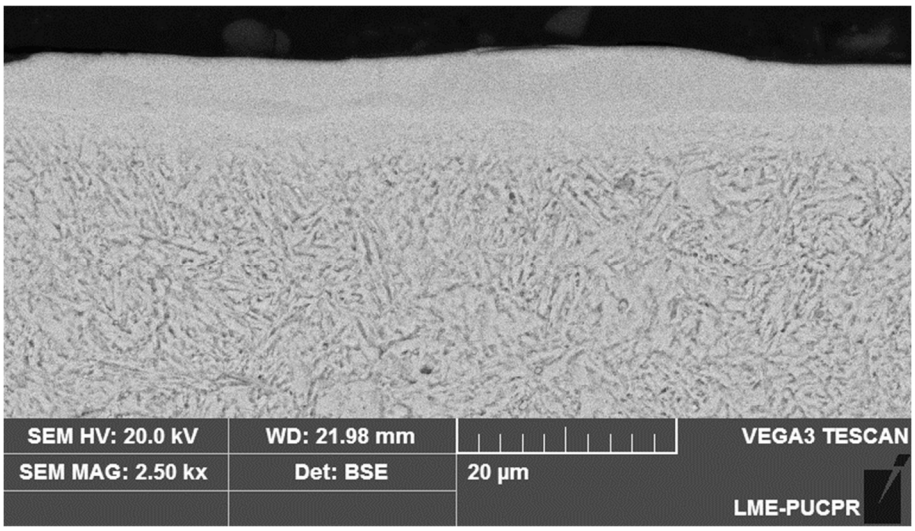
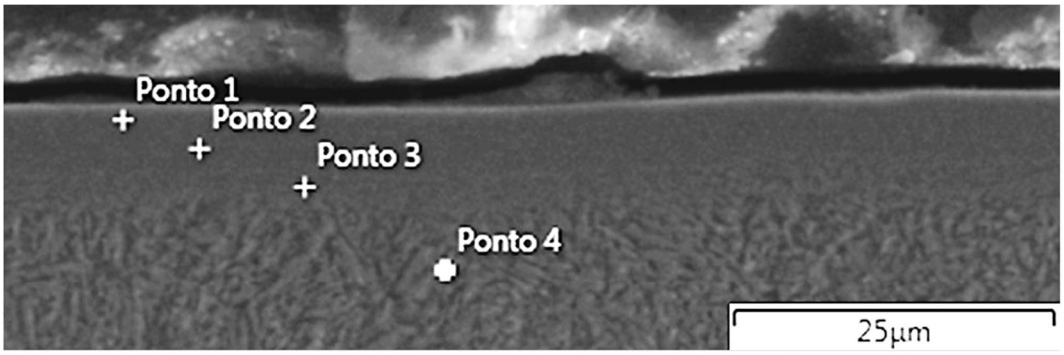


Figura 48. MEV da seção transversal da amostra eletroerodida com corrente de descarga de 1 A e tempo de descarga de 12,8 µs. Tempo de processo: 15 minutos.

Na figura 49 é apresentado o resultado obtido utilizando a técnica de espectroscopia de energia dispersiva. Como pode ser observado, os elementos componentes do aço AISI H13 estão presentes na camada formada, exceto pelo molibdênio, que é identificado somente no material base, e pelo manganês, que não foi identificado em nenhum ponto. Outros elementos foram identificados, sendo eles o oxigênio, magnésio e cobre, presentes somente na camada formada. A presença do oxigênio pode ser explicada pelo fato do dielétrico utilizado durante os experimentos ser um material higroscópico, ou seja, possui a capacidade de absorver água. Zhang, et al. (2011), atribui a formação de óxido, quando utilizado querosene como meio dielétrico, devido à presença de água na fenda de trabalho. O cobre foi detectado somente no ponto mais próximo da superfície da amostra, sendo oriundo do eletrodo ferramenta.



Ponto	C	Fe	O	Cr	Si	Mg	Cu	V	Mo
1	62,5	18,1	15,1	1,1	0,9	0,6	0,4	0,2	-
2	68,3	1,3	27,7	0,2	0,9	0,7	-	-	-
3	71,4	5,3	20,1	0,5	1,3	1,6	-	-	-
4	8,6	80,7	-	4,8	3,7	-	-	0,7	1,5

Valores em Wt%

Figura 49. Variação da porcentagem mássica dos elementos em relação à profundidade da camada formada, 1 A, 12,8 us, 15 minutos.

Na figura 50, observa-se a camada obtida utilizando os mesmos parâmetros de corrente e tempo de descarga da amostra anterior (1 A e 12,8 µs respectivamente), porém com tempo de processo de 4 horas. Pode se observar, comparativamente, que a camada produzida em 4 horas apresenta uma maior regularidade na superfície, o que pode ser também observado na microscopia óptica. A presença de manchas também pode ser observada, indicando que mesmo aplicando um tempo maior de processo, a camada irá apresentar diferentes regiões com relação à distribuição dos elementos. Verifica-se que o processo foi capaz de produzir uma camada com acabamento integro, sem poros e trincas.

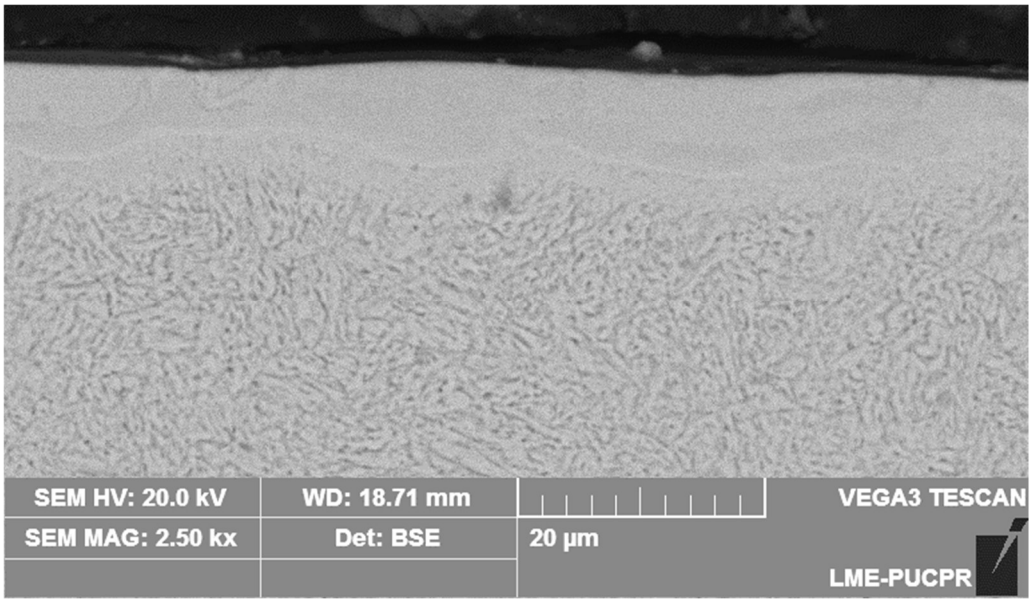
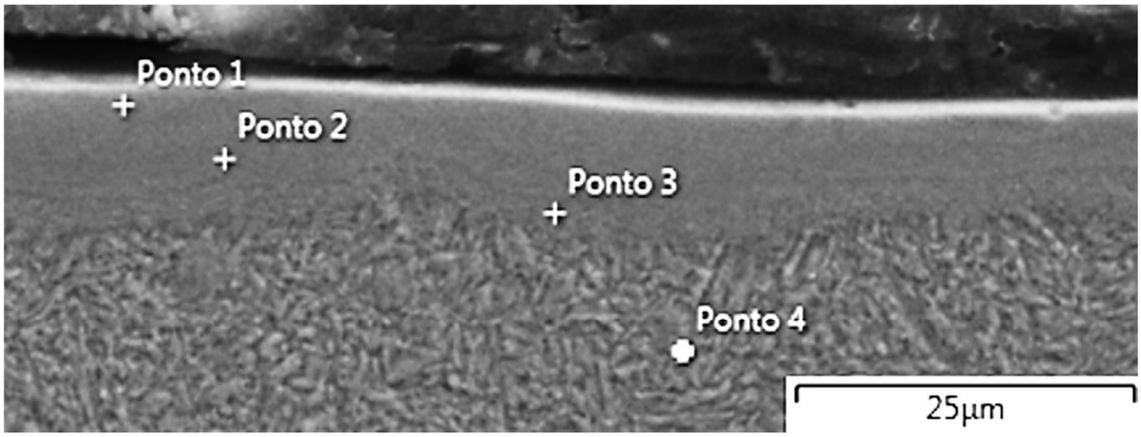


Figura 50. MEV da seção transversal da amostra eletroerodida com corrente de descarga de 1 A e tempo de descarga de 12,8 µs. Tempo de processo: 4 horas.

A figura 51 apresenta os resultados obtidos na análise por EDS, quando utilizado o tempo total de processo de 4 horas. Pode ser observada a presença do manganês nesta análise, o qual não havia sido identificado na amostra anterior, no ponto da camada mais próximo ao material base. O molibdênio, que na amostra eletroerodida durante 15 minutos, havia sido identificado somente no material base, foi identificado em todos os pontos observados. O vanádio que havia sido encontrado somente fora da camada e no ponto mais próximo à superfície, também foi identificado em todos os pontos da amostra eletroerodida em 4 horas. Esses resultados sugerem que um tempo maior de processo possibilita que os elementos presentes na liga do aço AISI H13 se distribuam de maneira uniforme na camada formada.



Ponto	C	Fe	O	Cr	Si	Mg	Cu	V	Mo	Mn
1	27,5	57,2	5,0	3,7	2,1	0,6	0,8	0,9	1,9	-
2	14,0	75,3	-	4,8	1,9	-	1,1	1,1	1,8	-
3	10,9	80,6	-	4,9	1,2	-	-	0,7	1,3	0,3
4	7,4	83,5	-	5,1	1,1	-	-	1,2	1,5	-

Valores em Wt%

Figura 51. Variação da porcentagem mássica dos elementos em relação à profundidade da camada formada, 1 A, 12,8 us, 4 horas.

A figura 52, apresenta a camada formada aplicando corrente de descarga de 2 A e 3,2 µs de tempo de descarga, o tempo total de processo foi de 15 minutos. Verifica-se que a camada não apresenta uma superfície totalmente íntegra como observado nas amostras anteriores, em função da presença de poros e trincas.

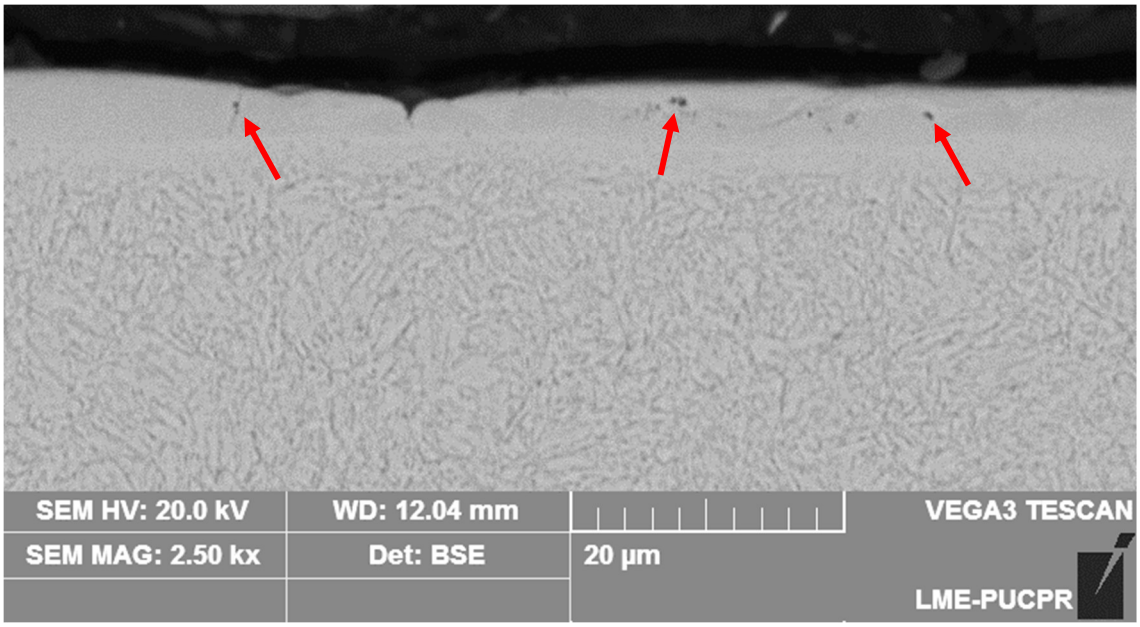
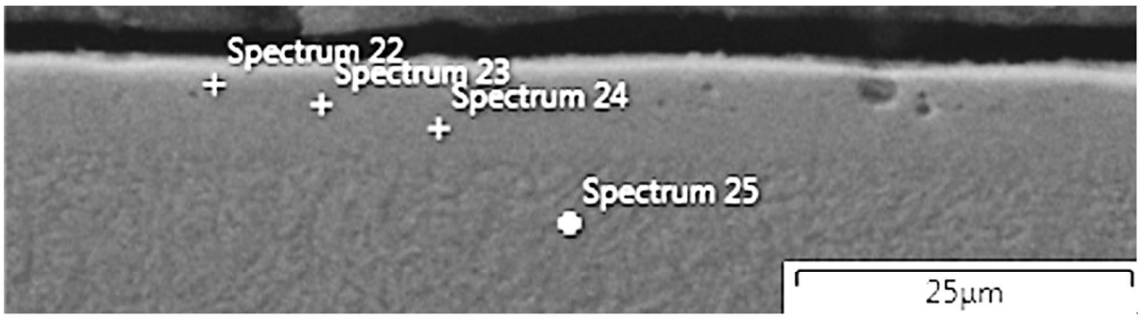


Figura 52. MEV da seção transversal da amostra eletroerodida com corrente de descarga de 2 A e tempo de descarga de 3,2 µs. Tempo de processo: 15 minutos.

Na figura 53 pode ser observada a porcentagem mássica dos elementos nos diferentes pontos analisados. Diferentemente da primeira amostra eletroerodida durante 15 minutos (1 A, 12,8 us), verifica-se a presença dos elementos vanádio e molibdênio em todos os pontos da camada modificada. O manganês, não identificado anteriormente, aparece no ponto da camada mais próximo ao material base.



Ponto	C	Fe	O	Cr	Si	Mn	Cu	V	Mo
22	13,9	75,7	-	4,7	1,9	-	0,8	1,0	2,0
23	10,0	81,0	-	5,4	1,3	-	-	0,8	1,3
24	7,0	85,1	-	4,6	1,3	0,3	-	0,5	1,3
25	11,0	79,4	1,7	4,8	1,0	0,4	-	1,8	-

Valores em Wt%

Figura 53. Variação da porcentagem mássica dos elementos em relação à profundidade da camada formada, 2 A, 3,2 us, 15 minutos.

A camada obtida quando utilizado o tempo de processo de 4 horas, é apresentada na figura 54. Observa-se uma quantidade maior de poros comparativamente à camada anterior, no entanto, de menor tamanho. Não são identificadas trincas na camada

formada e somada à regularidade na espessura da mesma, pode se afirmar que houve uma melhoria no seu acabamento quando comparada com a amostra eletroerodida por 15 minutos. Podem ser observadas manchas na camada.

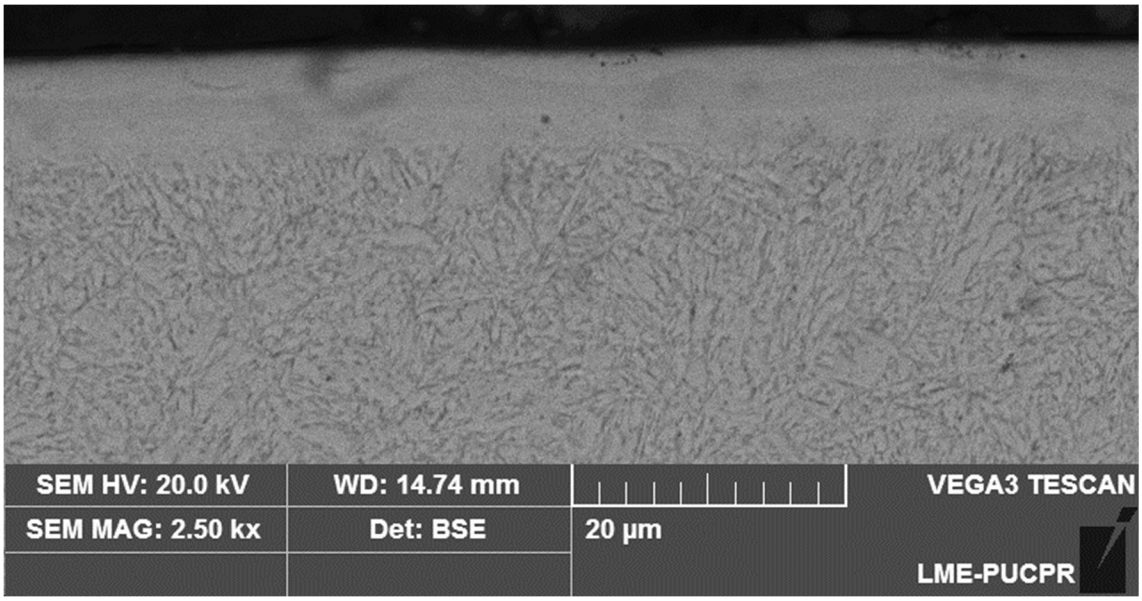
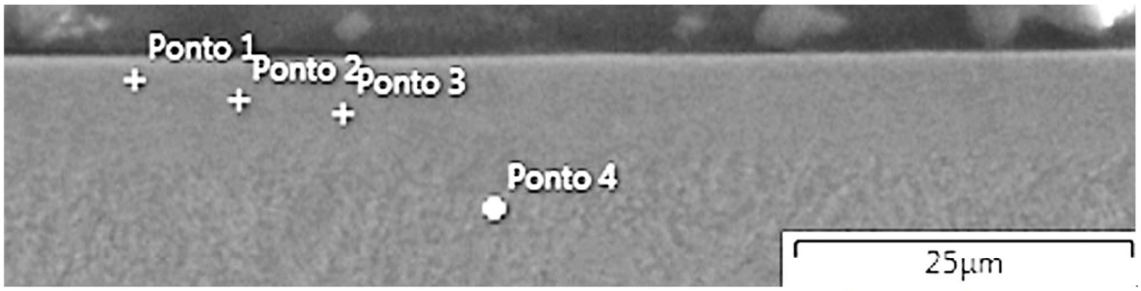


Figura 54. MEV da seção transversal da amostra eletroerodida com corrente de descarga de 2 A e tempo de descarga de 3,2 µs. Tempo de processo: 4 horas.

Com relação à composição da camada formada pode se observar, pela figura 55, que somente o manganês não foi detectado. Houve um aumento significativo de silício na camada, quando comparado à amostra eletroerodida durante 15 minutos, assim como pôde ser observado também nas condições anteriores.



Ponto	C	Fe	O	Cr	Si	Mn	Cu	V	Mo
1	28,4	57,8	3,9	3,7	2,6	-	-	1,2	2,3
2	16,8	69,6	-	4,6	4,3	-	0,4	1,5	3,0
3	16,3	72,8	-	4,6	2,4	-	-	1,3	2,4
4	10,1	81,1	1,8	4,6	0,9	0,3	-	0,2	1,1

Valores em Wt%

Figura 55. Variação da porcentagem mássica dos elementos em relação à profundidade da camada formada, 2 A, 3,2 us, 4 horas.

A última condição analisada foi a que utilizou 2 A e 6,4 μs de corrente e tempo de descarga respectivamente. Pode se observar o resultado obtido quando utilizado o tempo de processo de 15 minutos na figura 56. Com relação ao acabamento da camada formada o resultado pode ser considerado satisfatório devido à ausência de poros ou trincas. Comparativamente às amostras anteriores submetidas à 15 minutos de processo, a camada formada utilizando 2 A de corrente de descarga e 6,4 μs de tempo de descarga, mostrou os melhores resultados no aspecto de acabamento. Isso em função da regularidade da camada na espessura e ausência de poros e trincas.

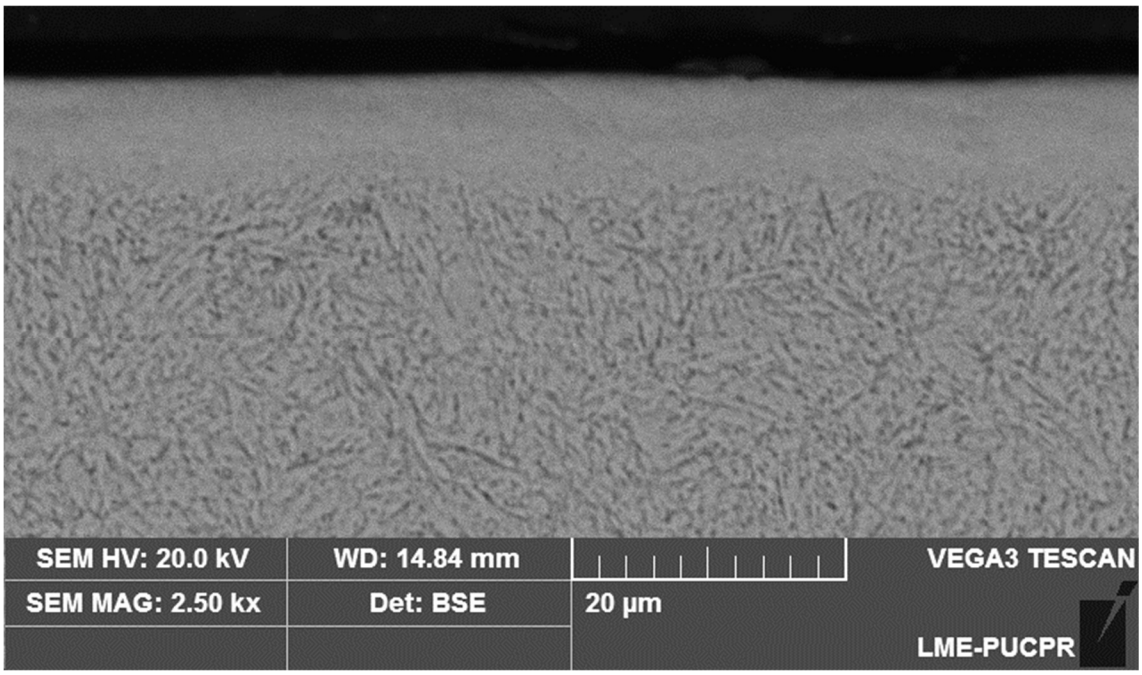
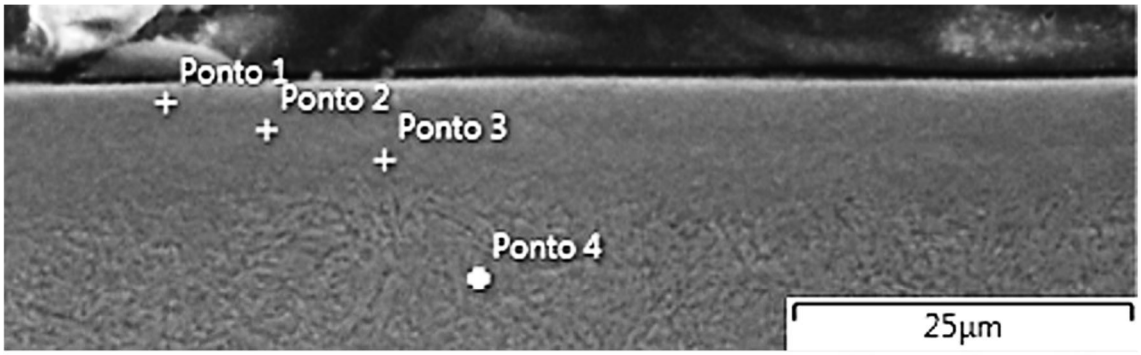


Figura 56. MEV da seção transversal da amostra eletroerodida com corrente de descarga de 2 A e tempo de descarga de 6,4 μs. Tempo de processo: 15 minutos.

Na figura 57, é apresentado os resultados obtidos na análise de EDS, onde pode ser observado que o manganês foi o único elemento não detectado daqueles esperados em função da composição do material base e do próprio processo.



Ponto	C	Fe	O	Cr	Si	Mg	Cu	V	Mo
1	46,9	40,2	5,6	2,8	1,6	-	1,2	0,5	1,1
2	15,0	75,3	-	5,1	1,8	-	-	0,8	1,9
3	15,6	76,2	-	4,9	0,9	-	-	0,9	1,4
4	16,8	72,0	-	5,4	0,8	-	-	3,0	1,9

Valores em Wt%

Figura 57. Variação da porcentagem mássica dos elementos em relação à profundidade da camada formada, 2 A, 6,4 µs, 15 minutos.

A camada produzida na amostra eletroerodida por 4 horas é apresentada na figura 58. Comparativamente à amostra submetida ao processo durante 15 minutos pode se observar que houve manutenção da regularidade na espessura da camada, como também a ausência de trincas, no entanto alguns poros podem ser observados. Verifica se nitidamente pela diferença de coloração a formação de duas regiões na camada produzida.

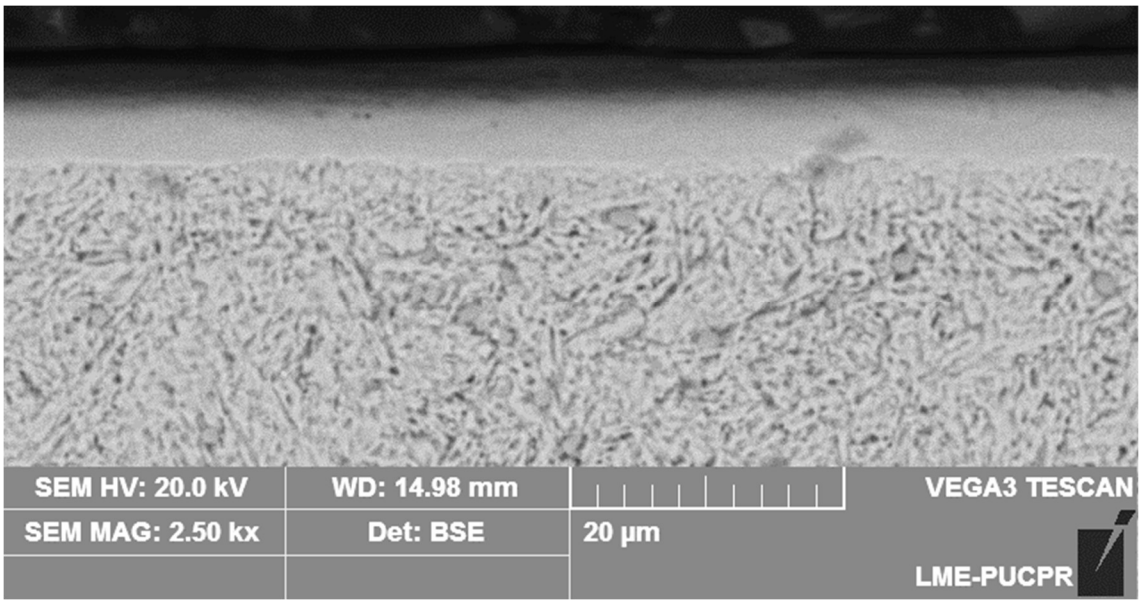
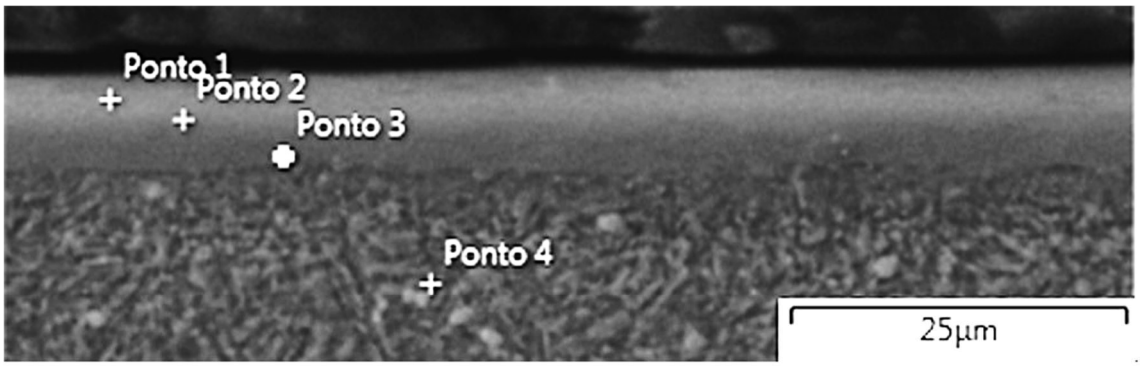


Figura 58. MEV da seção transversal da amostra eletroerodida com corrente de descarga de 2 A e tempo de descarga de 6,4 µs. Tempo de processo: 4 horas.

O resultado obtido na análise de EDS para a amostra eletroerodida em 4 horas é apresentado na figura 59. Na camada, dos elementos de liga do aço AISI H13 somente o manganês não foi identificado assim como ocorreu na camada produzida em 15 minutos. Dos elementos que não fazem parte da liga, não foi identificado o cobre, enquanto o oxigênio foi encontrado em todos os pontos analisados. Com relação à diferença de composição nas regiões distintas da camada, onde é possível observar uma faixa superior de tonalidade mais clara, observa-se uma diferença significativa nas porcentagens de carbono, ferro e oxigênio.



Ponto	C	Fe	O	Cr	Si	Mn	Cu	V	Mo
1	39,5	46,9	7,5	3,5	0,6	-	-	1,1	0,9
2	31,3	56,4	4,8	4,1	0,8	-	-	1,1	1,4
3	15,5	74,5	1,3	4,9	1,2	-	-	1,0	1,6
4	16,4	64,3	9,6	5,8	0,5	0,3	-	1,3	1,7

Valores em Wt%

Figura 59. Variação da porcentagem mássica dos elementos em relação à profundidade da camada formada, 2 A, 6,4 us, 4 horas.

6.7 COEFICIENTE DE ATRITO

A figura 60 apresenta os resultados obtidos de coeficiente de atrito máximo no tempo de processo de 15 minutos. Observa-se que os resultados das amostras submetidas ao processo de eletroerosão com pó em suspensão estão próximos e apresentam um valor médio um pouco abaixo do resultado obtido para aço AISI H13 temperado e revenido.

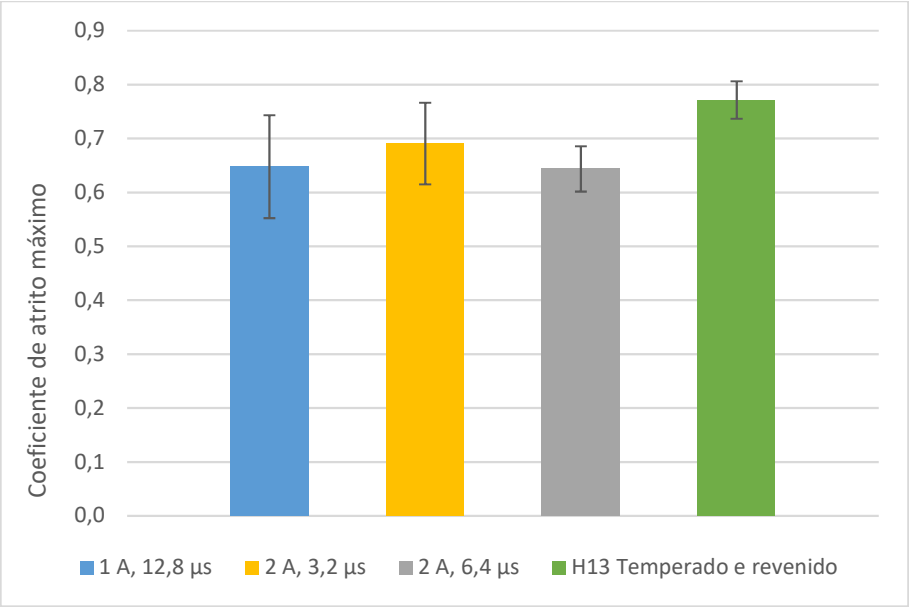


Figura 60. Coeficiente de atrito máximo para as amostras eletroerodidas durante 15 minutos

Quando submetidas ao processo durante 4 horas, as amostras apresentam um coeficiente de atrito máximo menor com relação às amostras eletroerodidas em 15 minutos, como mostra a figura 61. A amostra eletroerodida com 1 A e 12,8 us de corrente e tempo de descarga respectivamente, apresentou o menor coeficiente de atrito, enquanto as outras amostras não mostraram diferença entre si.

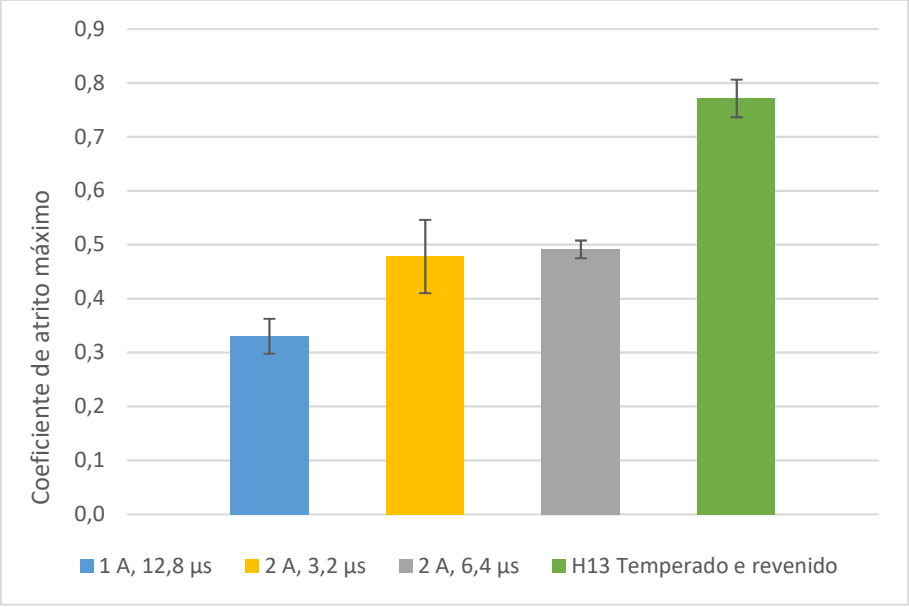


Figura 61. Coeficiente de atrito máximo para as amostras eletroerodidas durante 4 horas.

A figura 62, mostra o comportamento do coeficiente de atrito para as amostras eletroerodidas durante 15 minutos. Observa-se que a distância necessária para a estabilização do coeficiente de atrito foi muito próxima para as amostras, incluindo o

material base, sendo esta de aproximadamente 0,5 metros. A amostra eletroerodida com 1 A de corrente, apresentou um valor de coeficiente de atrito, após a estabilização, semelhante ao material base. As amostras utilizando corrente de descarga de 2 A, mostraram um nível semelhante de coeficiente de atrito.

Quando analisadas as amostras submetidas ao tempo de processo de 4 horas, pode ser observado que a distância necessária para a estabilização do coeficiente de atrito é maior se comprado com as amostras de 15 minutos, sendo esta distância de aproximadamente 2 metros. Verifica-se também que para as amostras de 4 horas o coeficiente de atrito permanece mais estável do que as amostras de 15 minutos, ficando o nível deste, abaixo do material base em todos os casos, figura 63.

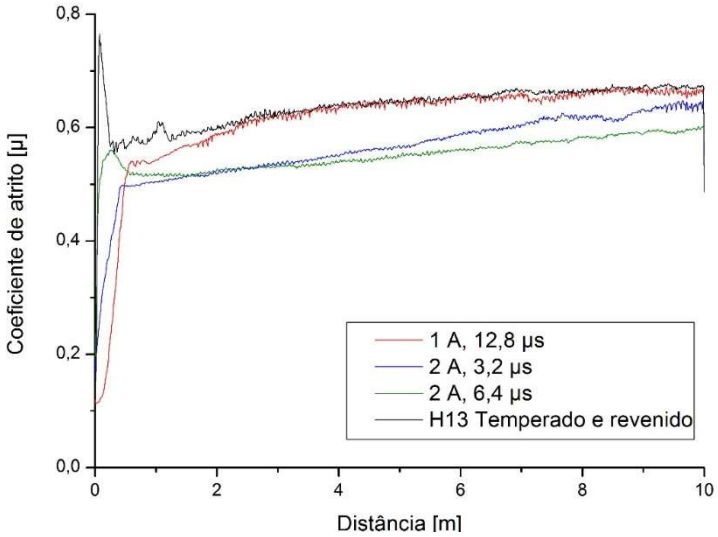


Figura 62. Comportamento do coeficiente de atrito das amostras eletroerodidas durante 15 minutos.

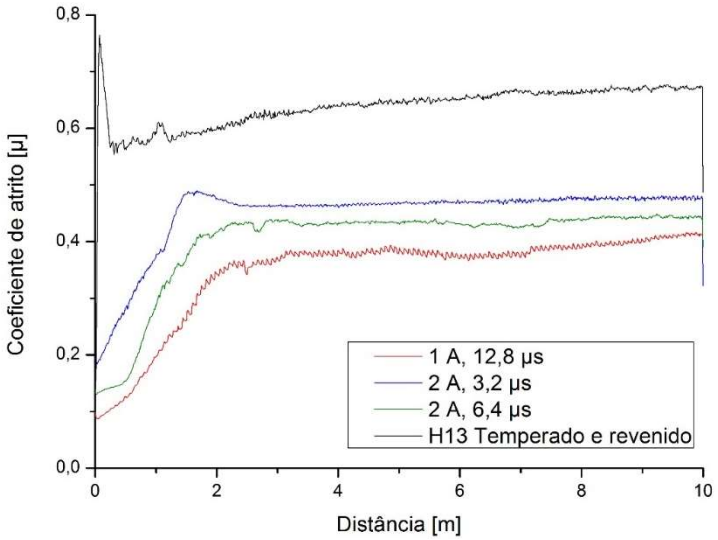


Figura 63. Comportamento do coeficiente de atrito das amostras eletroerodidas durante 4 horas.

6.8 RESISTÊNCIA AO DESGASTE

Na figura 64 é apresentado os resultados da taxa de desgaste das amostras eletroerodidas durante 15 minutos, onde pode se observar que não há variação significativa entre as amostras usinadas com pó de silício em suspensão. Quando comparados ao resultado para o material base, observa-se que o processo contribui para a diminuição da taxa de desgaste da peça.

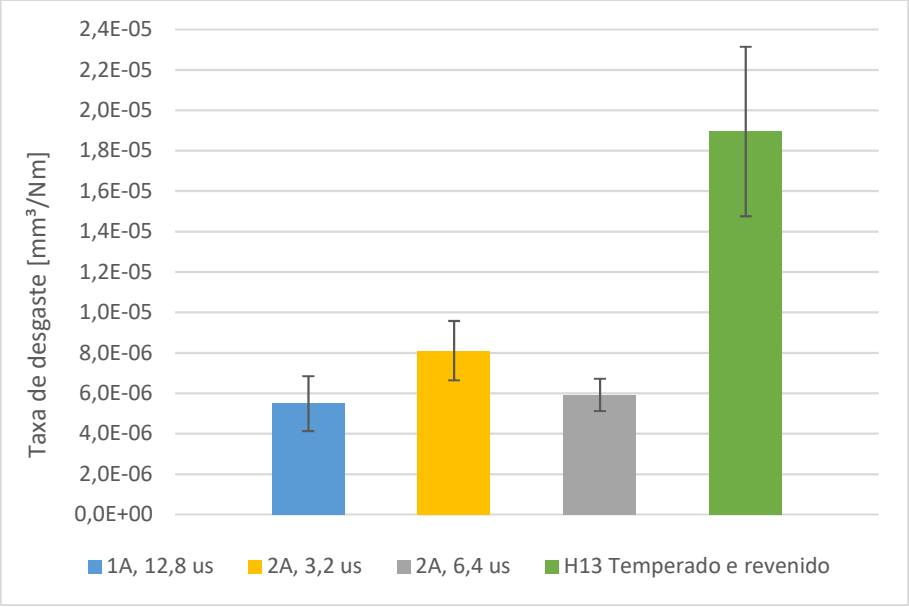


Figura 64. Taxa de desgaste das amostras eletroerodidas durante 15 minutos.

Quando aplicado o tempo de usinagem de 4 horas, observa-se que para a condição de 1 A e 12,8 µs de corrente e tempo de descarga, respectivamente, há um aumento significativo da taxa de desgaste em comparação daquela obtida para 15 minutos, como mostra a figura 65. Apesar disso, o valor médio da taxa de desgaste ficou abaixo do resultado para o material base, assim como nas demais condições. Quando comparados os valores médios para as condições utilizando 2 A de corrente de descarga, pode se observar que houve nos dois casos a diminuição da taxa de desgaste, em relação às amostras eletroerodidas durante 15 minutos, sendo esta diminuição maior na condição utilizando 3,2 µs de tempo de descarga. Este resultado era esperado quando observado os resultados do ensaio de microdureza, onde verificou-se o aumento da dureza nas amostras submetidas ao processo de eletroerosão durante 4 horas, o que influencia diretamente na resistência ao desgaste da peça.

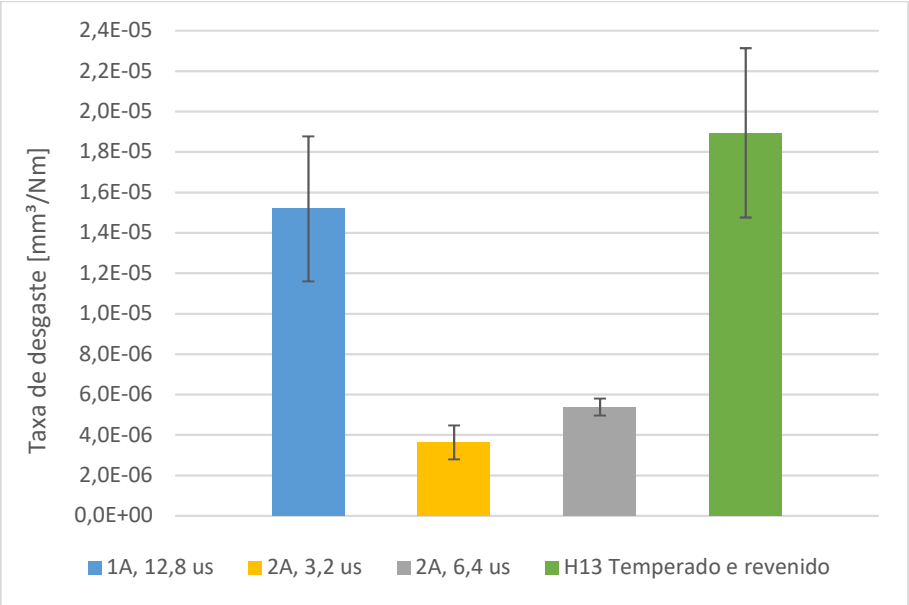


Figura 65. Taxa de desgaste das amostras eletroerodidas durante 4 horas.

7 CONCLUSÕES

A partir dos resultados obtidos, pode-se concluir que:

Foi possível obter, através da adição do pó de silício durante o processo de eletroerosão, camadas resolidificadas regulares, sem poros e sem trincas, independentemente do tempo de processo que variaram desde 15 minutos, até 4 horas.

A condição favorável à formação de camadas uniformes, quando utilizado 1 A de corrente de descarga, foi somente para tempo de descarga de 12,8 μs. Para tempos menores, as camadas apresentaram muitas irregularidades e trincas.

Quando utilizado 2 A de corrente de descarga, foi possível obter camadas uniformes nos tempos de descarga de 3,2 e 6,4 μs. Quando utilizado um tempo acima as camadas se tornam irregulares.

Não parece haver relação direta entre a espessura da camada formada e o tempo total de processo para uma mesma condição de tempo e corrente de descarga. No entanto, quando aumentado o tempo de descarga e a corrente de descarga, é possível observar uma tendência de aumento da espessura da camada.

Na maioria dos casos, a rugosidade na superfície da amostra aumentou quando aplicada uma corrente de 2 A. Foi possível obter níveis de rugosidade próximos e até mesmo abaixo do material retificado quando aplicada a corrente de 1 A e o tempo de processo de 2 horas.

A microdureza da camada formada aumenta em função do tempo de descarga e da corrente aplicada, quando avaliada no tempo de processo de 4 horas. Para um tempo de processo de 15 minutos os níveis de microdureza ficam próximos, independentemente do tempo e corrente de descarga. Para as mesmas condições de tempo e corrente de descarga, a microdureza da superfície eletroerodida durante 4 horas, se apresentou maior do que a eletroerodida durante 15 minutos.

Houve mudanças significativas na composição da camada resolidificada, o que impactou diretamente na formação de fases e consequentemente nas propriedades de microdureza e resistência ao desgaste da superfície da peça, como evidenciado pelas análises de EDS e DRX.

O coeficiente de atrito da superfície eletroerodida se torna menor quando aplicado o pó de silício no meio dielétrico durante o processo. Conforme o aumento de tempo de processo o coeficiente de atrito diminui.

Foi possível obter, conforme esperado, uma superfície tratada que apresentasse uma maior resistência ao desgaste quando comparada com os resultados para o material base.

8 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Para avanço no conhecimento e desenvolvimento de uma técnica que seja aplicável à processos tecnológicos, seguem as seguintes sugestões de continuidade desse trabalho:

- Realizar ensaios de resistência ao desgaste aliado à aplicação de alta temperatura.

- Investigar a tenacidade à fratura da camada, uma vez que foram observadas trincas durante os ensaios de microdureza vickers.

- Aplicar uma concentração de pó de silício abaixo de 5 g/l, e avaliar os impactos dessa variação sobre as propriedades e integridade da superfície da peça.

REFERÊNCIAS

AGIE CHARMILLES. **When to EDM**. Disponível em: <http://www.agiecharmilles.us>. Acesso em: abril 2014.

AMORIM, F. L. **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. 175 f. Tese submetida à Universidade Federal de Santa Catarina para a obtenção do grau de doutor em engenharia mecânica, Florianópolis, 2002.

ASTM – AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM G133 – 05 (2010) – Standard Test Method for Linearly Reciprocating Ball-on-Flat Sliding Wear.** ASTM International, West Conshohocken, 2013.

BAI, C.-Y.; KOO, C.-H. Effects of kerosene or distilled water as dielectric on electrical discharge alloying of superalloy Haynes 230 with Al–Mo composite electrode. **Surface & Coatings Technology**, v. 200, p. 4127-4135, 2006.

CHOW, H.-M. et al. Study of added powder in kerosene for the micro-slit machining of titanium alloy using electro-discharge machining. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 101, p. 95-103, 2001.

DALCIN, V. A. **Avaliação da influência de pó de molibdênio em suspensão no dielétrico na modificação de superfícies eletroerodidas**. 2011. 92 f. Dissertação (Mestrado) - Pontifícia Universidade Católica do Paraná, Curitiba, 2011.

EL-HOFY, H. A. **Advanced Machining Processes**. Alexandria: McGraw-Hill, 2005.

FURUTANI, K. et al. Accretion of titanium carbide by electrical discharge machining with powder suspended in working fluid. **Journal of the International Societies for Precision Engineering and Nanotechnology**, v. 25, p. 138–144, 2001.

GANGADHAR, A. et al. Surface modification in electrodischarge processing with a powder compact tool electrode. **Wear**, v. 143, p. 45-55, 1991.

HO, K. H.; NEWMAN, S. T. State of the art electrical discharge machining (EDM). **International Journal of Machine Tools & Manufacture**, v. 43, p. 1287-1300, jun. 2003.

JAHAN, M. P. **Micro-Electrical Discharge Machining**. In: Davim, J. P. Nontraditional Machining Processes. Londres: Springer; 2013. P. 111-151.

JESWANI, M. L. Effects of the addition of graphite powder to kerosene used as the dielectric fluid in electrical discharge machining. **Wear,** v. 70, p. 133–139, 1981.

KANSAL, H. K. et al. Performance parameters optimization (multi-characteristics) of powder mixed electric discharge machining (PMEDM) through Taguchi's method and utility concept. **Indian Journal of Engineering & Materials Sciences**, v. 13, p. 209-216, Jun. 2006.

KANSAL, H. K. et al. Technology and research developments in powder mixed electric discharge machining (PMEDM). **Journal of Materials Processing Technology**, v. 184, p. 32-41, 2007.

KÖNIG, W.; KLOCKE, F. **Fertiginsgsverfahren – 3**: **Abtragen uns Generieren**. Berlin: Springer, 1997. 3 v.

KUMAR, S. et al. Surface modification by electrical discharge machining: A review. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 209, p. 3675-3687, 2009.

KUNIEDA, M. et al. Advancing EDM through Fundamental Insight into the Process. **CIRP Annals - Manufacturing Technology**, v. 54, n. 2, p. 64-87, 2005.

LASCOE, O. D. **Handbook of fabrication processes**. Ohio: Livraria Cultura, 1988. 456 p.

LI LI, Y. S. et al. EDM performance of TiC/copper-based sintered electrodes. **Materials and Design**, v. 22, p. 669-678, Jan. 2001.

LUO, Y. F. The dependence of interspace discharge transitivity upon the gap debris in precision electrodischarge machining. **J. Mater. Process. Technol**, v. 68, p. 127-137, 1997.

MING, Q. Y.; HE L. Y. Powder-suspension dielectric fluid for EDM. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 52, p. 44-54, 1995.

MOHRI, N. Metal Surface Modification by Electrical Discharge Machining with Composite Electrode. **Annals of the CIRP**, v. 42, p. 219-222, Jan. 1993.

MOLINETTI, A. L. **Modificação de superfície do aço H13 utilizando o processo de eletroerosão com pós de silício e de manganês em suspensão no fluido dielétrico**. 2010. 108 f. Dissertação (Mestrado) - Pontifícia Universidade Católica do Paraná, Curitiba, 2010.

MORO, T. et al. Surface Modification Process by Electrical Discharge Machining with TiC Semi-sintered Electrode. **精密工学会誌,** v. 67, p. 114-119, 2001.

NARUMIYA, H. et al. EDM by Powder Suspended Working Fluid. **In: Proceedings of the ISEM - 9**, Nagoya, Japan, p. 5–8, 1989.

OKADA, A.; UNO, Y.; HIRAO, K. Formation of hard layer by EDM with carbon powder mixed fluid using titanium electrode. **In: Proceedings of the International Conference on Progress of Machining Technology**, p. 464–469, 2000.

PANTELIS, D. I.; VAXEVANIDIS, N. M.; HOUNDRI, A. E.; DUMAS, P.; JEANDIN, M. Investigation into application of electrodischarge machining as steel surface modification technique. **Surface Engineering**, v. 14 (1), p. 55–61, 1998.

PAWADE, M. M.; BANWAIT, S. S. An Exhaustive Review of Die Sinking Electrical Discharge Machining Process and Scope for Future Research. **World Academy of Science, Engineering and Technology,** v. 7, p. 686-692, 2013.

PECAS, P.; HENRIQUES, E. Influence of silicon powder-mixed dielectric on conventional electrical discharge machining. **International Journal of Machine Tools & Manufacture,** v. 43, p. 1465–1471, 2003.

SAMUEL, M. P.; PHILIP, P. K. Power Metallurgy Tool Electrodes For Electrical Discharge Machining. **Int. J. Mach. Tools Manufact**, v. 37, p. 1625-1633, Jan. 1997.

SIMAO, J. et al. Workpiece surface modification using electrical discharge machining. **International Journal of Machine Tools & Manufacture**, v. 43, p. 121–128, Set. 2002.

SOMMER, C.; SOMMER, S. **Complete EDM Handbook**. Houston, 2005.

STEVENS, L. **Improvement of surface quality in die-sinking EDM**. 1998. 181 f. Tese submetida à Katholieke Universiteit Leuven para a obtenção do grau de doutor em engenharia mecânica, Leuven – Bélgica.

TZENG, Y. F.; LEE, C. Y. Effects of powder characteristics on electro discharge machining efficiency. **Int. J. Adv. Manuf. Technol.**, v. 17, p. 586–592, 2001.

WANG, Z. L. et al. Surface modification process by electrical discharge machining with a Ti powder green compact electrode. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 129, p. 139-142, 2002.

WONG, Y. S.; LIM, L. C.; RAHUMAN, I.; TEE, W. M. Near mirror-finish phenomenon in EDM using powder-mixed dielectric. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 79, p. 30–40, 1998.

ZHANG, Y.; LIU, Y.; JI, R.; CAI, B. Study of the recast layer of a surface machined by sinking electrical discharge machining using water-in-oil emulsion as dielectric. **Applied Surface Science**, v. 257, p. 5989–5997, 2011.

ZHAO, W. S.; MENG, Q. G.; WANG, Z. L. The application of research on powder mixed EDM in rough machining. **J. Mater. Process. Technol.**, v. 129, p. 30-33, 2002.