

PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA DO PARANÁ

ANDERSON LUIZ MOLINETTI

**Modificação de Superfície do Aço H13 Utilizando o Processo
de Eletroerosão com Pós de Silício e de Manganês em
Suspensão no Fluido Dielétrico**

**MESTRADO EM
ENGENHARIA MECÂNICA
PUCPR**

**CURITIBA
DEZEMBRO - 2010**

PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA DO PARANÁ

ANDERSON LUIZ MOLINETTI

**Modificação de Superfície do Aço H13 Utilizando o Processo
de Eletroerosão com Pós de Silício e de Manganês em
Suspensão no Fluido Dielétrico**

Dissertação apresentada como requisito parcial à
obtenção do grau de Mestre em Engenharia Mecânica, do
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, do
Centro de Ciências Exatas e de Tecnologia, da
Pontifícia Universidade Católica do Paraná – PUCPR.

Orientador: Prof. Dr.Eng. Fred Lacerda Amorim

Co-Orientador: Prof. Dr. Eng. Paulo Cesar Soares Jr

CURITIBA

DEZEMBRO – 2010

ANDERSON LUIZ MOLINETTI

**Modificação de Superfície do Aço H13 Utilizando o Processo
de Eletroerosão com Pós de Silício e de Manganês em
Suspensão no Fluido Dielétrico**

Dissertação apresentada como requisito parcial à
obtenção do grau de Mestre em Engenharia Mecânica, do
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, do
Centro de Ciências Exatas e de Tecnologia, da
Pontifícia Universidade Católica do Paraná - PUCPR.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr.Eng. Fred Lacerda Amorim (*Orientador*)
Pontifícia Universidade Católica do Paraná – PUCPR

Prof. Dr.Eng. Paulo Cesar Soares Jr (*Co - Orientador*)
Pontifícia Universidade Católica do Paraná – PUCPR

Prof. Ricardo Diego Torres, Ph.D
Pontifícia Universidade Católica do Paraná - PUCPR

Prof. Dr.-Ing. Irionson Antonio Bassani
Pontifícia Universidade Católica do Paraná - PUCPR

Prof. Dr. Eng. Giuseppe Pintaude
Universidade Tecnológica Federal do Paraná - UTFPR

Curitiba, 06 de Dezembro de 2010

DEDICATÓRIA

Aos familiares, amigos e orientador pela grande ajuda no decorrer deste trabalho, em todos os sentidos.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente gostaria de agradecer ao Prof. Dr.Eng Fred Lacerda Amorim pelo grande apoio, incentivo e paciência durante o desenvolvimento deste trabalho.

Ao meu co-orientador Prof. Dr. Eng. Paulo Cesar Soares Jr pelo tempo prestado para o esclarecimento de assuntos relacionados ao meu trabalho, que foi de fundamental importância durante a caracterização e análise dos resultados.

Agradeço também todos os funcionários da PUC-PR que contribuíram para a conclusão desta dissertação, e principalmente ao técnico do laboratório de usinagem da PUC-PR (LAUS) Sr. Wagner pela contínua colaboração na execução deste trabalho.

A minha esposa Márcia Carta Ribeiro, que me apoiou sempre em todas as minhas decisões e que foi uma pessoa chave para a conclusão deste trabalho.

Agradeço o aluno de mestrado Vitor Dalcin pela grande ajuda durante a preparação dos equipamentos para a realização dos ensaios.

E finalmente aos meus pais que sempre estiveram comigo, e me deram uma educação robusta para eu sempre estar preparado para conquistar novos desafios.

EPÍGRAFE

*“Quando uma porta se fecha, outra se abre.
Mas muitas vezes nós ficamos olhando tanto
tempo, triste, para a porta fechada que nem
notamos que se abriu outra para nós.”
(Alexander Graham Bell)*

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS.....	10
LISTA DE TABELAS.....	14
SIMBOLOGIA.....	15
RESUMO	17
ABSTRACT	18
1 INTRODUÇÃO	19
2 FUNDAMENTOS DO PROCESSO DE ELETROEROSÇÃO POR FAÍSCAS	21
2.1 Generalidades do processo de eletroerosão.....	21
2.2 Fundamentos do fenômeno físico de uma descarga.....	23
2.2.1 Fase de ignição.....	24
2.2.2 Formação do canal de plasma.....	25
2.2.3 Fusão e evaporação do material nos eletrodos.....	26
2.2.4 Ejeção do material fundido	28
2.3 Principais parâmetros de controle do Processo.....	29
2.3.1 Outras considerações sobre o processo de EDM.....	30
3 FUNDAMENTOS DA UTILIZAÇÃO DE PÓS EM SUSPENSÃO NO DIELÉTRICO NO PROCESSO DE ELETROEROSÃO POR FAÍSCAS	32
3.1 O processo de EDM com pó em suspensão (PMEDM).....	32
3.2 Fundamentos do Processo de PMEDM	33
3.3 A camada resolidificada (ou camada branca)	35

3.3.1 Zona termicamente afetada.....	37
3.3.2 Zona de tensão residual.....	37
3.4 Influência do pó em suspensão na camada resolidificada no processo de PMEDM	37
3.5 Influência da polaridade do eletrodo-ferramenta.....	39
3.6 Trabalhos relacionados ao processo de PMEDM	40
3.6.1 A utilização de pó de Silício no processo de PMEDM.....	42
3.6.2 A utilização de pó de Manganês no processo de PMEDM	43
3.6.3 A utilização de outros pós no processo de PMEDM.....	43
3.7 Outras generalidades da utilização de pós em suspensão no dielétrico.....	46
3.7.1 Manutenção os pós em suspensão	46
3.7.2 Filtros no processo de PMEDM	46
3.7.3 Influência do tamanho da cuba de trabalho	47
3.7.4 Efeito do tamanho da partícula na região solidificada.....	48
4 MÉTODO EXPERIMENTAL E MATERIAIS.....	50
4.1 Fluxograma experimental.....	50
4.2 Técnicas de quantificação e caracterização dos resultados.....	59
4.2.1 Aspectos da integridade superficial	59
4.3 Planejamento experimental do processo de PMEDM	62
5 RESULTADOS E DISCUSSÕES	64
5.1 Resultados da rugosidade das amostras após PMEDM.....	64
5.2 Resultados da microdureza das amostras após PMEDM.....	67
5.3 Resultados das análises micrográficas das amostras após PMEDM.....	72
5.3.1 Micrografias das amostras usinadas pelo processo convencional de EDM	72
5.3.2 Micrografias das amostras usinadas com pó de silício	73
5.3.3 Micrografias das amostras usinadas com pó de manganês.....	77
5.3.4 Considerações sobre as micrografias analisadas	80

5.4 Resultado das análises de Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)	80
5.4.1 MEV dos pós de silício e manganês.....	81
5.4.2 MEV das amostras que apresentaram melhores resultados na formação da camada resolidificada após usinagem por PMEDM	82
5.5 Resultados das análises de EDS (Energy Dispersive Spectrometry).....	87
5.6 Resultado das análises de DRX (Difração de raios X).....	93
6 CONCLUSÕES.....	97
7 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	99
8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	100
APÊNDICE 1 – MÁQUINA UTILIZADA.....	105
APÊNDICE 2 – ANÁLISE METALOGRÁFICA.....	107

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Esquema simplificado do circuito de Lazarenko, Konig & Klocke (1997).....	22
Figura 2.1.2 – Representação esquemática da (a) eletroerosão por penetração, (b) eletroerosão a fio, Konig & Klocke (1997).....	23
Figura 2.2 - Fases de uma descarga elétrica no processo de EDM, (AMORIM, 2001).....	24
Figura 2.2.1 – Representação esquemática da fase de ignição do processo de EDM.....	25
Figura 2.2.2 – Representação esquemática da fase de formação do canal de plasma do processo de EDM.....	26
Figura 2.2.3 - Representação esquemática da faísca elétrica, destacando a forma do canal de plasma. O fluxo de calor nas superfícies do cátodo e do ânodo está representado por q_c e q_a , sendo r_a e r_c os raios das cavidades fundidas no ânodo e cátodo (Dibitonto et. al 1989).....	27
Figura 2.2.4 – Camada branca Klocke & Karden (1999).....	28
Figura 2.3 - Evolução da tensão e corrente elétricas durante a descarga de uma faísca, apresentando em destaque os principais parâmetros de controle do processo.....	29
Figura 3.2 – Representação esquemática do processo de PMEDM, [Kansal & Sehijpal & Kumar – 2005].....	34
Figura 3.2.1 – Representação esquemática na fenda de trabalho durante o processo de PMEDM [Kansal & Sehijpal & Kumar – 2005].....	35
Figura 3.6 – Representação esquemática das camadas de uma peça após o processo de EDM. Na parte (b) pode ser observada a formação da camada branca.....	36
Figura 3.4 – Relação entre duração de pulso e corrente de descarga para possibilitar que partículas do pó sejam agregadas na peça, segundo Furutani (2000).....	38
Figura 3.5 – Representação da polaridade do eletrodo-ferramenta. A-) Representação da polaridade positiva do eletrodo-ferramenta, e B-) Polaridade negativa.	40
Figura 3.6.3 – Exemplo de camada gerada no processo de PMEDM: a-) Seção transversal, b-) Vista de topo , de Furutani (2000).....	44
Figura 3.7.4 – Influência do tamanho da partícula de Al na região resolidificada conforme Tzeng (2005).....	48
Figura 4 - Máquina Roboform 30 CNC.....	50
Figura 4.1 - Modelo esquematizado do plano geral de desenvolvimento dos testes.....	51
Figura 4.1.1 – Cuba de trabalho utilizada nos testes de PMEDM.....	52

Figura 4.1.2 - Sistema de agitação por tubos. Hipótese verificada durante o trabalho.....	53
Figura 4.1.3 - Esquema do comportamento da corrente de descarga segundo modo de atuação do gerador de pulsos retangulares.....	55
Figura 4.1.4 – Representação esquemática do corpo de prova (aço H13).....	56
Figura 4.1.5 – Representação dos tempos de retração R e eletroerosão U.....	58
Figura 4.2.1 – Foto do equipamento OLYMPUS BX60	59
Figura 4.2.1.2 – Foto do equipamento OLYMPUS BX60	60
Figura 4.2.1.3 – Foto do equipamento JSM-6360LV	61
Figura 5.1 – Análise da rugosidade do processo de PMEDM.....	65
Figura 5.1.1 – Aspecto visual das superfícies utilizando o processo de PMEDM , a) com utilização de pó de silício, b) com utilização de pó de manganês.....	65
Figura 5.2 – Micrografia da seção transversal do aço H13 após processo de EDM.....	68
Figura 5.2.1 – Variação da microdureza Vickers [HV] após usinagem com pó de silício no processo de EDM.....	69
Figura 5.2.2 – Variação da microdureza Vickers [HV] após usinagem com pó de manganês no processo de EDM.....	69
Figura 5.3.1– Micrografia da seção transversal do aço H13 após usinagem convencional do processo de EDM. Correntes i_e de 2 A e 6 A.....	73
Figura 5.3.2 – Micrografia da seção transversal do aço H13 após usinagem com pó de silício no processo de PMEDM. Concentração de 5 g/l e corrente i_e de 2 A.....	74
Figura 5.3.2.1 – Micrografia da seção transversal do aço H13 após usinagem com pó de silício no processo de PMEDM. Concentração de 5 g/l e corrente i_e de 6 A.....	75
Figura 5.3.2.2 – Micrografia da seção transversal do aço H13 após usinagem com pó de silício no processo de PMEDM. Concentração de 15 g/l e corrente i_e de 2 A e 6 A.....	76
Figura 5.3.3 – Micrografia da seção transversal do aço H13 após usinagem com pó de manganês no processo de PMEDM. Concentração de 5 g/l e corrente i_e de 2 A.....	77
Figura 5.3.3.1 – Micrografia da seção transversal do aço H13 após usinagem com pó de manganês no processo de PMEDM. Concentração de 5 g/l e corrente i_e de 6 A.....	78
Figura 5.3.3.2 – Micrografia da seção transversal do aço H13 após usinagem com pó de manganês no processo de PMEDM. Concentração de 10 g/l e corrente i_e de 2 A e 6 A.....	79
Figura 5.4.1 – Microscopia (MEV) do pó de silício.....	81
Figura 5.4.1.1 – Microscopia (MEV) do pó de manganês.....	82

Figura 5.4.2 – Microscopia (MEV) da amostra 1, usinada com pó de silício com concentração de 5 g/l e corrente i_e de 2 A.....	83
Figura 5.4.2.1 – Microscopia (MEV) da amostra 2, usinada com pó de silício com concentração de 15 g/l e corrente i_e de 2 A.....	84
Figura 5.4.2.2 – Microscopia (MEV) da amostra 3, usinada com pó de manganês com concentração de 5 g/l e corrente i_e de 6 A.....	85
Figura 5.4.2.3 – Microscopia (MEV) da amostra 4, usinada com pó de manganês com concentração de 10 g/l e corrente i_e de 6 A.....	86
Figura 5.4.2.4 – Microscopia (MEV) da amostra 5, usinada com o processo convencional de EDM (corrente i_e de 2 A).....	87
Figura 5.5.1 – EDS da amostra 5, usinada com o processo convencional de EDM (corrente i_e de 2 A).....	88
Figura 5.5.1.2 – Espectro EDS da amostra 5 (ponto 1), usinada com o processo convencional de EDM (corrente i_e de 2 A).....	88
Figura 5.5.2 – EDS da amostra 1, usinada com pó de silício com concentração de 5 g/l e corrente i_e de 2 A.....	89
Figura 5.5.2.2 – Espectro EDS da amostra 1 (ponto 1), usinada com pó de silício com concentração de 5 g/l e corrente i_e de 2 A.....	89
Figura 5.5.3 – EDS da amostra 2, usinada com pó de silício com concentração de 15 g/l e corrente i_e de 2 A.....	90
Figura 5.5.3.2 – Espectro EDS da amostra 2 (ponto 1), usinada com pó de silício com concentração de 15 g/l e corrente i_e de 2 A.....	90
Figura 5.5.4 – EDS da amostra 3, usinada com pó de manganês com concentração de 5 g/l e corrente i_e de 6 A.....	91
Figura 5.5.4.2 Espectro EDS da amostra 3 (ponto 1), usinada com pó de manganês com concentração de 5 g/l e corrente i_e de 6 A.....	91
Figura 5.5.5 – EDS da amostra 4, usinada com pó de manganês com concentração de 10 g/l e corrente i_e de 6 A.....	92
Figura 5.5.5.2 Espectro EDS da amostra 4 (ponto 1), usinada com pó de manganês com concentração de 10 g/l e corrente i_e de 6 A.....	92
Figura 5.5.5.3 Espectro EDS da amostra 4 (ponto 2), usinada com pó de manganês com concentração de 10 g/l e corrente i_e de 6 A.....	93
Figura 5.6.1 – Difratoograma da amostra 1, usinada com pó de silício com concentração de 5 g/l e corrente i_e de 2 A.....	94

Figura 5.6.2 – Difratoograma da amostra 2, usinada com pó de silício com concentração de 15g/l e corrente i_e de 2 A.....	95
Figura 5.6.3 – Difratoograma da amostra 3, usinada com pó de manganês com concentração de 5 g/l e corrente i_e de 6 A.....	96
Figura ap 1.1 - Máquina Roboform 30 CNC.....	104
Figura ap 2.1 - Representação esquemática da peça eletroerodida e detalhe transversal da amostra para análise micrográfica.....	106

LISTA DE TABELAS

Tabela 4.1 - Composição química do Aço H13.....	54
Tabela 4.1.1 - Propriedades físicas do Aço H13.....	54
Tabela 4.1.2 - Propriedades mecânicas do Aço H13.....	55
Tabela 4.1.3 - parâmetros elétricos utilizados nos testes de rendimento.....	56
Tabela 4.1.4 - Especificações dos pós de silício e manganês.....	57
Tabela 4.3 - Parâmetros elétricos de processo de PMEDM.....	62
Tabela 5.1 - Comparativo entre a Rugosidade Ra com e sem a utilização de pó em suspensão no dielétrico.....	66
Tabela 5.2 - Valores de microdureza Vickers [HV] referente à camada resolidificada após usinagem com pó de silício.....	70
Tabela 5.2.1 - Valores de microdureza Vickers [HV] referente à camada resolidificada após usinagem com pó de manganês.....	71
Tabela 5.4.2 - Amostras definidas para a microscopia MEV.....	82

SIMBOLOGIA

Alfabeto Latino:

W_e	energia utilizada	[J]
V_w	taxa de remoção de material	[mm ³ /min]
V_e	taxa de desgaste	[mm ³ /min]
\hat{u}_i	tensão em aberto	[V]
u_e	tensão média da descarga	[V]
U	tensão média de trabalho	[V]
t_d	tempo de retardo de ignição	[μ s]
t_e	duração da descarga	[μ s]
t_i	duração do pulso de tensão	[μ s]
t_o	tempo de intervalo entre dois sucessivos pulsos de tensão t_i	[μ s]
t_p	tempo do período do ciclo de uma descarga	[μ s]
\hat{i}_e	corrente máxima durante a descarga	[A]
i_e	corrente média durante a descarga	[A]
R_a	média aritmética dos valores absolutos das ordenadas de afastamento dos pontos do perfil de rugosidade, em relação à linha média, dentro do percurso de medição	[μ m]
R_z	média aritmética dos cinco valores da rugosidade parcial Z_i	[μ m]

Alfabeto Grego:

ϑ	desgaste volumétrico relativo
τ	relação de contato

EDM	Electrical Discharge Machining
PMEDM	Powder Mixed Electrical Discharge Machining
EDS	Espectrometria de Energia Dispersa de raio-X
DRX	Difração de raio X

RESUMO

O processo de eletroerosão mais conhecido como EDM (Electrical Discharge Machining) é um dos métodos mais utilizados para a confecção de componentes de geometrias complexas. Estes componentes podem ser aplicados desde produtos como eletrodomésticos até veículos e aviões. Juntamente com a capacidade do processo de EDM possibilitar a usinagem de geometrias complexas, existe também a necessidade de se obter superfícies com uma alta qualidade superficial. Quando se fala em qualidade superficial no processo de EDM, o principal aspecto que deve ser analisado é a formação da camada resolidificada após a usinagem da peça. A camada resolidificada é a porção do material que é fundido e logo após solidificado na superfície da peça durante o processo de EDM, formando uma espécie de revestimento com propriedades diferentes do material base. Com a formação de uma camada resolidificada uniforme com características como baixa rugosidade e maior dureza, processos posteriores como tratamentos superficiais e revestimentos poderiam ser eliminados, pois estes processos agregam um maior custo e tempo para a conclusão de um determinado componente. Uma forma de melhorar a integridade superficial da peça durante a usinagem por EDM é a utilização de pós em suspensão no fluido dielétrico, processo conhecido como PMEDM (Powder Mixed EDM). Com a utilização de pós em suspensão no dielétrico o processo de EDM se torna mais estável proporcionando condições satisfatórias para a formação de uma camada resolidificada uniforme. O objetivo deste trabalho foi avaliar a influência de pós de silício e manganês em suspensão no dielétrico na formação da camada resolidificada, com o intuito de se obter uma camada uniforme sem a presença de microtrincas e poros, atuando como uma espécie de revestimento. Os melhores resultados foram obtidos com a utilização de pós de silício em suspensão no dielétrico, onde apresentou uma grande influência na camada resolidificada. No caso do silício a rugosidade da peça melhorou em até cinco vezes comparado com o processo convencional de EDM, e uma superfície uniforme com uma espessura constante sem a presença de microtrincas foi obtida. Com a utilização de pós de silício e manganês um aumento de dureza da camada resolidificada em torno de 40% foi atingida. Os dois pós silício e manganês apresentaram a formação de carbeto (SiC e MnC) conforme análise de DRX das amostras avaliadas. Para ambos os pós, silício e manganês, foram observadas influências em termos da camada resolidificada quando comparado ao processo convencional de EDM.

ABSTRACT

The electrical discharge machining (EDM) is the main methods used to produce components of complex geometries of several kinds of products. These components can be applied since products like an appliance as vehicles and airplanes. Jointly with the capacity of the EDM process manufacture complex geometries, a high surface quality is needed too. Regarding the surface quality, the most important is the formation of the white layer after the EDM machining. The white layer is the top layer of the workpiece, where the material has been molten but not removed and after has been resolidified, forming a kind of coating layer with different proprieties compared than the base material. When a uniform white layer is activated with characteristics like low roughness and high hardness, subsequent process like superficial treatments should be eliminated, reducing cost and time during the development of a specific component. One way to improve the surface quality of the workpiece is the addition of powder particles in the dielectric fluid, this process is called powder mixed EDM (PMEDM). With the addition of powders the process became more stable providing satisfactory conditions to active an uniform white layer. The aim of this research is to evaluate the influence of powder particles of silicon and manganese in suspension in the dielectric fluid on the surface quality (formation of the white layer), in order to obtain a white layer without micro-cracks and pores, acting like a kind of coating layer. The best results were obtained with the silicon powder in suspension in the dielectric fluid, showing a positive influence on the formation of the white layer. With the use of silicon powder, the roughness was improve around five times when compare to that obtained with the conventional EDM process and a uniform white layer was formed a long the workpiece without micro-cracks and pores. The use of silicon and the manganese powder provided an increase in the surface hardness, around 40 % compared than the conventional EDM process. The use of the both powders, Silicon and Manganese, presented influences in terms of white layer when compared to the conventional EDM process.

Key words: Powder Mixed EDM, silicon powder, manganese power, white layer, surface quality.

CAPÍTULO I

INTRODUÇÃO

O processo de eletroerosão mais conhecido como EDM (Electrical Discharge Machining) é um dos métodos mais utilizados para a fabricação de componentes de geometria complexas. Estes componentes podem ser aplicados desde produtos como eletrodomésticos até veículos e aviões. Atualmente o projeto de um determinado produto exige uma grande velocidade de desenvolvimento, e juntamente com esta velocidade está atrelado o custo do produto, com o correto conhecimento da tecnologia do processo de eletroerosão é possível reduzir tempo e custo durante o desenvolvimento de um determinado componente.

Com o processo de EDM é possível usinar formas complexas e variadas, isto explica sua grande utilidade na confecção de componentes de geometria complexos. Apesar de ser um processo bastante utilizado, muitas pesquisas vem sendo realizadas com o objetivo de melhorar a eficiência do processo de EDM. Este processo é dividido basicamente em duas fases: desbaste e acabamento. A fase de desbaste requer uma alta eficiência, sem se importar muito com o acabamento superficial, já a fase de acabamento requer uma superfície com características como: baixa rugosidade, alta resistência a corrosão, elevada dureza, entre outros. Conforme relatado por Zhao – (2002) um dos principais pontos de melhoria quando se fala do processo de EDM é o acabamento da superfície usinada.

Uma forma de melhorar a integridade superficial das peças eletroerodidas é a utilização de pós em suspensão no fluido dielétrico. A adição de partículas suspensas no fluido dielétrico apresentam influências positivas no processo de EDM [Wong – 1998]. O processo de EDM com a utilização de pós em suspensão também é conhecido como (PMEDM – Powder Mixed EDM), e sua principal aplicação é para processos de acabamento, com o intuito de melhorar a integridade superficial da peça.

Quando se fala em qualidade superficial em usinagem por EDM, o principal aspecto que deve ser analisado é a formação da camada resolidificada, que é a camada mais externa da peça, é a camada formada pelo material resolidificado que não foi removido durante o processo de EDM. Com a utilização de pós em suspensão no dielétrico é possível obter características satisfatórias para a qualidade superficial da peça. Elementos como Ni, Cr ou W proporcionam um aumento de dureza do material, quanto elementos como Fe, Mn e Si podem ser utilizados para garantir uma camada resolidificada mais uniforme e com menos microtrincas [Stevens – 1998].

O presente trabalho investigou a influência de dois tipos de pós no fluido dielétrico: pó de silício e manganês, na camada resolidificada após usinagem por EDM do aço H13, um dos materiais mais utilizados na confecção de moldes e matrizes. O objetivo deste trabalho foi avaliar a influência de pós de silício e manganês em suspensão no dielétrico na formação da camada resolidificada, em termos de: rugosidade, presença de microtrincas e poros, integridade da camada, microdureza, composição química e as fases presentes nesta camada com o intuito de se obter uma camada uniforme sem a presença de microtrincas e poros, atuando como uma espécie de revestimento. Baseado em trabalhos de pesquisa citados no Capítulo III, o pó de silício foi escolhido por apresentar bons resultados em processos de EDM com pó em suspensão. Outra vantagem do pó de silício para o trabalho em questão é sua baixa massa específica ($2,33 \text{ g/cm}^3$), fator importante para promover a suspensão deste pó no dielétrico garantindo uma concentração uniforme na cuba de trabalho. Para efeitos de comparativo o pó de manganês também será avaliado, ao contrário do silício o manganês apresenta uma maior massa específica ($7,47 \text{ g/cm}^3$). Outro motivo que levou a escolha do pó de manganês foi o pequeno número de trabalhos relacionados a este material. No trabalho realizado por Stevens (1998) não foram encontrados resultados satisfatórios, provavelmente devido ao tamanho de partícula de manganês utilizado neste trabalho, em torno de $60 \mu\text{m}$, que influenciou negativamente no processo de PMEDM. No trabalho em questão será utilizado pó de manganês com partículas inferiores a $10 \mu\text{m}$.

Como o processo de EDM possui muitos parâmetros, desde parâmetros elétricos como: corrente de descarga, duração de pulso, intervalo de pulso, etc, e parâmetros não elétricos como: material do eletrodo, material da peça, fluido dielétrico, entre outros, foram definidos como variáveis do processo a corrente de descarga i_e e a concentração de pó no dielétrico. Para a definição dos parâmetros do processo, foram tomados como base trabalhos de pesquisa relacionados ao processo de PMEDM, citados no decorrer deste trabalho.

CAPÍTULO II

FUNDAMENTOS DO PROCESSO DE ELETROEROSÃO POR FAÍSCAS

Neste capítulo são abordados os fundamentos do processo de usinagem por descargas elétricas (*Electrical Discharge Machining – EDM*). No início deste capítulo o enfoque será sobre algumas generalidades da eletroerosão por faíscas, e também uma breve descrição da máquina de eletroerosão por penetração. Na seqüência deste capítulo também são apresentados os fundamentos do fenômeno físico de uma descarga, os principais parâmetros do processo de EDM e quais as suas influências.

Este Capítulo servirá como base para o entendimento do Capítulo III, onde serão apresentadas as generalidades de trabalhos já realizados relacionados ao processo de PMEDM (Powder Mixed EDM), que é o foco principal deste trabalho.

2.1 Generalidades do processo de eletroerosão

O processo de eletroerosão, mais conhecido como “*electrical discharge machining*” (EDM) é um dos processos mais conhecidos quando se fala em métodos não convencionais de usinagem. O processo EDM torna possível a usinagem de qualquer material que possua condutividade elétrica, independentemente de sua dureza, geometria e outras propriedades, segundo relata Zeid (1997). Conforme Kansal (2006), no processo de EDM não existe o contato entre a ferramenta e a peça usinada, tornando possível a usinagem de materiais frágeis, não havendo risco de distorções e quebras na peça.

Desde a invenção do processo de EDM em 1940, muitos esforços vêm sendo feitos para aumentar o desempenho e estabilidade do processo de EDM. A estabilidade do processo é o principal fator para promover uma remoção de material controlada durante a usinagem [Luo - 1997]. Demandas por usinagem de precisão proporcionando baixa rugosidade e altas taxas de remoção vêm sendo cobradas nas indústrias, visando à confecção de moldes e ferramentas, de Luo (1997).

Os primeiros equipamentos para aplicações industriais do princípio de eletroerosão datam do período compreendido entre a Primeira e a Segunda Grande Guerra Mundiais, sendo utilizadas basicamente para a remoção de brocas e ferramentas de rosqueamento [Konig & Klocke - 1997]. Os equipamentos utilizados para este trabalho eram totalmente rudimentares

e de difícil operação, e durante o processo ocorriam uma grande geração de arcos e curtos-circuitos.

No final da década de 1940 surgiu a primeira aplicação industrial aperfeiçoada de um equipamento de eletroerosão [Heuvelman – 1969]. Neste equipamento faíscas elétricas eram produzidas entre dois eletrodos submersos em fluido de trabalho por meio de um gerador de descargas elétricas (circuito de relaxação RC) batizado como circuito Lazarenko, conforme representada na figura 2.1.

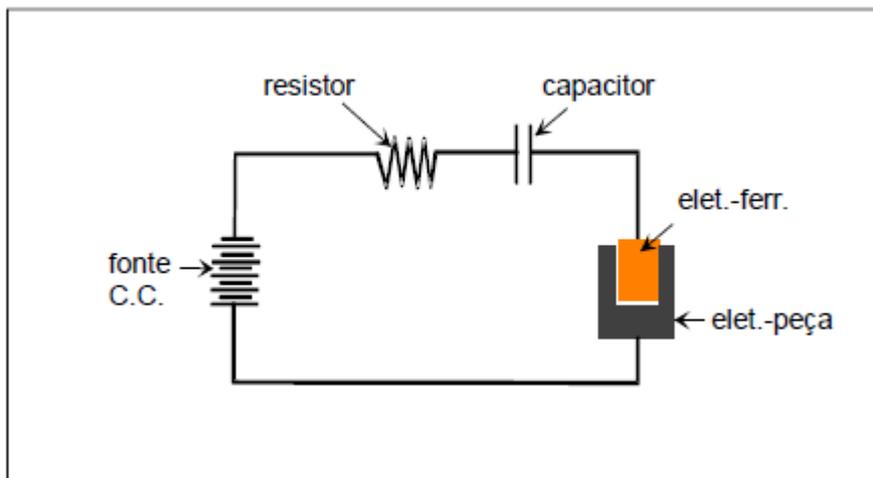


Figura 2.1 – Esquema simplificado do circuito de Lazarenko, König & Klocke (1997)

O gerador de relaxação funciona como um circuito oscilatório. Nele, a corrente de descarga e a tensão de trabalho se invertem periodicamente até o descarregamento quase total da energia elétrica armazenada nos capacitores. Por esse motivo, ou seja, ausência de cargas elétricas residuais nos eletrodos, o gerador de relaxação promove a obtenção de superfícies com um alto grau de acabamento. Isto se deve à diminuição ou mesmo eliminação da formação de arcos elétricos e curtos-circuitos entre os eletrodos durante a usinagem.

Com a máquina de Lazarenko foi possível realizar um controle de tempo de pulsos de tensão, fato que levou à descoberta que certas distâncias entre os eletrodos ocasionavam melhores taxas de remoção de material da peça [Charmilles – 1995 e Poço – 1994]. Outra inovação da máquina de Lazarenko foi à introdução de um circuito simples de controle de servomecanismos do avanço do eletrodo-ferramenta, que proporcionou o controle da distância de trabalho entre os eletrodos.

Atualmente os equipamentos de EDM CNC utilizam geradores de pulsos estáticos isoenergéticos ou isofrequentes, que significam controle do tempo do pulso de tensão e controle da duração de descarga elétrica. Os equipamentos atuais apresentam uma grande

flexibilidade de programação e possuem complexos sistemas para garantir a estabilidade do processo [Charmilles – 1995].

As operações de eletroerosão (EDM) podem ser divididas em dois tipos básicos: a eletroerosão por penetração e a eletroerosão a fio, como podem ser vistos na representação esquemática da figura 2.1.2. Na eletroerosão por penetração o eletrodo-ferramenta tem a forma da geometria da peça que se deseja usinar, transmitindo a sua imagem para o eletrodo-peça. No processo de eletroerosão a fio, uma bobina que se desenrola continuamente durante o processo serve como eletrodo, sendo a peça produzida pelo movimento relativo ente o fio e a peça.

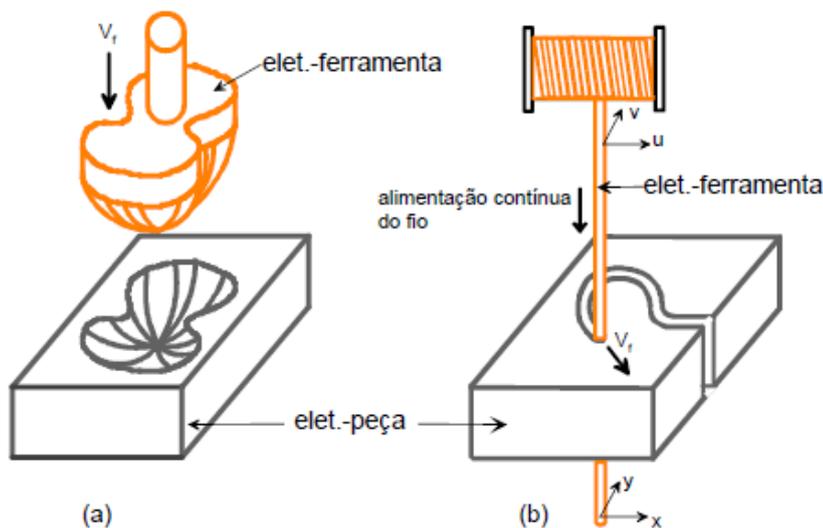


Figura 2.1.2 – Representação esquemática da (a) eletroerosão por penetração, (b) eletroerosão a fio, König & Klocke (1997).

2.2 Fundamentos do fenômeno físico de uma descarga

O processo de eletroerosão se trata de um complexo fenômeno que utiliza faíscas elétricas com o intuito de remover material da superfície da peça. Várias tentativas já foram estudadas para explicar este fenômeno, mas a mais aceita entre os pesquisadores é a termoelétrica. O ciclo de uma descarga elétrica entre dois eletrodos submersos em um líquido de trabalho pode ser representado pela figura 2.2, possuindo quatro fases, sendo elas:

1. Fase de ignição da faísca;
2. Formação do canal de plasma;
3. Fusão e evaporação de uma pequena quantidade de material nos eletrodos;

4. Ejeção do material fundido.

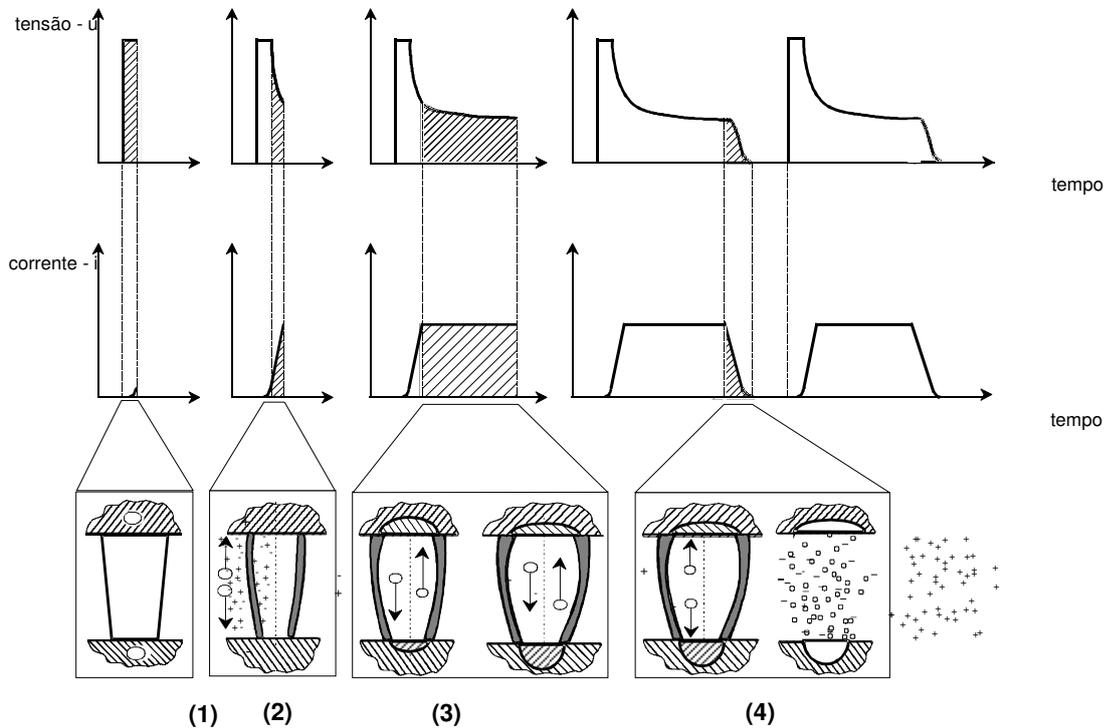


Figura 2.2 - Fases de uma descarga elétrica no processo de EDM, (AMORIM, 2001).

2.2.1 Fase de ignição

Nesta etapa os eletrodos são aproximados e separados entre si por uma pequena distância. Uma tensão em aberto U_i é aplicada entre os eletrodos. Nesta etapa não há fluxo de corrente, pois existe a resistência do fluido dielétrico. Com o intuito de vencer a rigidez do dielétrico o eletrodo-ferramenta é aproximando ao eletrodo-peça, causando um aumento do campo elétrico (E) entre a superfície dos dois eletrodos.

Com a tensão aplicada entre os eletrodos o campo elétrico (E) é gerado, e a partir do ponto onde o gradiente de tensão é máximo, geralmente nos pontos mais altos referente à superfície dos eletrodos, elétrons são emitidos pelo cátodo (-) e atraídos para o ânodo (+) através do dielétrico. Estes elétrons primários colidem com átomos neutros do dielétrico. Como consequência esses átomos provenientes do fluido dielétrico são divididos em íons e elétrons, ver representação na figura 2.2.1 [Stevens - 1997].

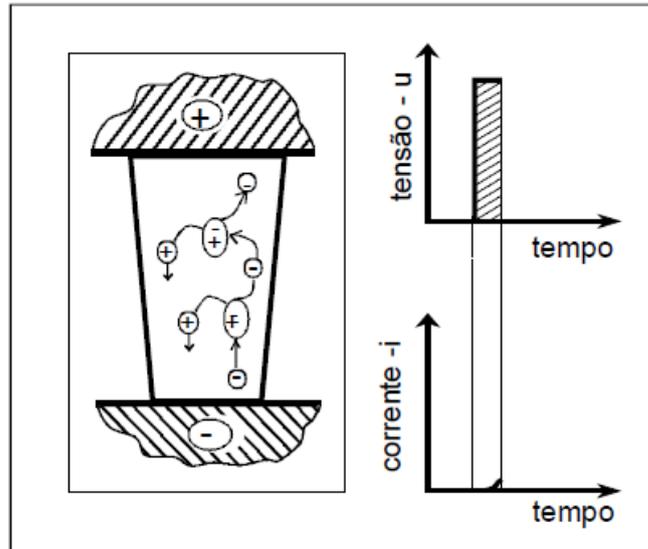


Figura 2.2.1 – Representação esquemática da fase de ignição do processo de EDM.

2.2.2 Formação do canal de plasma

Nesta etapa a formação do canal de plasma pode ser notada, pois devido ao aumento do campo elétrico (E) a rigidez do fluido dielétrico é “quebrada”. O canal de plasma é circundado por uma bolha de vapor e pelo líquido dielétrico que restringe o crescimento do canal, que concentra a energia de descarga em um pequeno volume.

Segundo Stevens (1998) nesta etapa os íons positivos presentes no dielétrico são atraídos para o cátodo (-), e com o aquecimento do cátodo alguns eletros livres são liberados. Estes elétrons liberados movem-se em direção ao ânodo (+) e se dividem em mais átomos neutros. A corrente, criada pelos elétrons e íons aumenta drasticamente iniciando um aquecimento localizado no dielétrico. A resistência elétrica do dielétrico diminui e a corrente entre o eletrodo-ferramenta e o eletrodo-peça aumenta, sendo que todo esse resultado funciona como uma espécie de “avalanche”. O dielétrico continua aquecendo gerando um canal de plasma, apresentando características como alta pressão e temperatura. Na figura 2.2.2 pode ser visto uma representação esquemática da formação do canal de plasma do processo de EDM.

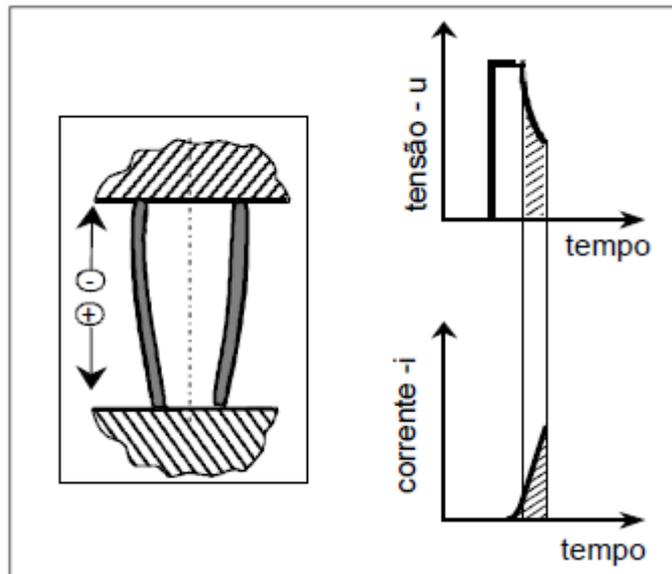


Figura 2.2.2 – Representação esquemática da fase de formação do canal de plasma do processo de EDM.

2.2.3 Fusão e evaporação do material nos eletrodos

O canal de plasma é mantido por um determinado tempo no processo de EDM. Durante este tempo o ânodo e o cátodo são bombardeados constantemente por elétrons e íons. Com a colisão do elétron ou íon na superfície do eletrodo, a energia cinética proveniente do movimento dos elétrons ou íons é transformada em calor. Este calor gerado na superfície dos eletrodos provoca a fusão do material e conseqüentemente a evaporação do material da superfície da peça. A quantidade de material que é removido depende da intensidade da corrente de descarga e do tempo de descarga [Stevens – 1997].

Uma importante diferença quando se fala em elétrons e íons é a diferença de massa entre os dois. Os íons de metais são bem mais pesados que os elétrons. Mas devido à grande inércia dos íons, estes levam mais tempo para atingir certa velocidade. Entretanto, quando curtos tempos de descarga são estabelecidos, são os elétrons que promovem um alto aquecimento enquanto uma quantidade limitada de íons colide com o cátodo. Para os íons causarem um aquecimento considerável é necessário mais tempo para ele atingir uma maior velocidade. Geralmente em processos de EDM por penetração o eletrodo ferramenta geralmente é estabelecido como ânodo, pois normalmente longos tempos de descargas são utilizados, tempo suficientes para acelerar os íons em direção ao eletrodo-peça (cátodo -) promovendo a remoção do material.

No decorrer da duração da descarga, o raio a_c do plasma na região próxima ao cátodo apresenta-se praticamente constante e bem inferior ao raio a_a , observado na região próxima ao ânodo, figura 2.2.3. Acredita-se que esta menor magnitude de a_c se deve principalmente à emissão de elétrons pelo cátodo, onde se estima raio da ordem de $a_c < 5 \mu\text{m}$, ao passo que no ânodo o raio a_a aumenta continuamente durante a evolução da duração da descarga.

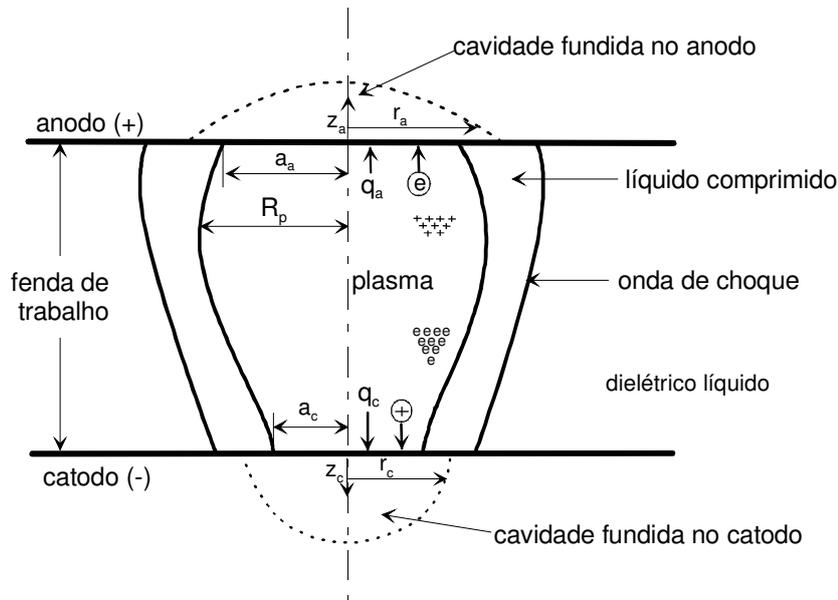


Figura 2.2.3 - Representação esquemática da faísca elétrica, destacando a forma do canal de plasma. O fluxo de calor nas superfícies do cátodo e do ânodo está representado por q_c e q_a , sendo r_a e r_c os raios das cavidades fundidas no ânodo e cátodo (DIBITONTO ET. AL 1989).

O fenômeno de expansão contínua do diâmetro do canal de plasma acontece pelo fato do plasma transferir energia para as regiões radiais circunvizinhas, assim como para as cavidades fundidas. A cada incremento no tempo da descarga, a irradiação de energia do plasma provoca a vaporização, a dissociação e a ionização de um pequeno volume de dielétrico, causando com isso um aumento da massa do plasma. O raio do plasma (R_p) aumenta com o tempo devido à alta pressão interna do plasma que força a expansão radial do líquido dielétrico circundante. A energia total de uma descarga elétrica é dividida em três parcelas, e pode ser estimada da seguinte forma: a primeira parcela de 18 % é consumida na fusão de material no cátodo, a segunda de 8 % destina-se ao ânodo, e os 74 % restantes são gastos no aumento da massa e do diâmetro do canal de plasma no fenômeno de conversão do dielétrico líquido circundante em plasma.

2.2.4 Ejeção do material fundido

Ao final do tempo de descarga t_e especificado, o sistema de controle do gerador da máquina interrompe instantaneamente a corrente elétrica, estabelecendo um tempo de intervalo t_o até o início de um novo ciclo de descarga, neste instante ocorre à expulsão do material fundido das cavidades dos eletrodos.

O principal mecanismo responsável pela remoção de material no processo de eletroerosão está associado ao fenômeno de superaquecimento do material fundido nas cavidades dos eletrodos. Este mecanismo foi inicialmente sugerido por Van Dijck (1973) sendo posteriormente comprovado, pela primeira vez, no trabalho de Eubank et al. (1993) e pode ser resumidamente discutido da seguinte forma: durante o tempo de aplicação da descarga, as superfícies das cavidades fundidas nos eletrodos apresentam temperaturas próximas àquelas de ebulição dos materiais. Entretanto, pouco material é evaporado devido à alta pressão exercida pelo plasma sobre as cavidades. Com a interrupção da descarga, e o conseqüente colapso do canal de plasma e da bolha de vapor por causa da queda brusca de pressão, são geradas forças associadas ao fenômeno do superaquecimento com intensidade suficiente para separar bruscamente o material fundido das paredes das cavidades, gerando uma pequena cratera nas superfícies dos eletrodos. Uma parte do material expelido é carregada pelo fluxo do dielétrico para fora da fenda de trabalho, e a outra parte se solidifica na própria cratera e em regiões vizinha, constituindo nos aços a camada superficial chamada camada branca ou camada resolidificada, como mostra a figura 2.2.4.

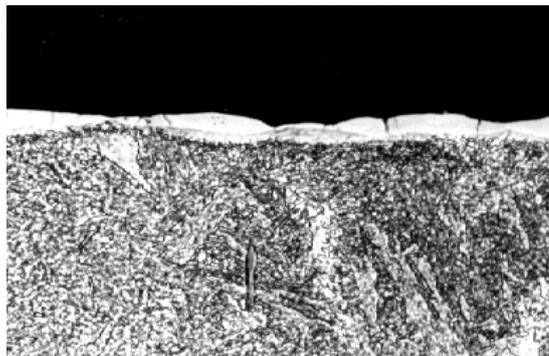


Figura 2.2.4 – Camada branca, Klocke & Karden (1999)

Em se tratando das partículas eletroerodidas que são expelidas da fenda de trabalho, nota-se que a maioria delas apresenta a forma de pequenas esferas sólidas ou ocas. A geometria esférica sólida é devida à expulsão de material no estado líquido, e as esferas ocas

correspondem ao material expulso na forma de bolhas, que rapidamente se solidificam ao entrar em contato com o dielétrico. (LHIUBET, 1981).

É importante acrescentar que outros mecanismos de origem hidrodinâmica, termodinâmica e elétrica, bem como as propriedades físicas dos materiais, a polaridade dos eletrodos e outros parâmetros de processo, apresentados a seguir, também exercem importante influência na parcela de material removido no ciclo de uma descarga no processo de EDM (KÖNIG, 1997).

2.3 Principais parâmetros de controle do Processo

Um resumo dos principais parâmetros de controle do processo é apresentado na Figura 2.3.

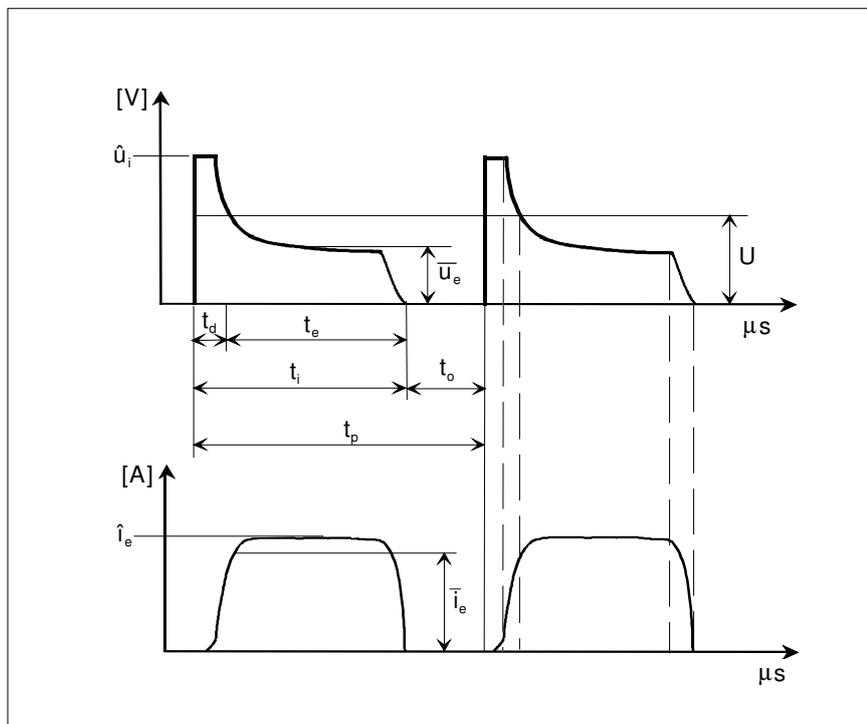


Figura 2.3 - Evolução da tensão e corrente elétricas durante a descarga de uma faísca, apresentando em destaque os principais parâmetros de controle do processo.

\hat{u}_i - tensão em aberto [V]

\bar{u}_e - tensão média da descarga [V]

U - tensão média de trabalho [V]

t_d - tempo de retardo de ignição [μs]

t_e - duração da descarga [μs]

t_i - duração do pulso de tensão ($t_d + t_e$) [μs]

t_o - tempo de intervalo entre dois sucessivos pulsos de tensão t_i [μ s];

t_p - tempo do período do ciclo de uma descarga [μ s]

\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 [μ s].

A energia da descarga, que significa a energia fornecida por uma faísca à fenda de trabalho, é simplificada representada por $W_e \approx u_e \cdot \bar{i}_e \cdot t_e$ [J] e determina o volume de material removido por descarga e também a qualidade do acabamento superficial.

2.3.1 Outras considerações sobre o processo de EDM

Em se tratando da eletroerosão por penetração em operações de desbaste e acabamento, os seguintes comentários gerais podem ser relatados:

- Condições de desbaste - nos regimes mais energéticos, ou seja, com maiores níveis de corrente \hat{i}_e , as altas pressões e temperaturas do canal de plasma são mantidas por um maior período de tempo, isto é, mais longos são os tempos ótimos de duração da descarga. Por este motivo, normalmente se estabelece a polaridade positiva para o eletrodo-ferramenta (ânodo) e a negativa para o eletrodo-peça (cátodo). Em consequência, é gerado um aumento substancial de remoção de material na peça V_w e pouca remoção de material V_e no eletrodo-ferramenta. Desta forma, observa-se uma diminuição do desgaste volumétrico relativo ϑ , onde $\vartheta = V_e / V_w$.
- Condições de acabamento - nos regimes de acabamento o objetivo é obter baixos níveis de rugosidade. Deste modo, são empregadas baixas correntes de descarga \hat{i}_e , assim como também pequenos tempos de duração da descarga. Nestes casos é prática comum adotar a polaridade negativa (cátodo) para o eletrodo-ferramenta e a polaridade positiva (ânodo) para o eletrodo-peça. Assim, obtém-se a formação de crateras de pequenas dimensões nas peças, resultando, portanto, em menor rugosidade. Entretanto, é importante mencionar que para estas condições de polaridade ocorre um desgaste mais acentuado do eletrodo-ferramenta (AMORIM, 2001). Para os

experimentos realizados no trabalho em questão, a polaridade negativa do eletrodo-ferramenta foi utilizada na usinagem com a utilização de pós em suspensão no dielétrico.

Cabe também colocar que a escolha da polaridade dos eletrodos também depende das propriedades termofísicas dos materiais, sendo necessária a realização de ensaios experimentais a fim de se poder escolher adequadamente a combinação que produz os melhores resultados sobre o rendimento do processo de EDM.

CAPÍTULO III

FUNDAMENTOS DA UTILIZAÇÃO DE PÓS EM SUSPENSÃO NO DIELÉTRICO NO PROCESSO DE ELETROEROSÃO POR FAÍSCAS

Neste capítulo são abordados os fundamentos do processo de usinagem por descargas elétricas (*Electrical Discharge Machining - EDM*) com a utilização de pós em suspensão no dielétrico, conhecido como (PMEDM , *Powder Mixed EDM*). Este Capítulo será de fundamental importância para o entendimento dos materiais e métodos que serão apresentados no Capítulo IV.

3.1 O processo de EDM com pó em suspensão (PMEDM)

Uma forma de melhorar o processo de EDM para atender as exigências de uma superfície com uma alta qualidade é a utilização de pós em suspensão no fluido dielétrico, conforme relatos de Tzeng (2001). Este processo é conhecido como EDM com pós em suspensão (PMEDM – *Powder mixed EDM*). O uso de pós em suspensão no dielétrico pode melhorar o acabamento e a qualidade da superfície usinada, segundo relatos de Mohri(1991) e Wong (1998).

Segundo Tzeng (2001), a adição de pós em suspensão proporciona uma maior facilidade para romper a rigidez do fluido dielétrico, proporcionando um aumento da fenda de trabalho. A fenda de trabalho é o espaço compreendido entre o eletrodo-ferramenta e o eletrodo peça durante a descarga elétrica. Com o aumento da fenda de trabalho, a lavagem das partículas eletroerodidas torna-se mais uniforme, promovendo um processo de PMEDM mais estável.

O processo de PMEDM surgiu durante os anos setenta como uma técnica revolucionária para promover uma superfície polida e promover uma usinagem mais eficiente, segundo Erden (1980) e Jeswani (1981).

Muitos trabalhos relatam a utilização de pós em suspensão como uma forma de melhorar o processo de EDM, e não com o propósito de agregação das partículas de pó suspensas no dielétrico na superfície da peça.

Partículas de determinadas substâncias podem ser utilizadas em processos de EDM em duas principais formas:

- a-) Utilização de pós em suspensão;
- b-) Utilização de eletrodos fabricados com pós compactados.

A utilização de eletrodos de pós-compactados apresentam muitas dificuldades para a sua fabricação, principalmente quando se trata de geometrias mais complexas, problema que não ocorre com a utilização de pós em suspensão no fluido dielétrico, sendo que neste caso uma das maiores preocupações é garantir que o pó fique suspenso no fluido através de um agitador mecânico, conforme relatado por Stevens (1998).

De acordo com o trabalho de Kansal (2006), vários artigos vêm sendo publicados a fim de investigar os efeitos dos pós em suspensão no fluido dielétrico. No decorrer deste capítulo, serão apresentados os principais trabalhos já realizados com pós em suspensão no dielétrico.

3.2 Fundamentos do Processo de PMEDM

O processo de PMEDM apresenta um mecanismo diferente do processo convencional de EDM, segundo Zhao (2002). No processo de PMEDM partículas de um determinado material são misturadas no fluido dielétrico. Para proporcionar uma melhor circulação do pó no fluido, é necessário um sistema de agitação. Este sistema pode ser constituído de um eixo rotatório que faz com que o pó fique suspenso no fluido dielétrico. Um exemplo esquemático do processo de PMEDM pode ser visto na figura 3.2. Outro método de agitação do pó no fluido dielétrico é a utilização de bombas hidráulicas, com o intuito de gerar fluxos de corrente no dielétrico de modo a garantir uma concentração uniforme no interior da cuba de trabalho.

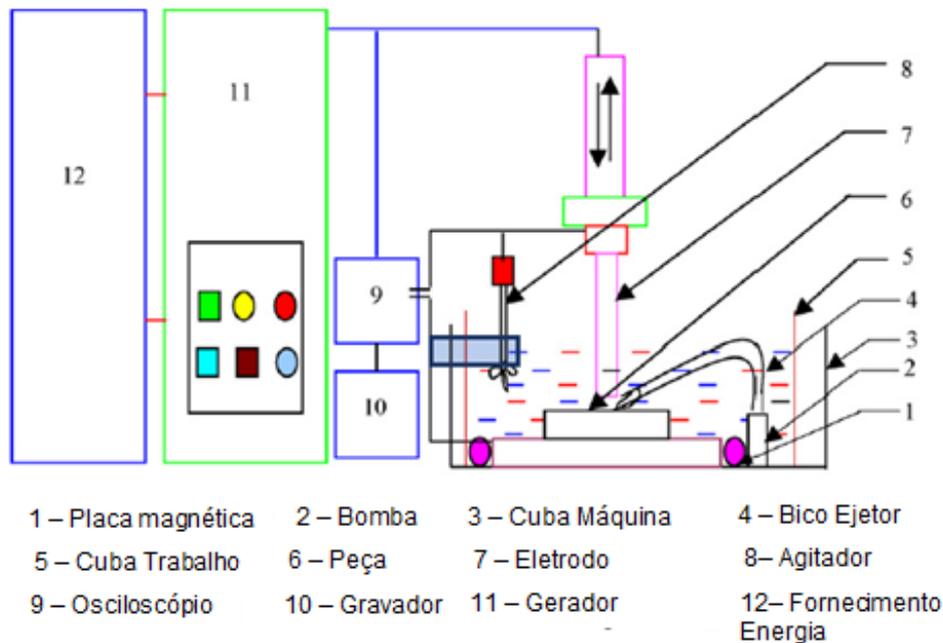


Figura 3.2 – Representação esquemática do processo de PMEDM,
 [Kansal & Sehijpal & Kumar – 2005]

A representação da figura 3.2 consiste em uma cuba de trabalho com um determinado volume. A cuba é posicionada no tanque de trabalho do equipamento de EDM, onde o sistema é preenchido com um fluido dielétrico. Quando utilizado pó em suspensão deve-se ter o cuidado de evitar a decantação deste pó no fundo da cuba, reduzindo a concentração de pó na região da fenda de trabalho. Para fazer com que o pó fique suspenso no fluido dielétrico um sistema de agitação pode ser adotado, como uma bomba, por exemplo. A bomba redireciona o pó presente no fluido dielétrico para a fenda de trabalho, mantendo uma alta concentração de pó na região do canal de plasma. Forças magnéticas podem ser utilizadas para separar as partículas eletroerodidas do fluido dielétrico com o intuito de diminuir a contaminação do dielétrico durante o processo, mas este sistema só pode ser utilizado se o pó presente no fluido dielétrico não possuir propriedades magnéticas, pois estes também seriam atraídos pelo campo magnético. Vários tipos de pós podem ser utilizados no fluido dielétrico, como: silício, manganês, alumínio, cromo, grafita, cobre ou carbetto de silício, entre outros, conforme estudos de Wong (1998).

Com a utilização de pó em suspensão, a fenda de trabalho é preenchida com uma determinada concentração de partículas do pó em suspensão. Após a aplicação de uma tensão entre o eletrodo-peça e o eletrodo-ferramenta, as partículas de pó tornam-se energizadas e apresentam um comportamento de “zig-zag”, conforme pode ser visto na figura 3.2.1.

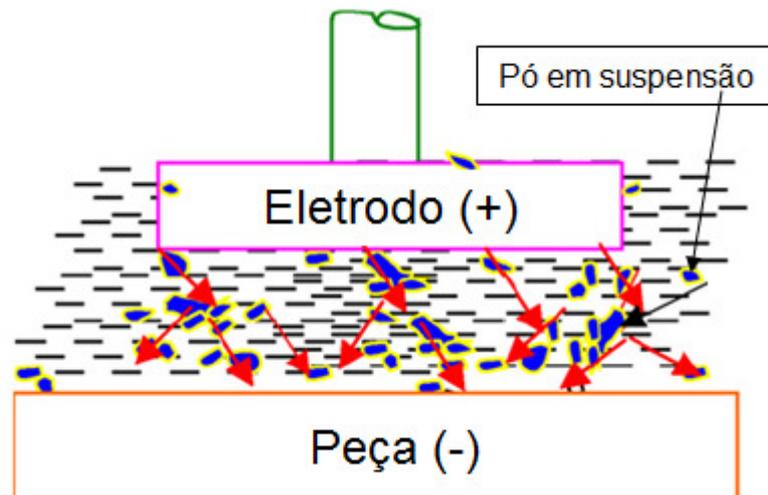


Figura 3.2.1 – Representação esquemática na fenda de trabalho durante o processo de PMEDM
[Kansal & Sehijpal & Kumar – 2005]

As partículas energizadas são aceleradas pelo campo elétrico e agem como condutores, promovendo a quebra da rigidez do fluido dielétrico e aumentando a distância da fenda de trabalho entre o eletrodo e a peça, de acordo com Kansal (2006).

Com a adição de pó em suspensão no dielétrico ocorrem mudanças no canal de plasma, o canal torna-se mais largo, conforme relatado por Zhao (2001). As descargas elétricas são uniformemente distribuídas ao longo das partículas dos pó, reduzindo assim a densidade das descargas elétricas. Devido à distribuição uniforme das descargas elétricas na superfície da peça, rasas crateras são produzidas, melhorando assim o acabamento superficial da peça.

3.3 A camada resolidificada (ou camada branca)

Devido à alta temperatura do processo de EDM, as camadas superficiais do processo de EDM sofrem modificações químicas e estruturais. De acordo com Stevens (1998) e Crookall ET AL. (1974) após a usinagem por EDM a camada mais externa da peça apresenta três regiões: a camada resolidificada ou camada branca, a zona termicamente afetada e a zona de tensão residual.

A camada resolidificada (*"white layer"*) ou camada branca pode ser notada na superfície após a usinagem por EDM. Nesta camada observa-se a presença de uma camada formada pela parte do material liquefeito durante as centenas de descargas elétricas e não expelido pela

lavagem do fluido dielétrico, o qual é resolidificado na própria cratera e em regiões vizinhas - constituindo nos aços a camada superficial denominada de camada resolidificada, como apresentado na figura 3.3. Esta camada apresenta mudanças químicas devido à interação com subprodutos do dielétrico e do próprio eletrodo-ferramenta, e modificações na sua estrutura por causa da rápida solidificação do material. Normalmente possui composição e estrutura bastante heterogêneas e apresenta propriedades mecânicas completamente diferentes daquelas encontradas no material base da liga. A camada resolidificada será o principal foco de estudo deste trabalho.

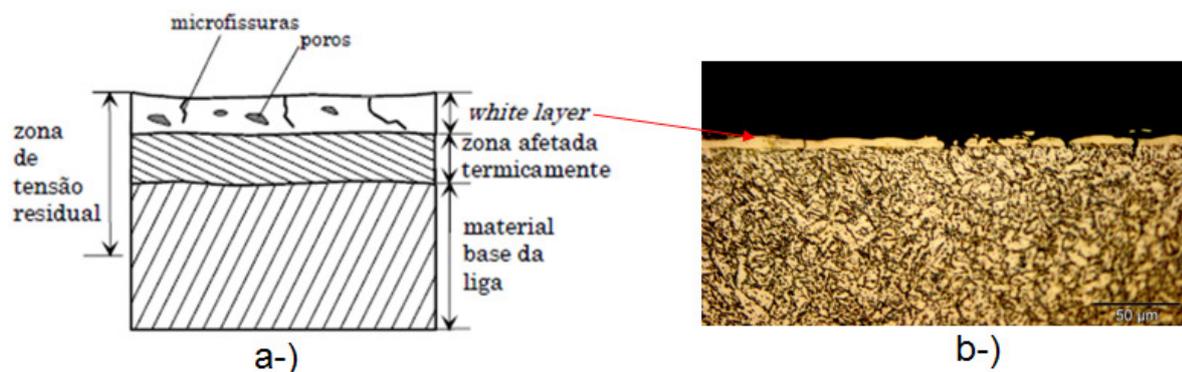


Figura 3.3 – Representação esquemática das camadas de uma peça após o processo de EDM. Na parte (b) pode ser observada a formação da camada branca.

No caso dos aços, quando as peças são usinadas em dielétrico de hidrocarboneto, a dureza e fragilidade dessa camada são bem superiores ao material base da liga. Estas características são creditadas à incorporação do carbono que interage quimicamente com o ferro dando origem à formação de cementita (Fe_3C) e também devido à rápida solidificação do material.

A adição de pó suspenso no fluido dielétrico irá afetar diretamente a camada resolidificada. Nesta camada o pó presente no fluido dielétrico pode proporcionar melhorias na integridade superficial da peça, como uma baixa rugosidade e uma dureza mais elevada comparada com o material base, por exemplo. Com o intuito de garantir uma formação uniforme da camada resolidificada uniforme, foi utilizado uma baixa corrente de descarga (i_e) com um grande tempo de usinagem, justamente para possibilitar que o material fundido na superfície da peça resolidificasse dando origem a uma camada branca com aspecto uniforme. É suposto que, devido a alta temperatura durante a descarga elétrica do processo de EDM as partículas em suspensão no dielétrico fundem-se parcialmente na superfície da peça, ficando

aderidas. Quando a próxima descarga ocorre, as partículas e a camada resolidificada são refundidas e misturadas, podendo gerar novas fases. [STEVENS, 1998].

Quando o eletrodo-peça (aço) é usinado com o processo convencional de EDM, dificilmente uma camada branca uniforme será gerada. Geralmente a camada branca apresenta uma grande quantidade de micro-trincas provenientes do processo de EDM. As microtrincas da camada resolidificada podem propagar-se para o interior da peça, comprometendo a durabilidade da mesma.

3.3.1 Zona termicamente afetada

Esta camada está situada logo abaixo da camada superficial. Uma importante diferença dessa camada é que a mesma não sofreu fusão. Entretanto, apesar de não haver contato com o dielétrico, o calor gerado pelo plasma é suficiente para promover modificações em sua estrutura e composição química devido ao fenômeno de difusão de átomos de áreas com maior concentração para aquelas de menor concentração atômica. A zona afetada termicamente é usualmente composta de várias camadas, quase sempre difíceis de ser diferenciadas. No caso dos aços, é observada, logo abaixo da camada superficial ("*white layer*"), a presença de uma camada temperada e depois desta uma camada revenida.

3.3.2 Zona de tensão residual

O alto gradiente de temperatura, promovido pelo ciclo de aquecimento e resfriamento do material durante a eletroerosão, ocasiona a formação de uma zona de tensão residual que parte da camada superficial até áreas bem próximas ao material base da liga. Essas tensões residuais podem causar micro-fissuras que sob carregamento da ferramenta podem se propagar até o material base.

3.4 Influência do pó em suspensão na camada resolidificada no processo de PMEDM

A utilização de pós em suspensão no dielétrico além de trazer melhorias para o processo de PMEDM também torna possível a agregação destes pós na superfície da peça. Para

isso baixos valores de corrente de descarga \hat{i}_e e duração de pulso t_i devem ser estabelecidos, pois regimes com a utilização de altas correntes de trabalho não proporciona bons resultados para a integridade superficial da peça. O principal fator em se tratando de agregação de pó proveniente do fluido dielétrico, é gerar uma camada resolidificada uniforme onde estas partículas sejam agregadas nesta camada. Para regimes de maiores potências, ou seja, maiores correntes de descarga \hat{i}_e , o material da superfície da peça será fundido, e logo após a descarga elétrica uma parcela deste material fundido será expelido da região da fenda de trabalho, eliminando a possibilidade de agregação.

Juntamente com os parâmetros descritos acima, o intervalo de pulso t_0 deve ser considerado. Valores curtos para o intervalo de pulso t_0 causam concentrações de descarga, tornando o processo de PMEDM instável, e também promove a remoção de material, diminuindo as chances de agregação do pó na superfície usinada. Para os experimentos do trabalho em questão será adotado um intervalo de pulso de 100 μ s.

Um ponto interessante levantado por Furutani (2000) foi uma correlação entre a duração do pulso com a corrente de descarga. De acordo com Furutani (2000), é possível agregar partículas do pó em suspensão, para menores valores de duração de pulso e corrente de descarga, conforme figura 3.4. A figura 3.4 corresponde à utilização de pó de titânio em suspensão no fluido dielétrico.

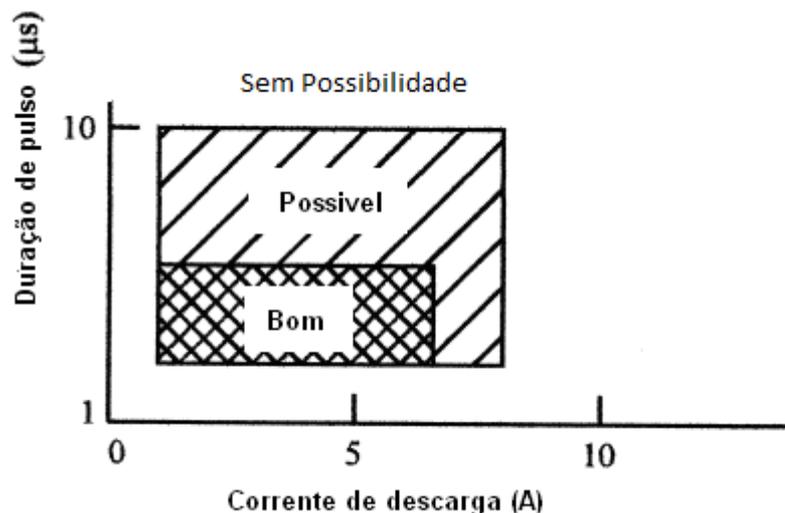


Figura 3.4 – Relação entre duração de pulso e corrente de descarga para possibilitar que partículas do pó sejam agregadas na peça, segundo Furutani (2000).

Segundo estudos de Furutani (2000) foi possível gerar uma camada resolidificada com a utilização de pó de titânio em suspensão no dielétrico. Esta camada foi gerada graças à utilização de polaridade negativa do eletrodo e baixos valores de duração de pulso e corrente de descarga. A influência da polaridade do eletrodo ferramenta será discutida no próximo tópico. Nos experimentos de Furutani (2000) uma camada em torno de 150 μm foi gerada, juntamente com um aumento de dureza, 1600 Hv na região afetada termicamente, contra uma dureza 240 Hv no material base da peça. Assim como uma alta corrente de descarga, altas durações de pulso podem promover um grande aquecimento na superfície da peça, gerando crateras profundas, e conseqüentemente a formação de uma camada resolidificada com um aspecto não uniforme e com vários poros e microtrincas.

3.5 Influência da polaridade do eletrodo-ferramenta

Outro fator importante para se obter a formação de uma camada resolidificada uniforme com possibilidade de agregação, é a polaridade de eletrodo. A fim de se obter uma alta qualidade superficial, a polaridade do eletrodo deve ser negativa, ou seja, o eletrodo será o cátodo (-) e a peça será o ânodo (+). Ao se inverter a polaridade do eletrodo, o canal de plasma proporciona uma menor densidade de descargas na face da peça, neste caso o ânodo (+), no decorrer do tempo a largura do canal de plasma vai aumentando no lado do ânodo (+), com o aumento da área do canal de plasma o material da superfície acaba sendo resolidificado e uma poça de fusão menos profunda é gerada. Devido à formação de uma poça de fusão menos profunda, a porção do material fundido que não foi expelido pela lavagem da peça, acaba se resolidificando na superfície da peça, dando origem a camada branca ou camada resolidificada. Com a polaridade negativa do eletrodo-ferramenta uma camada resolidificada mais uniforme é gerada.

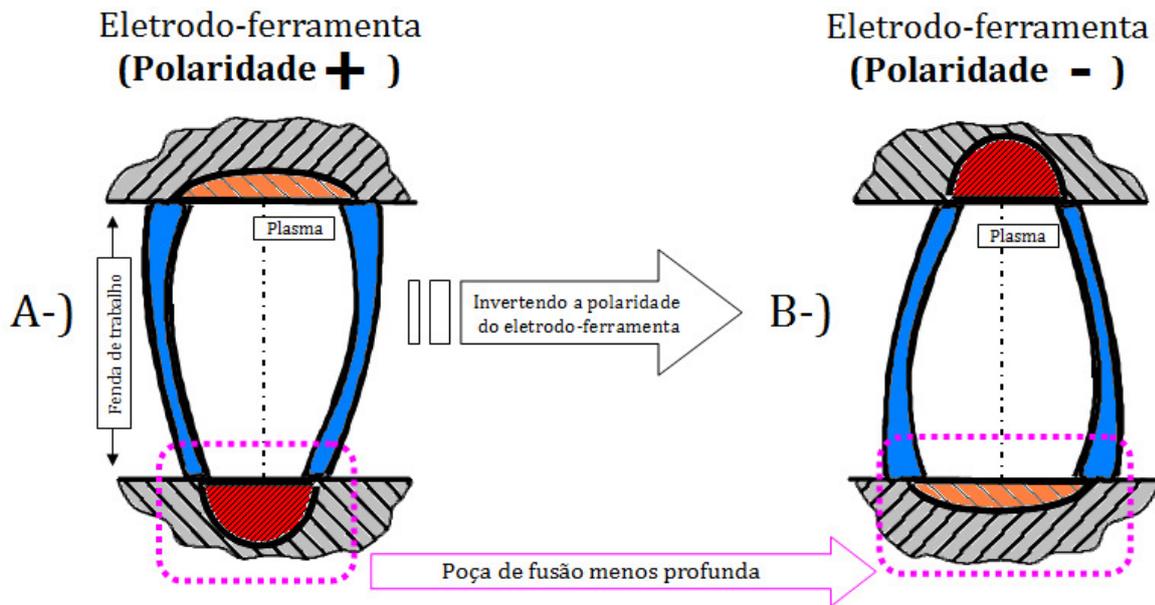


Figura 3.5 – Representação da polaridade do eletrodo-ferramenta. A-) Representação da polaridade positiva do eletrodo-ferramenta, e B-) Polaridade negativa.

Na figura 3.5 pode ser visto um comparativo entre as polaridades do eletrodo ferramenta. Como explicado anteriormente à polaridade negativa do eletrodo-ferramenta proporciona uma maior área do canal de plasma que incide sobre o eletrodo-peça, neste caso o ânodo (+). Com essa maior área de incidência a poça de fusão torna-se menos profunda, evitando que o material fundido na superfície seja expelido desta região, e sim sendo resolidificado dando origem à formação de uma camada branca ou camada resolidificada, apresentando um aspecto mais uniforme.

3.6 Trabalhos relacionados ao processo de PMEDM

Neste tópico serão apresentadas as principais pesquisas relacionadas à utilização de pós em suspensão no fluido dielétrico para melhoramento da integridade de superfície. Os estudos apresentados nesta seção foram utilizados como base para a definição dos materiais e parâmetros utilizados no trabalho em questão. Os trabalhos que serão apresentados visam à utilização de pós em suspensão para proporcionar melhorias superficiais na peça eletroerodida, como: melhor acabamento superficial, maior resistência mecânica, formação de uma camada resolidificada uniforme sem microtrincas e agregação de partículas de pó na superfície da peça.

Partículas suspensas no fluido dielétrico facilitam a ignição da descarga elétrica no processo de EDM devido à redução da rigidez do dielétrico. Pós em suspensão no dielétrico proporcionam um aumento da fenda de trabalho, melhorando o acabamento da superfície da peça, como resultado, o processo de EDM torna-se mais estável [Singh – 2005].

O efeito da utilização de pós no fluido dielétrico foi estudado inicialmente por Erden e Bilgin (1980). Segundo dados de Erden e Bilgin (1980), a taxa de remoção de material aumenta com o aumento da adição de pó no dielétrico, também foi observado que com a adição de impurezas no fluido dielétrico foi possível melhorar a ignição do processo de EDM. Apenas para evidenciar o efeito da adição de pós em suspensão no fluido dielétrico, pode ser mencionado o trabalho de Jeswani (1981), que investigou a influência da adição de 4g/l de pó de grafite em um fluido dielétrico (querosene), cujo efeito foi um aumento da taxa de remoção em torno de 60%, e uma redução do desgaste do eletrodo de 15%. O intuito do trabalho em questão não é avaliar a remoção de material dos eletrodos, mas sim a influência da utilização de pós em suspensão em regimes de acabamento na formação da camada resolidificada.

O processo de PMEDM trabalha com baixos valores de corrente e uma baixa duração de descarga, bem como a utilização de polaridade inversa do eletrodo-ferramenta, conforme Uno (1997), promovendo uma superfície com uma baixa rugosidade. Para alcançar o desempenho desejado com a utilização de pós em suspensão é preciso controlar as variáveis do processo de EDM, como: movimentação do eletrodo, distribuição do pó no dielétrico e os parâmetros elétricos do processo, Peças (2003). Fendas de trabalho muito pequenas, falta de pó no dielétrico (pouca concentração) e pequenos tempos de intervalos de pulso t_0 aumentam o efeito capacitivo entre a peça e o eletrodo, provocando tendências para a formação de profundas crateras devido à concentração de uma grande energia no canal de plasma, afetando assim a qualidade superficial da peça, estudos de Mohri (1987) e Luo (1997).

Okada (2000) concluiu que para altas temperaturas do canal de plasma, os pós em suspensão podem se combinar com o carbono, através da desintegração do hidrocarboneto do dielétrico, e gerar carbeto de alta dureza na superfície usinada, sendo que a dureza da superfície modificada torna-se maior com o aumento da duração do pulso e da concentração do pó.

De acordo com Schumacher (1983), no processo convencional de EDM, o sucesso ao se utilizar pós em suspensão no dielétrico depende também do material da peça e da sua estrutura cristalográfica. Os melhores resultados obtidos com peças de aços apresentam menos de 1% de carbono em sua composição, cromo entre valores de 4% a 4,5% e molibdênio acima de 1%, segundo Mohri (1991) e Yan (1994). Altos valores de rugosidade são notados para

valores materiais que divergem muito desta composição, principalmente para materiais que apresentam valores de manganês acima de 0,5% e vanádio abaixo de 0,5%, conforme alguns estudos de Wong (1998) e Uno(1997). O material que será utilizado nos experimentos (aço H13) apresenta uma composição química próxima à descrita anteriormente, além de ser um dos materiais mais utilizados para a fabricação de moldes e matrizes.

3.6.1 A utilização de pó de Silício no processo de PMEDM

Segundo estudos de Narumiya (1989) e Peças (2001) a utilização de partículas de silício com diâmetro inferior a 15 μm , combinado com uma concentração entre 2 a 15 g/l, seria suficiente para promover uma superfície uniforme e com uma baixa rugosidade (entre 1,8 e 2,0 μm Rmax).

Com a adição de pó de silício a rugosidade da superfície da peça apresenta valores inferiores comparado com o processo convencional de EDM, dependendo da área do eletrodo utilizado. Outro estudo realizado por Peças (2003) foi avaliar o desempenho do processo de PMEDM para se obter uma superfície polida. Conforme relatado por Peças (2003), com a adição de pó de silício obtém-se um aumento do desempenho do processo, eliminando também condições indesejáveis durante o processo de EDM.

Ainda segundo Peças (2003), o uso de partículas de silício em suspensão no dielétrico apresentou para uma concentração de 2 g/l crateras menos profundas e com uma superfície refletiva. Foi observado também que a área do eletrodo apresentou uma variação na rugosidade (Ra), 0,09 μm para um eletrodo de 1 mm^2 e 0,57 μm Ra para 64 mm^2 . O pó de silício apresenta um grande efeito na redução da rugosidade da superfície.

Mohri (1991, 1985 e 1998) também estudou o efeito do pó de silício. Foram utilizadas partículas de 10-30 μm uniformemente distribuídas no fluido dielétrico. No processo foi utilizada uma baixa corrente de descarga (0.5 A – 1 A) com curtos tempos de descarga (< 3 μs) com polaridade inversa do eletrodo ferramenta.

Referente ao pó de silício, Saito (1991) concluiu que a utilização do pó de silício no processo de EDM proporciona melhorias na superfície usinada, gerando uma superfície polida e sem trincas. A superfície usinada com o pó de silício apresentou deposição de carbono, devido à decomposição de carbono presente no fluido dielétrico. As partículas de silício entram na superfície da peça apresentando em torno de 16% de agregação.

Considerando os bons resultados de trabalhos relacionados à utilização de pó de silício no dielétrico, o mesmo foi escolhido com o intuito de avaliar a sua influência na usinagem do aço H13. Os detalhes das materiais e métodos serão discutidos no próximo capítulo.

3.6.2 A utilização de pó de Manganês no processo de PMEDM

Na literatura não existe muitas informações sobre a utilização de pó de manganês em suspensão do fluido dielétrico. Conforme estudos realizados por Stevens (1998) o pó de manganês não apresentou resultados satisfatórios, provavelmente devido às partículas de manganês utilizadas por Stevens apresentarem uma grande variação de tamanho, variando entre 1 μm e 60 μm .

De acordo com Stevens (1998), partículas que apresentam grande tamanho provocam uma má influência para o processo de EDM, como curtos-circuitos, tornando o processo instável e ineficiente.

A fim de investigar a real influência do pó de manganês no processo de EDM, este trabalho avaliou a influência deste pó em suspensão no dielétrico com a utilização de partículas inferiores a 10 μm . O intuito de utilizar partículas pequenas ($< 10\mu\text{m}$) foi eliminar a influência de tamanho de partículas grandes no processo de PMEDM para avaliar a real influência do pó de manganês em suspensão no dielétrico, complementando o trabalho realizado por Stevens (1998).

Ao contrário do pó de silício, não existe muitos trabalhos relacionados à utilização de pó de manganês em suspensão no dielétrico, esta foi uma motivação para a escolha desta material para a investigação da integridade superficial da peça após a usinagem por PMEDM.

3.6.3 A utilização de outros pós no processo de PMEDM

Este tópico irá apresentar apenas como referência, a utilização de outros materiais utilizados em suspensão no dielétrico para a usinagem por EDM. Todos os trabalhos que serão citados visam obter algum tipo de melhoria superficial na peça, desde a formação de uma superfície com baixa rugosidade até a agregação do pó na superfície da peça, proporcionando características superficiais satisfatórias.

- Grafita

O pó de grafite pode originar estruturas metalúrgicas indesejadas, como: austenita residual na região polida da superfície da peça devido à alta concentração de carbono na região que foi resolidificada segundo Simão (2003) e Jeswani (1981). Apesar de altas concentrações de pó possibilitem um aumento da fenda de trabalho, problemas são gerados com concentrações acima de 30g/l, segundo Wong (1998), Narumiya (1989) e Ming (1995).

- Titânio

Furutani (2000) propôs a utilização de pós de titânio suspenso no dielétrico ao invés da utilização de eletrodos de pós-compactados, que apresentam processos de fabricação mais complicados e também um maior desgaste durante o processo de EDM. O pó suspenso no dielétrico foi mantido em suspensão através de um fino eletrodo rotativo, mantendo assim uma alta concentração de pó na região da fenda de trabalho a fim de agregar o pó na superfície da peça usinada. Para o experimento de Furutani (2000) foi utilizado um fluido dielétrico similar ao querosene. Uma espessura de carboneto de titânio de 150 μm com uma dureza de 1600 Hv foi encontrada na superfície de um aço carbono.

Pode ser notada na figura 3.6.3 a formação de uma camada com agregação de titânio na superfície da peça. Este camada foi possível devido à utilização de pulsos com tempos mais curtos. A camada resolidificada não apresentou uniformidade ao longo na superfície da peça, podendo ser claramente na da figura 3.6.3. a.

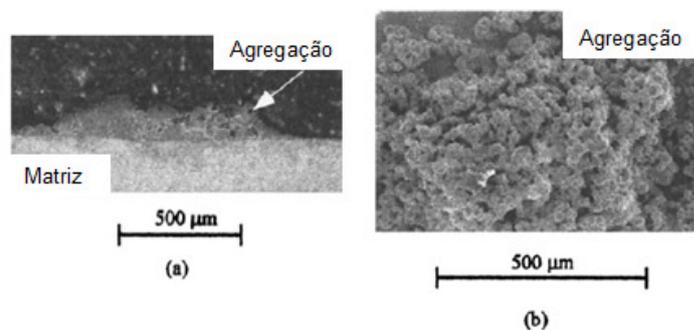


Figura 3.6.3 – Exemplo de camada gerada no processo de PMEDM: a-) Seção transversal, b-) Vista de topo , de Furutani (2000).

Outro trabalho relacionado com pó de titânio foi realizado por Mohri (2000) e segundo seus estudos foi constatado que a agregação das partículas de titânio pode ser feita com a utilização de um fino eletrodo de tungstênio.

Através dos resultados de Furutani (2000), foi possível constatar que carbonetos de titânio (TiC) podem ser gerados com a utilização de um fino eletrodo circular, mantendo-se um alta concentração de pó entre o eletrodo e a superfície da peça. Para se obter superfícies mais uniformes, um eletrodo rotativo pode ser considerado, este conceito promove um grande “arrastamento” das partículas de pó para a fenda de trabalho.

A sugestão de Furutani (2000) em utilizar rotação no eletrodo-ferramenta foi considerada no trabalho em questão. Uma rotação de 20 rpm foi definida para os experimentos, os detalhes serão discutidos no Capítulo IV.

- Alumínio

Narumiya (1989) avaliou os efeitos do pó de alumínio utilizando um eletrodo-ferramenta de cobre e um eletrodo-peça ASTM-M2. O pó de alumínio apresentou uma superfície uniforme, com uma rugosidade R_{max} de 0,6 μm , esta análise foi realizada em uma área de 25 cm^2 . Os melhores resultados encontrados por Narumiya (1989) foram com partículas de Al com diâmetros inferiores a 15 μm e uma concentração de 2 a 15 g/l.

Através da utilização de pó de alumínio no dielétrico, Wu (2005) também obteve uma baixa rugosidade superficial. Durante os experimentos de Wu (2005) foi constatado um problema, as partículas de alumínio eram “aglomeradas” no fluido dielétrico devido à força eletrostática, afetando assim a estabilidade do processo de EDM. Para evitar este efeito de “aglomeramento” um aditivo foi adicionado ao dielétrico, fazendo com que o pó de alumínio fosse homogeneamente suspenso no dielétrico.

- Tungstênio

O pó de tungstênio também pode ser utilizado para a formação de finas camadas resolidificas. Segundo estudos de Masui (1990) uma fina e constante camada pode ser gerada com a utilização de pó de tungstênio, com uma agregação em torno de 9% de tungstênio na superfície da peça, trazendo melhorias como: baixa rugosidade, alta dureza, resistência à

corrosão. Nos experimentos realizados por Masui (1990), um eletrodo de 15 x 15 mm com polaridade negativa e uma peça de aço AISI-M2 foi utilizada, assim como uma concentração de 20 g/l de pó de tungstênio com partículas de 1,3 μ m.

3.7 Outras generalidades da utilização de pós em suspensão no dielétrico

3.7.1 Manutenção os pós em suspensão

Quando utilizado pós no fluido dielétrico, é essencial manter estes em suspensão. Por este motivo os fluidos que apresentam uma maior viscosidade possibilitam uma melhor suspensão dos pós, mas por outro lado dificultam a lavagem da peça. Como o processo de EDM trabalha com fendas de trabalho muito pequenas (alguns micrometros), ao utilizar fluidos de trabalhos muito viscosos, as partículas eletroerodidas podem não ser evacuadas da fenda de trabalho, gerando assim curtos-circuitos e influenciando negativamente o processo de EDM, segundo estudos de Stevens (1998).

Para evitar o problema com a utilização de fluidos viscosos, recomenda-se a utilização de fluidos de menor viscosidade. Apenas como referência, o fluido utilizado no trabalho do Stevens (1998) foi um BP250 com uma viscosidade de 6.0 cSt à 20°C.

Juntamente com a escolha do tipo e da viscosidade do fluido de trabalho, deve ser considerado qual o sistema de agitação que será utilizado. Na literatura foram encontrados dois sistemas básicos para promover a suspensão do pó no dielétrico de maneira uniforme, sendo: agitação através de um sistema de hélice e agitação por sistema de bombeamento com a utilização de tubulações para direcionar o fluxo do dielétrico de modo a manter o pó em suspensão no interior da cuba.

3.7.2 Filtros no processo de PMEDM

De acordo com Stevens (1998), a utilização de filtros é necessária quando há uma contaminação considerável de partículas eletroerodidas. Os regimes mais energéticos, como operações de desbaste, por exemplo, produzem uma quantidade considerável de partículas removidas provenientes do processo de EDM, às vezes superando a concentração do próprio

pó em suspensão, gerando efeitos negativos para o processo de EDM, sendo necessária a utilização de filtros.

Uma solução para o problema de filtro em máquinas comerciais seria a utilização de dois sistemas para o fluido dielétrico: um para operações de desbaste (com grande geração de partículas eletroerodidas), e outro sistema para operações de acabamento (com baixa geração de partículas eletroerodidas).

Outra solução para a filtragem das partículas eletroerodidas, seria a utilização de filtros magnéticos, mas este conceito é aplicável somente quando as partículas eletroerodidas do processo de EDM possuem propriedades magnéticas e o pó utilizado não apresenta, ou seja, as partículas eletroerodidas são removidas do fluido dielétrico sem que haja remoção do pó em suspensão, segundo Stevens (1998).

Como o intuito deste trabalho não é estudar a remoção de material, não houve a necessidade da utilização de filtros, pois a contaminação do fluido dielétrico na cuba de trabalho é desprezível, devida as baixas correntes definidas para os experimentos. A utilização de filtros em processos de PMEDM não é recomendada, pois as partículas em suspensão no dielétrico seriam retidas pelo filtro, gerando uma grande perda de concentração de partículas no dielétrico.

3.7.3 Influência do tamanho da cuba de trabalho

A utilização de cubas de trabalho muito pequenas pode apresentar algumas influências no processo de PMEDM. Uma das principais influências é a contaminação do fluido dielétrico, tanto pelas partículas eletroerodidas quanto a presença de carbono gerado pela desintegração do fluido dielétrico. Alguns estudos realizados por Bommeli (1978) mostram que uma contaminação do fluido dielétrico pode apresentar algumas vantagens no processo de EDM, como a redução da resistência do dielétrico facilitando a ignição do canal de plasma. Uma contaminação excessiva do fluido dielétrico pode proporcionar efeitos negativos no processo de EDM, principalmente curtos-circuitos. Outro ponto importante quando utilizado cubas de trabalho muito pequena, é o rápido aquecimento do fluido dielétrico podendo afetar negativamente o processo de PMEDM.

Alguns testes foram realizados por Stevens (1998) para comparar o sistema padrão (com recirculação) a um sistema com a utilização de uma cuba de 4 litros. As amostras

usinadas na cuba apresentaram uma menor quantidade de microtrincas, e a espessura da camada termicamente afetada pelo processo de EDM flutuaram menos. Uma característica importante que pode ser notada quando utilizada uma cuba de trabalho, especialmente quando utilizada a polaridade inversa do eletrodo ferramenta, é o aumento da taxa de remoção e a melhora na estabilidade do processo, segundo Stevens (1998).

3.7.4 Efeito do tamanho da partícula na região solidificada

Tzeng (2005) avaliou o efeito do tamanho das partículas de alumínio na região resolidificada. Como pode ser visto na figura 3.7.4, a adição bem como a concentração de partículas de alumínio é possível observar diferenças na espessura da camada resolidificada. Partículas de 100 μm produzem uma fina camada na região resolidificada, considerando que partículas entre 70-80 nm geram camadas mais espessas, observando-se que a espessura da região resolidificada diminui com o aumento do tamanho da partícula do pó em suspensão, conforme Tzeng (2005).

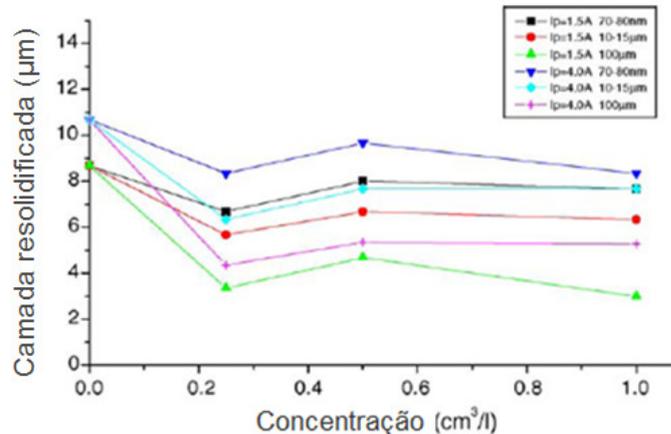


Figura 3.7.4 – Influência do tamanho da partícula de Al na camada resolidificada conforme Tzeng (2005)

Segundo trabalhos de Tzeng (2005), foi possível concluir que baixas concentrações de pó de alumínio (cerca de $0.25 \text{ cm}^3/\text{l}$) apresentam o melhor acabamento superficial, sendo que uma pequena diferença é notada ao variar a concentração de alumínio de $0,25 \text{ cm}^3/\text{l}$ para $1.0 \text{ cm}^3/\text{l}$, isto pelo fato de somente uma fração do pó em suspensão estar presente na região da

fenda de trabalho. Tzeng (2005) também observou que a concentração do pó no dielétrico apresenta menor influência do que corrente de descarga.

Um ponto interessante levantado no parágrafo anterior foi o relato de Tzeng (2005), sobre a influência de concentração do pó no dielétrico. Segundo Tzeng (2005) a concentração apresentou pouca influência no processo de EDM, fato que não ocorreu no trabalho em questão, onde ao variar a concentração de pó em suspensão no dielétrico diferentes resultados foram encontrados em termos da camada resolidificada. Os resultados e discussões dos experimentos serão descritos no Capítulo V.

Com base no trabalho de Tzeng (2005), foi possível verificar a influência do tamanho de partícula do pó utilizado no processo de PMEDM, neste caso o alumínio, na formação da espessura da camada resolidificada. Este estudo foi levado em consideração na escolha do tamanho de partícula dos pós utilizados neste trabalho, pois o tamanho de partícula do pó afeta diretamente a formação da camada resolidificada no processo de PMEDM.

O tamanho da partícula de pó, bem como o tipo e a concentração podem afetar o processo de PMEDM. Partículas com um grande diâmetro podem proporcionar um aumento da fenda de trabalho, conforme Wong (1998), mas simultaneamente reduz a taxa de remoção de material, conforme Tzeng (2001) e Jeswani (1981), e aumenta a rugosidade da superfície. Os melhores resultados são obtidos com partículas com diâmetros inferiores a 15 μm , de acordo com estudos de Narumiya (1989) e P. Peças (2003).

CAPÍTULO IV

MÉTODO EXPERIMENTAL E MATERIAIS

Este capítulo descreve o procedimento experimental adotado para a realização dos testes de usinagem de EDM com a utilização de pós em suspensão no dielétrico (PMEDM). Um fluxograma esquemático foi desenvolvido com o intuito de facilitar a seqüência bem como o entendimento do projeto de pesquisa. Os testes no aço H13 foram realizados no laboratório de usinagem da PUC-PR - LAUS em uma máquina CHARMILLES modelo ROBOFORM 30 CNC (figura 4). Algumas modificações da máquina foram necessárias devido à utilização dos pós no dielétrico, sendo que estas modificações também serão relatadas neste capítulo.



Figura 4 - Máquina Roboform 30 CNC.

4.1 Fluxograma experimental

A figura 4.1 apresenta o fluxograma geral adotado para os ensaios. A definição das variáveis independentes de entrada foi definida com o intuito de avaliar o impacto destas variáveis no processo de PMEDM, de modo a identificar a real influência destes parâmetros na integridade superficial da peça.

Após a definição das variáveis independentes de entrada, foram realizados testes utilizando o sistema convencional de EDM em um aço H13, sem adição de pó no fluido

dielétrico, a fim de estabelecer um comparativo com as amostras usinadas com adição de pó no dielétrico.

Na seqüência foram realizados os ensaios com a adição de pós de silício e manganês no dielétrico. Foi utilizado como eletrodo-peça o aço H13. Para este ensaio o equipamento CHARMILLES modelo ROBOFORM 30 CNC teve que ser modificado devido à adição de pó no fluido dielétrico. O equipamento utilizado nos testes apresenta um gerador de pulsos isoenergéticos, ou seja, controle sobre a duração de descarga t_e – vide descrição detalhada no equipamento no apêndice 01. Ao final, transcorreu-se a etapa de análise e discussão das variáveis dependentes do processo.

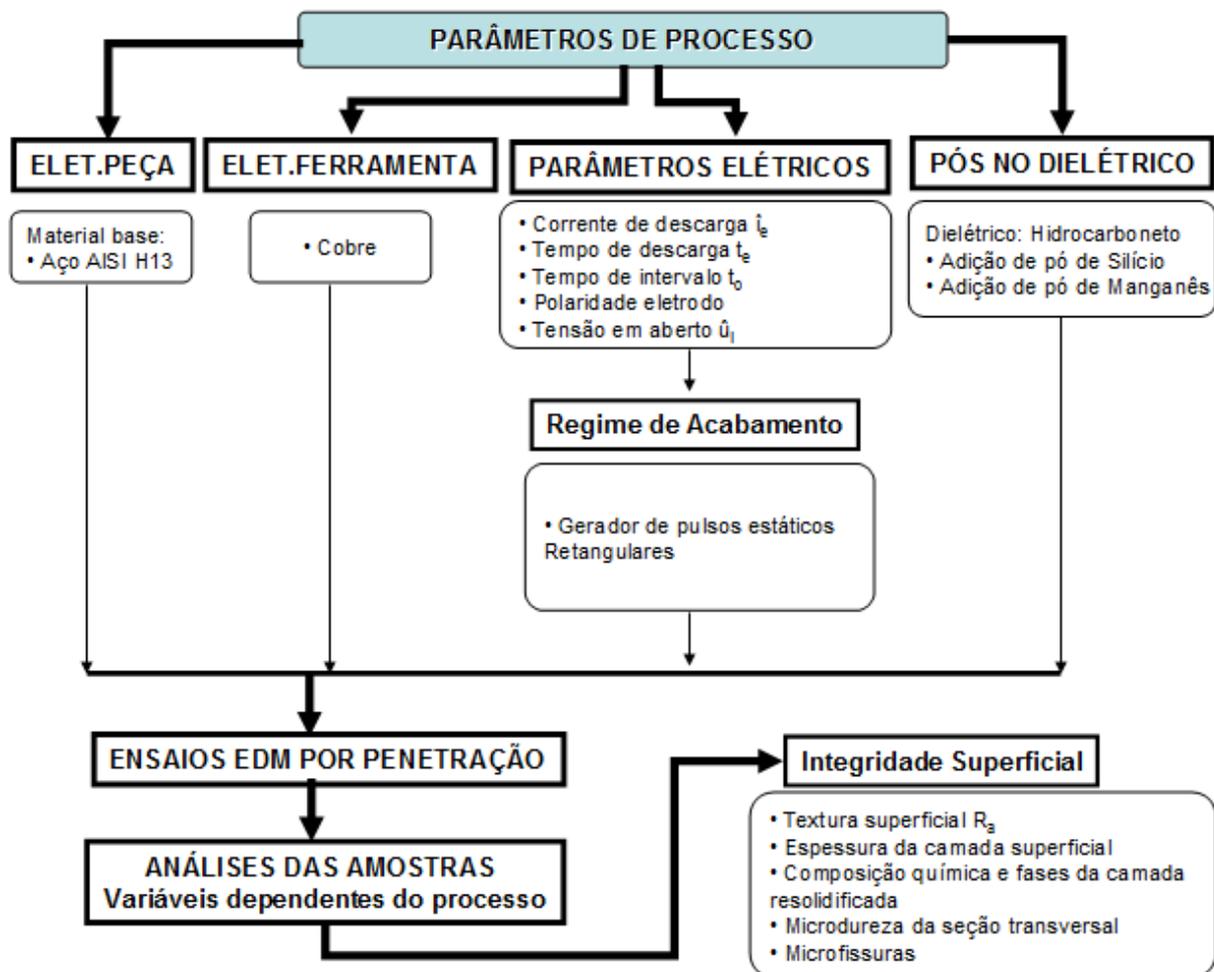


Figura 4.1 - Modelo esquematizado do plano geral de desenvolvimento dos testes.

• **Cuba de Trabalho e Sistema de Agitação:** Com a utilização de pó juntamente com o fluido dielétrico, o sistema convencional de re-circulação do fluido dielétrico não pode ser

utilizado, pois o filtro presente neste sistema de re-circulação reteria todas as partículas de pó adicionadas ao fluido dielétrico. Para solucionar este problema uma cuba de trabalho foi projetada a fim de estabelecer um sistema fechado do fluxo de dielétrico, como mostrado na figura 4.1.1. Para a realização dos testes foi adicionado 9 litros de fluido dielétrico na cuba de trabalho. A utilização de cubas com um volume muito pequeno pode acarretar uma alta contaminação das partículas eletroerodidas gerando influencias negativas no processo de PMEDM, e também não é recomendado à utilização de cubas muito grande, pois uma grande quantidade de pó seria desperdiçada durante os experimentos.

Juntamente com a utilização da bomba foram utilizadas duas mangueiras para direcionar o fluxo de dielétrico no interior da cuba de trabalho, as mangueiras foram posicionadas de modo a gerar um fluxo em “espiral” no interior da cuba, evitando a decantação do pó nas extremidades da cuba, e também para manter uma concentração uniforme durante a usinagem.

A base da cuba de trabalho foi retificada para promover um melhor assentamento do eletrodo-peça, garantindo um perfeito o alinhamento entre a face do eletrodo-ferramenta e o eletrodo-peça.

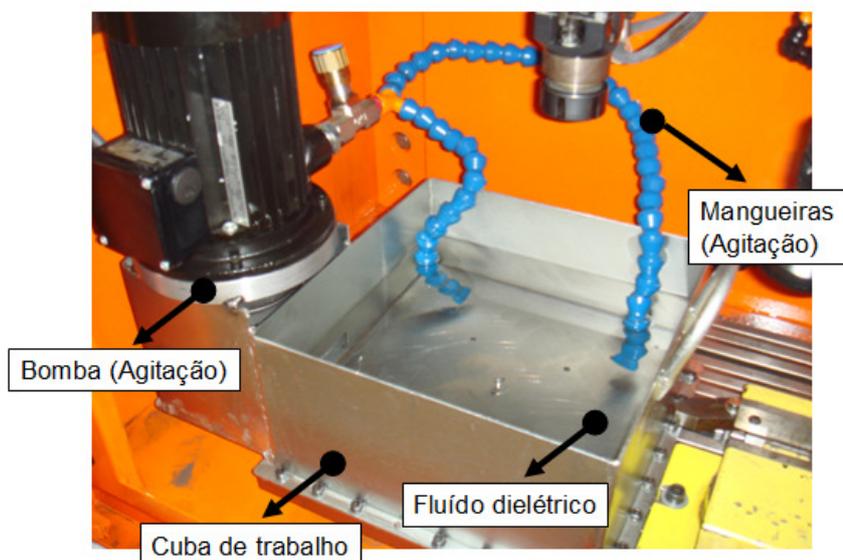


Figura 4.1.1 – Cubo de trabalho utilizada nos testes de PMEDM

Antes da definição adotada para o sistema de agitação da cuba, foi testado outro sistema com o intuito de garantir a suspensão dos pós no interior da cuba. Este outro sistema pode ser visto na figura 4.1.2.

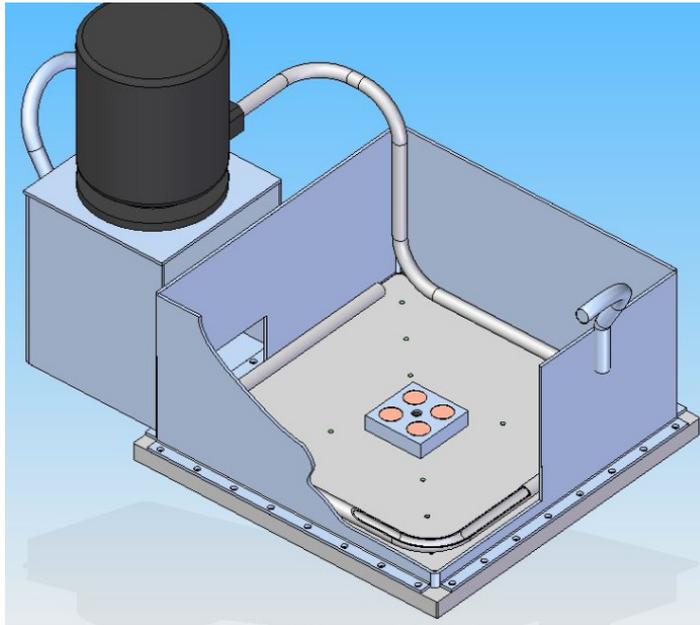


Figura 4.1.2 - Sistema de agitação por tubos. Hipótese verificada durante o trabalho

O sistema representado pela figura 4.1.2 consistia basicamente de uma tubulação que percorria as bordas da região mais funda da cuba de trabalho. Foram realizados furos ao longo da tubulação com o intuito de direcionar o fluxo do fluido dielétrico para o centro da cuba, fazendo assim com que o pó presente no fluido ficasse em suspensão.

Infelizmente este sistema apresentou vários problemas, sendo: grande diferença de vazão dos furos ao longo da tubulação, entupimento dos furos devido ao acúmulo dos pós nesta região e uma não uniformidade na agitação dos pós, fazendo com que mesmos acumulassem nos cantos da cuba, reduzindo a concentração de pó presente no fluido dielétrico.

O melhor sistema representado pela figura 4.1.1 realmente apresentou a melhor condição de agitação, e foi assim adotado para a realização dos experimentos. Para a definição do sistema da figura 4.1.1, foi necessária a utilização de uma bomba de maior potência quando comparado com a situação inicial. Uma bomba com uma maior vazão foi adotada ($2 \text{ m}^3/\text{h}$) para garantir a suspensão do pó no dielétrico. Para um correto ajuste da vazão da bomba foi instalado um inversor de frequência.

- **Eletrodo-peça:** Os corpos de prova foram confeccionados com uma seção transversal de $42 \times 42 \text{ mm}$ e espessura de 15 mm , sendo devidamente numerados. As superfícies foram retificadas para um adequado assentamento entre a face do eletrodo-peça e o eletrodo ferramenta, evitando problemas como: um desgaste não uniforme do eletrodo-ferramenta e

instabilidade do processo na forma de arcos e curtos-circuitos. As dimensões das amostras foram definidas de modo a obter uma adequada análise da integridade superficial das amostras. O material utilizado como eletrodo-ferramenta foi o aço H13 sem tratamento superficial.

O aço H13 é um material para trabalho a quente, e contém em sua composição elementos como: cromo, vanádio, silício e molibdênio, sendo utilizado para moldes de injeção e extrusão de metais a quente como alumínio, zinco e cobre, bem como para conformação a quente em prensas e martelos. [Steel A. Handbook for Materials Reserch and Engineering].

Quando se fala em materiais para moldes e matrizes, o aço H13 é um dos mais utilizados, segundo Young (1979). Os principais motivos que levam para a sua escolha é devido a sua boa usinabilidade, sua estabilidade dimensional e na sua boa resistência a trincas.

A composição química, propriedades físicas e propriedades mecânicas estão descritas na Tabela 4.1, na Tabela 4.1.1 e na Tabela 4.1.2 respectivamente. [Steel A. Handbook for Materials Reserch and Engineering]

Tabela 4.1 - Composição química do Aço H13

Composição química (%)					
C	Cr	Mn	Mo	Si	V
0,39	5,2	0,4	1,4	1,1	0,95

Tabela 4.1.1 - Propriedades físicas do Aço H13

Propriedades Físicas		
Massa específica	7,85	g/cm ³
Ponto de fusão	1430	°C
Calor específico	0,460	J/Kg. °C
Resistividade elétrica	0,0000520	Ohm.cm
Condutividade térmica	25	W/m.K

Tabela 4.1.2 - Propriedades mecânicas do Aço H13

Propriedades Mecânicas		
Limite de resistência	359	MPa
Módulo de elasticidade	165	GPa
Dureza	40 - 55	HRC

• **Parâmetros elétricos do processo:** são representados pela corrente de descarga \hat{i}_e , duração da descarga t_e , duração do pulso de tensão t_i , tempo de intervalo t_o e polaridade do eletrodo-ferramenta. Estes parâmetros são programados atuando-se sobre o sistema de controle da máquina e representam algumas das principais variáveis que influenciam no processo de PMEDM afetando diretamente nos aspectos da integridade superficial.

Os parâmetros elétricos foram subdivididos para duas condições de usinagem: regime de acabamento com uma corrente (E212 - 2 A) e (E282 - 6 A). O regime E212 e E282 significam um regime pré-definido pelo equipamento ROBOFORM 30 CNC. A usinagem foi realizada com a atuação do gerador da máquina no modo de pulsos estáticos retangulares, o qual proporciona rápida elevação da corrente de descarga \hat{i}_e . Esta forma de atuação do gerador foi utilizada na usinagem de todos os corpos de prova deste trabalho.

Nos testes realizados estabeleceu-se o tempo de usinagem de 4 horas para o regime de E212 - 2 A, e de 3 horas para o regime de E282 - 6 A. A definição do tempo de usinagem foi definido com o intuito de avaliar o impacto dos pós de silício e manganês na integridade da superfície, e não com o intuito de remoção de material na superfície da peça.

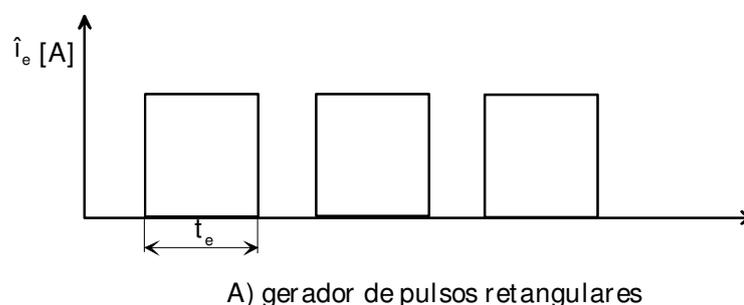


Figura 4.1.3 - Esquema do comportamento da corrente de descarga segundo modo de atuação do gerador de pulsos retangulares

A tabela 4.1.3 apresenta as variações dos parâmetros elétricos utilizados nos testes. A influência da corrente de descarga \hat{i}_e e da concentração de pó no fluido dielétrico foi o principal foco durante a realização dos testes, outros parâmetros como a duração de descarga t_e , tempo de intervalo t_o e a polaridade do eletrodo ferramenta foram mantidas constantes.

Tabela 4.1.3 – parâmetros elétricos utilizados nos testes de rendimento

Regime	Corrente \hat{i}_e (A)	Pó em suspensão (g/l)	Duração de descarga t_e (μ s)	Tempo de intervalo t_o (μ s)	Polaridade eletrodo ferramenta
E212	2	Si 5 e 15 Mn 5 e 10	6,4	100	negativa
E282	6	Si 5 e 15 Mn 5 e 10			

- **Eletrodo-ferramenta:** Foram adotados eletrodos de cobre eletrolítico, usinados com as dimensões de 20 mm no diâmetro e 4 mm no furo central, o furo central de 4 mm destinado a lavagem sob pressão pelo eletrodo não foi utilizado, pois os testes foram realizados sob uma condição controlada de dielétrico na cuba de trabalho. O eletrodo-ferramenta foi posicionado sobre o eletrodo-peça de modo a facilitar a análise dos corpos de prova. Na figura 4.1.4 pode ser visto uma representação esquemática do corpo de prova, indicando os principais pontos de análise das amostras. Neste trabalho o eletrodo-ferramenta não foi avaliado.

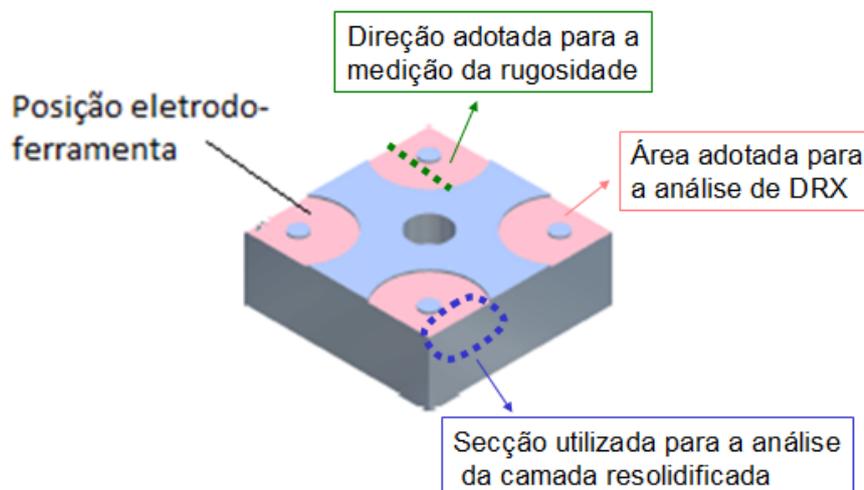


Figura 4.1.4 – Representação esquemática do corpo de prova (aço H13)

Durante a realização dos testes o eletrodo foi programado para trabalhar a uma rotação de 20 rpm, de modo a garantir uma melhor uniformidade na concentração de pó na fenda de trabalho.

- **Pó no dielétrico:** Foram utilizados dois tipos de pó durante os testes, pó de silício e pó de manganês, cujas especificações podem ser encontradas na tabela 4.1.4.

Tabela 4.1.4 – Especificações dos pós de silício e manganês.

Tipo do Pó	Tamanho de partícula (μm)	Pureza (%)	Massa específica (g/cm^3)
Silício - Si	< 5	99	2,33
Manganês - Mn	< 10	99,5	7,47

Para a realização dos testes foi utilizado as concentrações de 5 gramas/litro e 15 gramas/litro para o pó de Silício, e de 5 gramas/litro e 10 gramas/litro para o pó de Manganês.

- **Fluido dielétrico e suspensão do pó:** foi utilizado um hidrocarboneto convencional utilizado na indústria, apresentando viscosidade de 3 cSt a 40°C. Outra característica importante para possibilitar a entrada de pó na fenda de trabalho e também garantir um processo estável foi à programação de movimentos de avanço e retração do eletrodo-ferramenta, diminuindo a ocorrência de arcos e curtos-circuitos, como apresentado na figura 4.1.5.

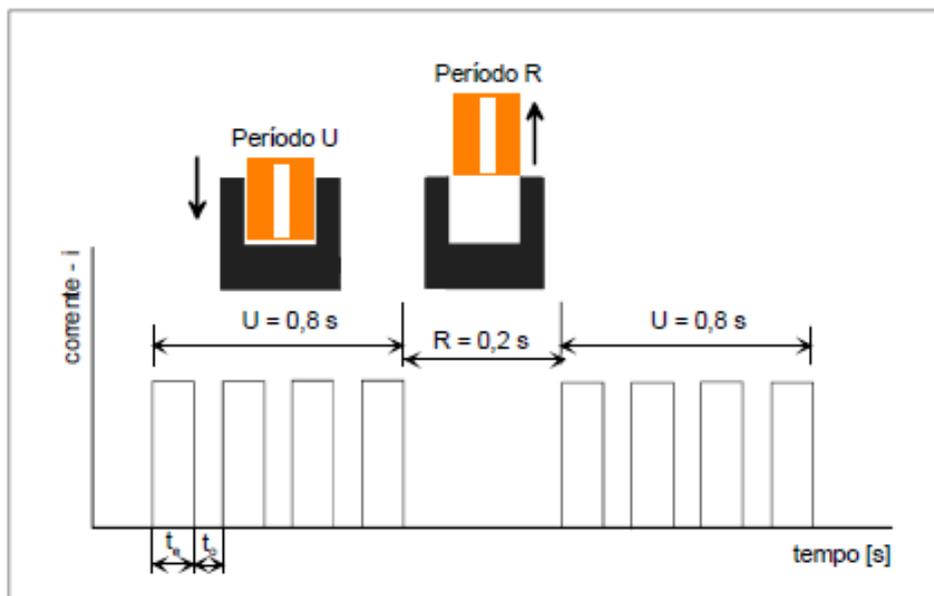


Figura 4.1.5 – Representação dos tempos de retração R e eletroerosão U

No sentido de avanço do eletrodo-ferramenta ocorrem sucessivas descargas, e no movimento de retração o fornecimento de energia é interrompido. Foi especificado para os ensaios o tempo de retração de R igual a 0,2 s e o tempo de seqüência de descargas U de 0,8 s. O movimento de retração do eletrodo permite que o pó presente no fluido dielétrico entre diretamente na superfície da peça na região da fenda de trabalho, isto devido ao constante movimento do fluido dielétrico proporcionado pela bomba presente na cuba de trabalho.

Após os ensaios procedeu-se à análise das amostras sobre as seguintes variáveis dependentes do processo:

- **Integridade superficial das amostras eletroerodidas:** foram analisadas após a usinagem das amostras, aspectos como:
 - Rugosidade superficial representada pelo parâmetro Ra;
 - Espessura da camada resolidificada;
 - Uniformidade da camada resolidificada;
 - Micro-dureza da seção transversal das amostras;
 - Composição química e as fases presentes na camada resolidificada.

4.2 Técnicas de quantificação e caracterização dos resultados

4.2.1 Aspectos da integridade superficial

A análise dos aspectos de integridade superficial dos eletrodos-peça usinados em regimes de acabamento (E212 – 2A e E282 – 6A) com a utilização de pós de silício e manganês, teve por objetivo investigar a influência da utilização de pós em suspensão no dielétrico combinado com a influência da energia média da descarga elétrica, representada simplificada mente pela expressão $W_e = u_e \cdot i_e \cdot t_e$ [J]. Para a avaliação das amostras usinadas, as seguintes técnicas foram utilizadas:

- **Microscopia óptica:** esta técnica foi utilizada para avaliar a uniformidade e espessura da camada resolidificada. Foi também observada na seção transversal da peça a existência de poros e microfissuras. Todos os procedimentos de preparação das amostras e análise micrografia estão apresentados no apêndice 2. Um microscópio óptico do modelo OLYMPUS BX60 juntamente com um software para processamento das imagens foi utilizado.

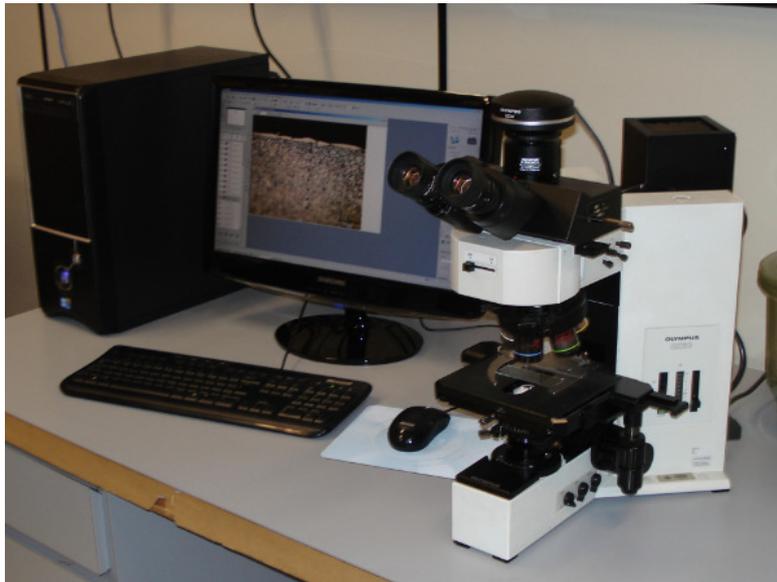


Figura 4.2.1 – Foto do equipamento OLYMPUS BX60

- **A medição de microdureza Vickers (HV):** foi analisada a dureza (HV) da seção transversal da amostra, partindo da superfície da peça (camada resolidificada) em direção ao material base da peça. O intuito foi avaliar a variação de dureza ao longo da seção transversal das amostras, com o objetivo de identificar a profundidade da influência térmica proveniente do processo de PMEDM.

A carga de medição para a microdureza Vickers foi definida em 10 gramas. Esta carga foi ajustada para tornar possível a medição da camada resolidificada. Para as secções transversais os espaçamentos entre as medições foram de 20 μm , do centro da camada solidificada ao núcleo, gerando um perfil com profundidade de 140 μm (8 pontos). Um microdurômetro do modelo HMV SHIMADZU foi utilizado.



Figura 4.2.1.2 – Foto do equipamento OLYMPUS BX60

- **Acabamento superficial:** foi avaliada pelo parâmetro de rugosidade R_a , ou seja, a média aritmética dos valores absolutos das ordenadas de afastamento dos pontos do perfil de rugosidade, em relação à linha média, dentro do percurso de medição. A direção da medição da rugosidade pode ser visto na figura 4.1.3, o curso total de medição foi de 7,5 mm, apresentado um "cut-off" de 2,5 mm. Foram realizadas três medições para cada área usinada, sendo que o valor utilizado foi à média aritmética destas três medições.

A medição de rugosidade foi realizada a fim de avaliar a influência da concentração de pó no dielétrico e também a influência da corrente média durante a descarga i_e . Além disso, também são apresentadas várias micrografias obtidas nas diversas condições testadas. Todos esses resultados serão analisados e discutidos no capítulo a seguir. Um rugosímetro do modelo TAYLSURF SERIES 250 i foi utilizado.

- **Microscopia eletrônica de varredura com espectroscopia de energia dispersiva (MEV-EDS):** foi realizada sobre a seção transversal das amostras, com o intuito de investigar a

camada resolidificada das amostras, identificando a influência da concentração de pó no dielétrico bem como a influência da corrente média durante a descarga i_e . Com esta técnica foi possível visualizar de modo preciso a formação da camada resolidificada, bem como obter informações em termos de porcentagem atômica dos elementos presentes na camada resolidificada (técnica da UFPR - EDS - *Energy Dispersive Spectrometry*).

Com a utilização da técnica de EDS foi possível identificar se o pó presente no fluido dielétrico foi agregado na camada resolidificada, bem como fazer uma análise semi-quantitativa destes elementos. A análise pontual foi escolhida, tornando possível a análise na região de interesse conforme será mostrado no decorrer do Capítulo V. Um equipamento do modelo JSM-6360LV (JEOL) foi utilizado.



Figura 4.2.1.3 – Foto do equipamento MEV - JSM-6360LV

Difração de Raios X: com esta técnica foi possível obter informações sobre as fases cristalinas presentes no material analisado após a usinagem por PMEDM. O equipamento utilizado para esta análise foi um difratômetro de raio X Shimadzu (modelo XRD 7000).

As análises por difração de raios X (DRX) foram feitas em um difratômetro de raio X Shimadzu (modelo XRD 7000), utilizando radiação Cu K_α , 40 kV e 20 mA, varrendo uma faixa de ângulos de 20 a 80° com varredura contínua de e velocidade de 1° / minuto .

Para a análise do difratograma foi utilizado o auxílio do software “*Crystallographica Search-Match*”, onde os picos de maior destaque foram comparados com o padrão JCPDS (“*Joint*

Committee on Powder Diffraction Standards”) conforme será apresentado nos difratogramas do Capítulo V.

4.3 Planejamento experimental do processo de PMEDM

A tabela 4.3 apresenta os parâmetros de usinagem adotados para os testes de PMEDM. Os parâmetros foram definidos com base em trabalhos de pesquisa relacionados ao processo de PMEDM. Como o intuito deste trabalho não é remover material da peça, valores baixos de correntes foram utilizados, 2 A e 6 A. Com os parâmetros estabelecidos, o intuito foi gerar camadas resolidificadas na superfície da peça, e avaliar a integridade superficial desta camada.

Tabela 4.3 – Parâmetros elétricos de processo de PMEDM

Regime	Corrente \hat{i}_e (A)	Pó em suspensão (g/l)	Duração de descarga t_e (μ s)	Tempo de intervalo t_o (μ s)	Polaridade eletrodo ferramenta
E212	2	Si 5 e 15 Mn 5 e 10	6,4	100	negativa
E282	6	Si 5 e 15 Mn 5 e 10			

Os regimes padrões do equipamento ROBOFORM 30 foram modificados para atender as condições ideais para o processo de PMEDM. Foram utilizados dois regimes, o E212 e E282, cujos valores de duração de descarga t_e e tempo de intervalo t_o foram ajustados. Valores altos de duração de descarga t_e provocam um grande aquecimento na superfície da peça, ocorrendo assim à remoção de material, sendo totalmente indesejável quanto se fala na utilização de pós em suspensão no dielétrico para melhorias na integridade superficial da peça.

Outro parâmetro muito importante que foi estabelecido foi à polaridade do eletrodo-ferramenta, sendo adotada a polaridade negativa para a realização dos testes. Como o presente trabalho utilizou valores baixos de duração de pulso, são principalmente os elétrons que são responsáveis pelo aquecimento da peça ao colidirem com o ânodo (+), que neste caso foi definido como eletrodo peça. Como uma baixa duração, não há tempo suficiente de acelerar os íons do ânodo (+), tornando os elétrons responsáveis pelo maior aquecimento da superfície da peça. Durante as descargas elétricas do processo de EDM, o diâmetro do canal de plasma cresce rapidamente na região do ânodo (+), fazendo com que a densidade de energia devido ao impacto dos elétrons seja reduzida, gerando um aquecimento mais uniforme na superfície da peça [Stevens – 1998]. Devido a esta menor densidade de energia, melhores acabamentos

superficiais podem ser obtidos com a utilização da polaridade inversa do eletrodo. Foram definidos dois tempos de usinagem, 4 horas para a corrente de 2 A, e 3 horas para a corrente de 6 A.

Nos ensaios realizados a tensão média de descarga u_e e a duração de descarga t_e foram mantidas constantes. A influência da corrente média durante a descarga i_e , bem como a adição de pós no fluido dielétrico foram avaliados.

CAPÍTULO V

RESULTADOS E DISCUSSÕES

Este capítulo aborda os resultados e as discussões dos testes de PMEDM no aço H13 com a utilização de pós de silício e manganês em suspensão no dielétrico. Os principais parâmetros estudados neste trabalho foram: a influência da concentração de pó no dielétrico, bem como a corrente de descarga do processo i_e . Para avaliar a influência dos pós suspensos no dielétrico, foram realizados testes sem a utilização de pós, EDM convencional, com o intuito de comparar a integridade superficial das peças eletroerodidas.

5.1 Resultados da rugosidade das amostras após PMEDM

Um dos pontos para avaliar a integridade superficial das amostras foram as medições de rugosidade da superfície usinada. A rugosidade está diretamente relacionada à energia média de descarga $W_e = u_e \cdot i_e \cdot t_e$ [J]. O aumento da energia W_e acarreta em um maior nível de rugosidade, pois crateras de maior profundidade e mais largas são produzidas nas peças após a interrupção da descarga elétrica. Usualmente, a ampliação do nível de energia fornecida por uma descarga é efetuada pela elevação da duração de descarga t_e ou da corrente de descarga i_e .

A figura 5.2 mostra os resultados da rugosidade R_a das amostras eletroerodidas. Pode ser visto claramente uma grande influência do valor de rugosidade quando utilizado uma baixa concentração de pó no dielétrico, principalmente com a utilização de um baixo valor de corrente.

Um ponto interessante que pode ser observado na figura 5.2, é a grande diferença no valor de rugosidade para o regime de 2 A com uma concentração de 5 g/l de silício. Como pode ser visto, o valor de rugosidade é reduzido de 1,0 μm (R_a) para 0,2 μm (R_a), quando utilizado pó de silício para o mesmo regime convencional de EDM (valor de ΔSi). Com a utilização de pó de silício para regimes com corrente de descarga de 2 A, a rugosidade de superfície melhorou em cinco vezes.

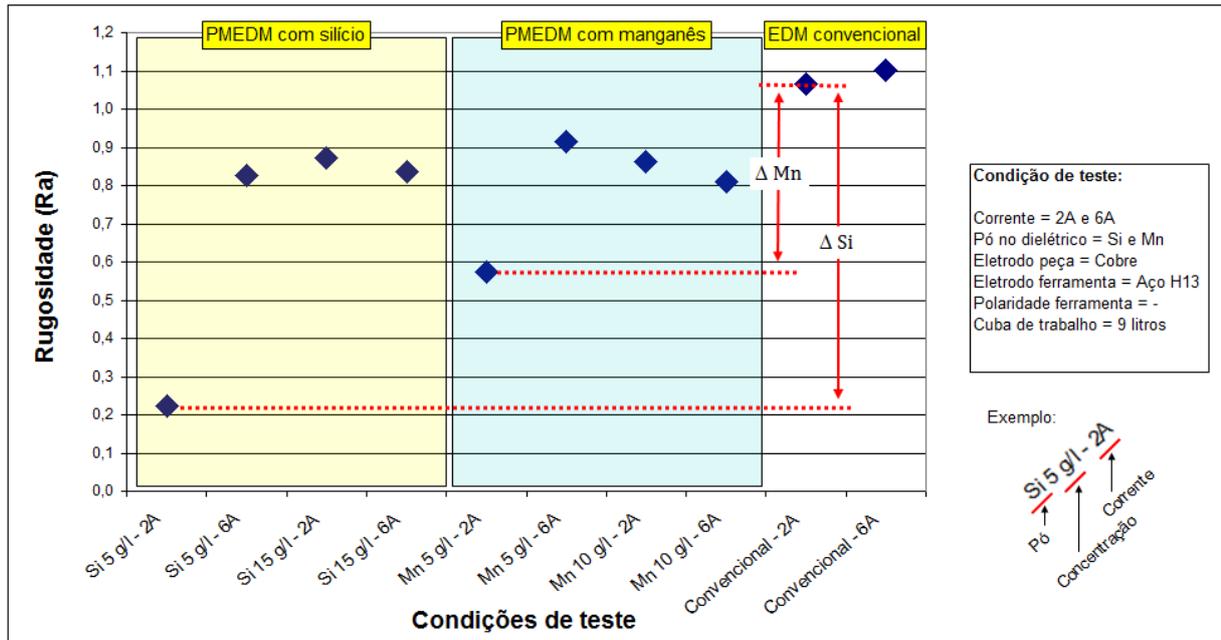


Figura 5.1 – Análise da rugosidade do processo de PMEDM

Com a utilização do pó de manganês com a mesma condição descrita (pó de silício), também pode ser notado uma redução do valor da rugosidade, de 1,0 μm (Ra) para 0,5 μm (Ra) (valor de Δ Mn). Com a utilização de pó de manganês a rugosidade da superfície melhorou duas vezes.

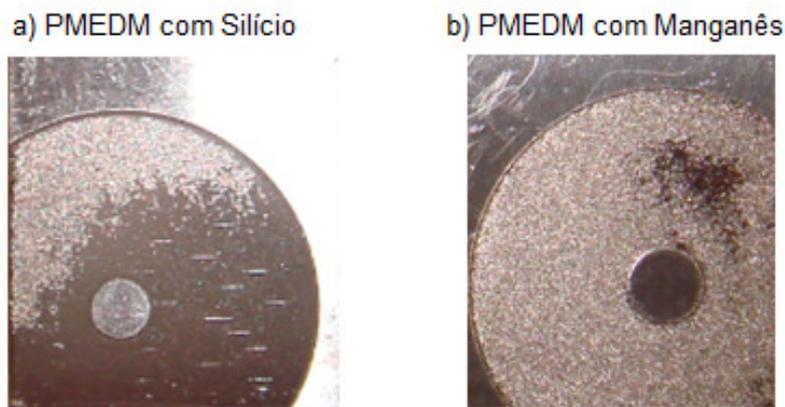


Figura 5.1.1 – Aspecto visual das superfícies utilizando o processo de PMEDM ,

a) com utilização de pó de silício, b) com utilização de pó de manganês.

O acabamento superficial proporcionado pelo pó de silício em suspensão no dielétrico pode ser visualmente visto pela figura 5.2.1. A amostra eletroerodida com o pó de silício apresenta uma superfície espelhada, imagem “a” da figura 5.2.1. Já a amostra contendo o pó de manganês no dielétrico, apresenta visualmente uma superfície mais rugosa, imagem “b”.

Foi avaliada também a influência de uma maior corrente média de descarga \hat{i}_e para a concentração de 5 g/l, cujo valor foi ajustado para 6 A. Na figura 5.2, pode ser visto que o aumento da corrente de descarga de 2 A para 6 A proporcionou piores valores de rugosidade, tanto para o pó de silício quanto para o pó de manganês. Os outros parâmetros como: duração de descarga, tempo de intervalo e polaridade do eletrodo, foi mantida constante durante todos os ensaios. Na tabela 5.2 a seguir podem ser visto os valores médios de rugosidade Ra dos ensaios realizados.

Tabela 5.1 – Comparativo entre a Rugosidade Ra com e sem a utilização de pó em suspensão no dielétrico

Pó Utilizado	Concentração [g/l]	Corrente de descarga [A]	Rugosidade Ra (μm)
Silício	5	2	0,2
		6	0,8
	15	2	0,9
		6	0,8
Manganês	5	2	0,6
		6	0,9
	10	2	0,9
		6	0,8
Sem pó	---	2	1,1
		6	1,1

Outro ponto interessante que pode ser observado é a influência na concentração dos pós na rugosidade da superfície. No caso do pó de silício, o valor de rugosidade aumenta de 0,2 μm (Ra) com concentração de 5 g/l para 0,8 μm (Ra) quando utilizado uma concentração de 15 g/l. Para o manganês pode ser notado o mesmo comportamento, apresentando uma rugosidade de 0,5 μm (Ra) para a concentração de 5 g/l e 0,8 μm (Ra) para a concentração de 10 g/l.

Como mostrado na tabela 5.2, a corrente de descarga \hat{i}_e apresenta pouca influência para altas concentrações de pós em suspensão. Para o silício o valor de rugosidade permanece quase o mesmo quando utilizado concentração de 15 g/l para as correntes de 2 A e 6 A, 0,87 μm Ra e 0,83 μm Ra respectivamente. O mesmo ocorreu para o pó de manganês para a concentração de 10 g/l, com valores de rugosidade de 0,9 μm Ra para a corrente de 2 A e 0,8 μm (Ra) para a corrente de 6 A.

Para todos os ensaios onde foram utilizados pós em suspensão no dielétrico, foram obtidas superfícies com uma melhor qualidade superficial em termos de rugosidade Ra em

todos os casos. Conforme relatos de Mohri (1991) e Wong (1998), a utilização de pós em suspensão no dielétrico realmente proporcionam melhorias no acabamento e na qualidade da superfície da peça usinada.

5.2 Resultados da microdureza das amostras após PMEDM

Foram executadas 8 medições de microdureza em intervalos espaçados de 20 μm a partir da superfície da amostra. A região analisada foi à seção transversal das amostras, o intuito foi avaliar o perfil de microdureza desde a camada resolidificada até o material base das amostras.

Para avaliar a dureza da camada resolidificada e comparar com a dureza do material base foi definida uma carga de 10 gramas. Com a aplicação da carga de 10 gramas uma indentação adequada foi gerada na camada resolidificada, tornando possível a medição de microdureza desta região.

Como discutido no Capítulo 2, o processo de eletroerosão por faísca afeta termicamente as camadas superficiais das peças usinadas. Dependendo da profundidade dessas zonas termicamente afetadas, a funcionalidade de um determinado componente pode ser afetada.

A camada resolidificada é formada pela parte do material liquefeito que não foi expulso ao final da descarga permanecendo na superfície da peça e posteriormente sendo resolidificado na cratera recém formada. Esta camada resolidificada geralmente apresenta uma dureza superior ao material base da liga devido principalmente a interação de carbono, liberado pela desintegração do fluido dielétrico, formando carbonetos na superfície da peça. A zona termicamente afetada é identificada logo abaixo da camada resolidificada após usinagem por EDM. Geralmente a camada branca apresenta poros e micro-fissuras. Logo na camada abaixo pode ser vista uma zona termicamente afetada devido ao aquecimento do processo de EDM. Embora a camada termicamente afetada não tenha sofrido fusão, ela também pode apresentar modificações em sua composição química e estrutura, [Jutzler – 1982] e [Stevens – 1998].

A figura 5.2 apresenta a micrografia da seção transversal de uma amostra de aço H13 usinado através do processo de EDM. Esta micrografia foi citada neste tópico apenas como exemplo, a análise completa das micrografias das amostras será discutido no próximo tópico.

Como pode ser visto na figura 5.2, foi levantado o perfil de dureza da superfície até o material base das amostras.

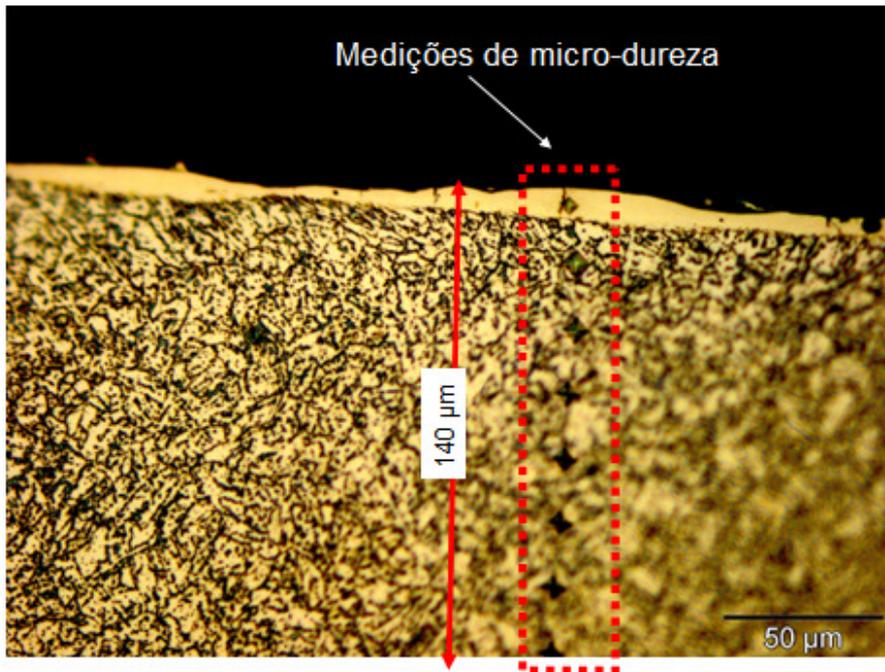


Figura 5.2 – Micrografia da seção transversal do aço H13 após processo de EDM.

Foram executadas oito medições de microdureza $HV_{0,01}$ em intervalos de $20\ \mu\text{m}$ a partir da superfície da amostra como apresentado na figura 5.2. Os valores das medições de microdureza Vickers podem ser visualizados nas figuras 5.2.1 e 5.2.2. Como o valor de microdureza apresentou valores constantes após uma determinada profundidade, não houve a necessidade de realizar mais medição de microdureza.

Assim como na medição da rugosidade descrita no tópico anterior, foi avaliada a influência dos pós de silício e manganês, com diferentes concentrações de pós no dielétrico, $5\ \text{g/l}$ e $15\ \text{g/l}$ para o pó de silício e $5\ \text{g/l}$ e $10\ \text{g/l}$ para o pó de manganês, bem como a influência da corrente de descarga i_e ($2\ \text{A}$ e $6\ \text{A}$) para ambos os casos. Os outros parâmetros elétricos e não elétricos do processo de PMEDM não foram modificados durante os ensaios.

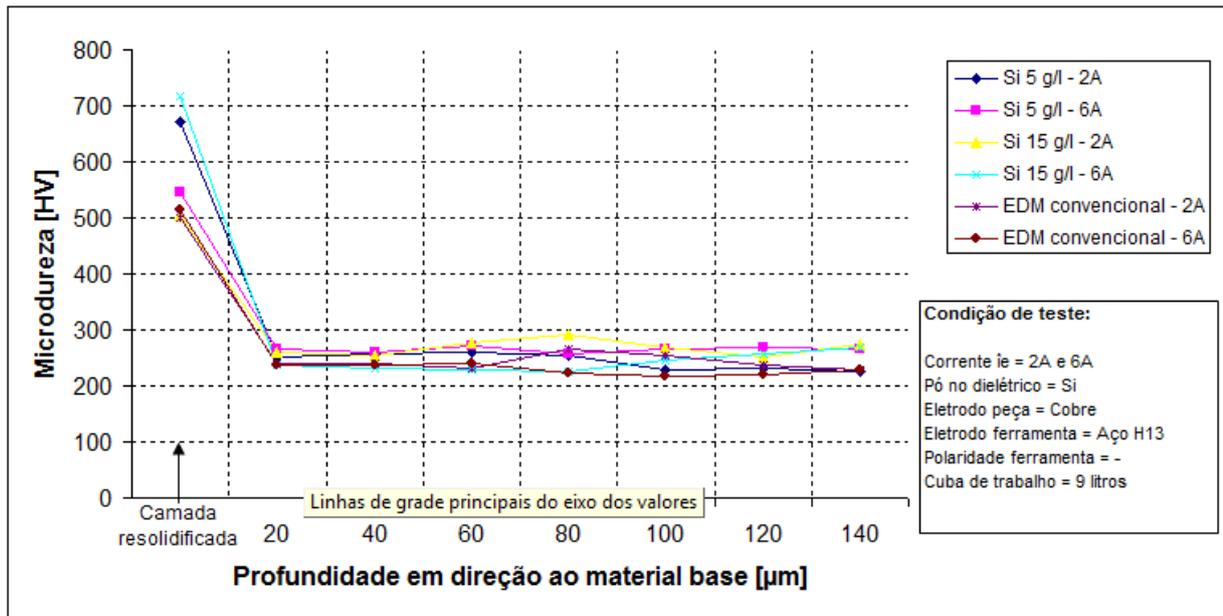


Figura 5.2.1 – Variação da microdureza Vickers [HV] após usinagem com pó de silício no processo de EDM.

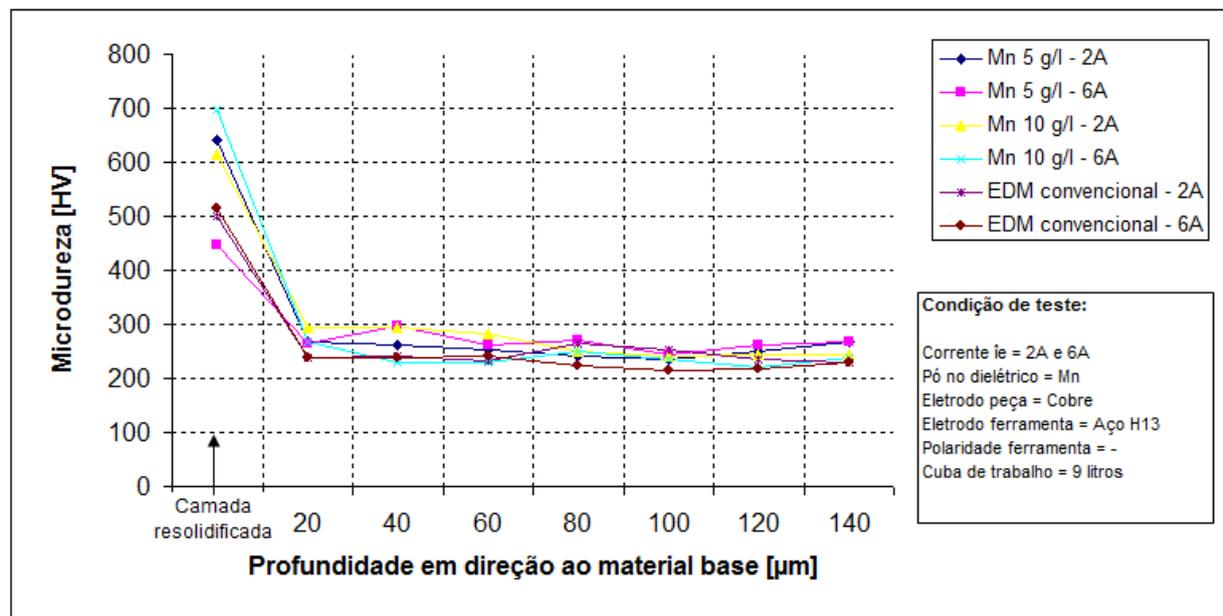


Figura 5.2.2 – Variação da microdureza Vickers [HV] após usinagem com pó de manganês no processo de EDM.

Referente às medições de micro dureza, pode ser notado pelas figuras 5.2.1 e 5.2.2 que a dureza logo após a camada resolidificada (20 μm abaixo da superfície) apresenta a mesma dureza do material base das amostras. Como baixas correntes de descargas foram utilizadas (2

A e 6 A), o aquecimento da superfície eletroerodida não foi suficiente para promover uma profunda zona termicamente afetada. A camada resolidificada apresentou uma maior influência em termos de dureza Vickers [HV], com valores de microdureza de até 40 % maior ao encontrado para o material base, neste caso o aço H13. Algumas diferenças nas medições de micro-dureza podem ser devido a micro-trincas presentes na camada resolidificada, que podem ter interferido na medição de micro-dureza.

- Avaliação do perfil de dureza no caso do pó de silício

Quando utilizado pó de silício em suspensão no dielétrico, os maiores valores de microdureza Vickers foram obtidos com uma concentração de pó de 15 g/l e corrente \hat{i}_e de 6 A e concentração de 5 g/l e corrente \hat{i}_e de 2 A, respectivamente. Para a concentração de 5 g/l e corrente \hat{i}_e de 6 A e 15 g/l e corrente \hat{i}_e de 2 A os valores de microdureza ficaram muito próximos quando comparado com o processo convencional de EDM, com uma microdureza inferior ao dois primeiros casos descritos inicialmente.

Assim como na análise de rugosidade descrita no tópico anterior, pode ser visto também a influência do pó de silício em suspensão no dielétrico nos valores de microdureza encontrados na camada resolidificadas das amostras. Os valores de microdureza encontrados após usinagem com a utilização com o pó de silício podem ser encontrados na tabela 5.2.

Tabela 5.2 – Valores de microdureza Vickers [HV] referente à camada resolidificada após usinagem com pó de silício

Pó em suspensão	Concentração [g/l]	Corrente \hat{i}_e [A]	Micro-dureza [HV]
Silício	5	2	672
		6	545
	15	2	503
		6	718
Sem pó	---	2	500
	---	6	513

Como mostra a tabela 5.2, para uma baixa concentração de pó no dielétrico uma baixa corrente \hat{i}_e deve ser utilizada para promover maiores valores de microdureza. Para os ensaios realizados com a concentração de 5 g/l e corrente \hat{i}_e de 2 A uma microdureza de 672 HV foi encontrada, contra uma microdureza de 545 HV para a corrente \hat{i}_e de 6 A. Quando utilizado concentrações mais altas, uma corrente \hat{i}_e mais alta é necessária para atingir valores maiores de microdureza. Para os ensaios realizados com a concentração de 15 g/l e corrente \hat{i}_e de 6 A uma

microdureza de 718 HV foi encontrada, contra uma microdureza de 503 HV para a corrente \hat{i}_e de 2 A.

- Avaliação do perfil de dureza no caso do pó de manganês

Quando utilizado pó de manganês em suspensão no dielétrico, os maiores valores de microdureza Vickers foram obtidos com uma concentração de pó de 10 g/l e corrente \hat{i}_e de 6 A e concentração de 5 g/l e corrente \hat{i}_e de 2 A, respectivamente. Logo abaixo, a terceira maior dureza encontrada foi com uma concentração de pó de 10 g/l e corrente \hat{i}_e de 2 A. Para a concentração de 5 g/l e corrente \hat{i}_e de 6 A o valor da microdureza encontrado ficou abaixo dos valores referente ao processo convencional de EDM

Assim como na análise de rugosidade descrita no tópico anterior, pode ser visto também a influência do pó de manganês em suspensão no dielétrico nos valores de microdureza encontrados na camada resolidificadas das amostras. Os valores de microdureza encontrados após usinagem com a utilização com o pó de manganês podem ser encontrados na tabela 5.2.1.

Tabela 5.2.1 – Valores de microdureza Vickers [HV] referente à camada resolidificada após usinagem com pó de manganês

Pó em suspensão	Concentração [g/l]	Corrente \hat{i}_e [A]	Micro-dureza [HV]
Manganês	5	2	642
		6	448
	10	2	615
		6	698
Sem pó	---	2	500
	---	6	513

Como mostra a tabela 5.2.1, para uma baixa concentração de pó no dielétrico uma baixa corrente \hat{i}_e deve ser utilizada para promover maiores valores de microdureza. Para os ensaios realizados com a concentração de 5 g/l e corrente \hat{i}_e de 2 A uma microdureza de 642 HV foi encontrada, contra uma microdureza de 448 HV para a corrente \hat{i}_e de 6 A. Quando utilizado concentrações mais altas, uma corrente \hat{i}_e mais alta é necessária para atingir valores maiores de microdureza. Para os ensaios realizados com a concentração de 10 g/l e corrente \hat{i}_e de 6 A uma microdureza de 698 HV foi encontrada, contra uma microdureza de 615 HV para a corrente \hat{i}_e de 2 A.

Para ambos os pós, silício e manganês, os maiores valores de microdureza da camada resolidificada foram atingidas com parâmetros similares do processo de PMEDM. As principais diferenças entre os dois tipos de pó, em termos de microdureza, foi o maior valor de microdureza encontrado para o pó de manganês, para a concentração de 10 g/l e corrente i_e de 2 A, e o menor valor de microdureza comparado com o material base para a concentração de 5 g/l e corrente i_e de 6 A.

Devido às altas temperaturas do canal de plasma, os pós em suspensão podem se combinar com o carbono, através da desintegração do hidrocarboneto do dielétrico, e gerar carbetos de alta dureza na superfície usinada, segundo Okada (2000).

5.3 Resultados das análises micrográficas das amostras após PMEDM

Neste tópico serão apresentados os resultados das micrografias das seções transversais das amostras eletroerodidas, sob condições de usinagem com e sem a utilização de pós em suspensão no dielétrico. As análises foram realizadas em um microscópio óptico OLYMPUS BX60, com o auxílio de um software específico para o processamento das imagens.

5.3.1 Micrografias das amostras usinadas pelo processo convencional de EDM

Na figura 5.3.1 pode ser visto a micrografia da seção transversal das amostras do aço H13 usinadas sem a utilização de pós em suspensão no dielétrico. A análise destas micrografias será tomada como comparativo para avaliar a influência da utilização dos pós de silício e manganês no dielétrico.

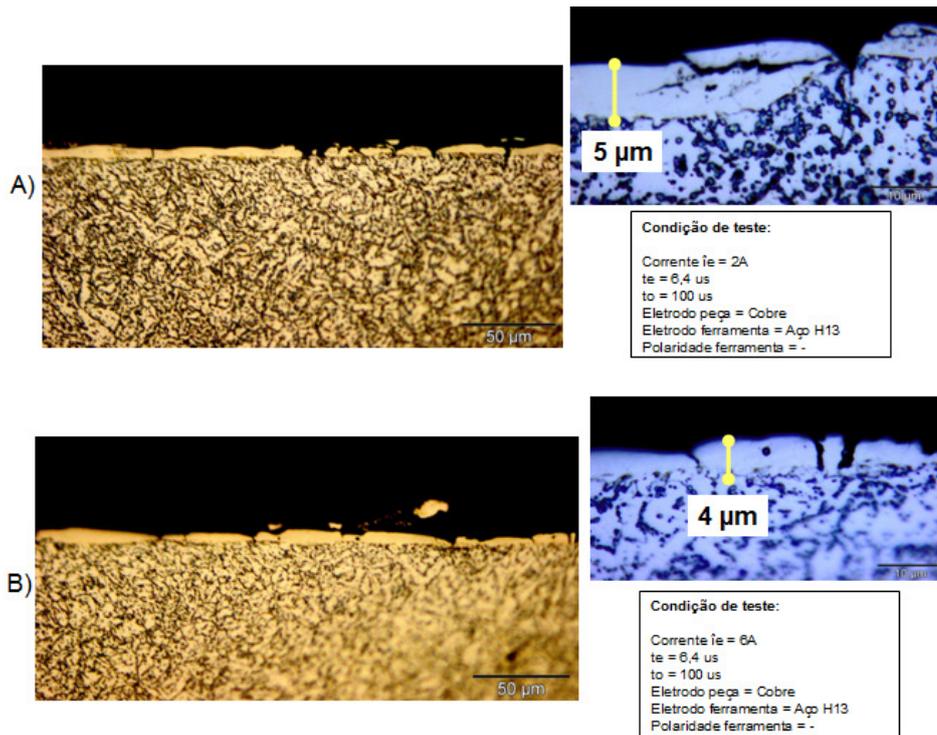


Figura 5.3.1– Micrografia da seção transversal do aço H13 após usinagem convencional do processo de EDM. Correntes \hat{i}_e de 2 A e 6 A.

As amostras descritas acima foram usinadas fora da cuba de trabalho, e utilizando o sistema convencional do equipamento CHARMILLES TECHNOLOGIES ROBOFORM 30 CNC.

Através da micrografia da figura 5.3.1, pode ser visualizado a formação da camada branca para ambos os casos (corrente \hat{i}_e de 2 A e 6 A, sem a adição de pó no dielétrico). Para estes casos a formação da camada branca é totalmente irregular, com a presença de muitas microtrincas e poros. A espessura da camada branca atingiu valores de 5 μm para a corrente \hat{i}_e de 2 A e 4 μm para a corrente \hat{i}_e de 6 A.

5.3.2 Micrografias das amostras usinadas com pó de silício

Na figura 5.3.2 pode ser visto a micrografia da seção transversal de uma amostra de aço H13 usinada com a utilização de pó de silício em suspensão no dielétrico. Para a usinagem desta amostra uma concentração de silício de 5 g/l e corrente \hat{i}_e de 2 A foi utilizada.

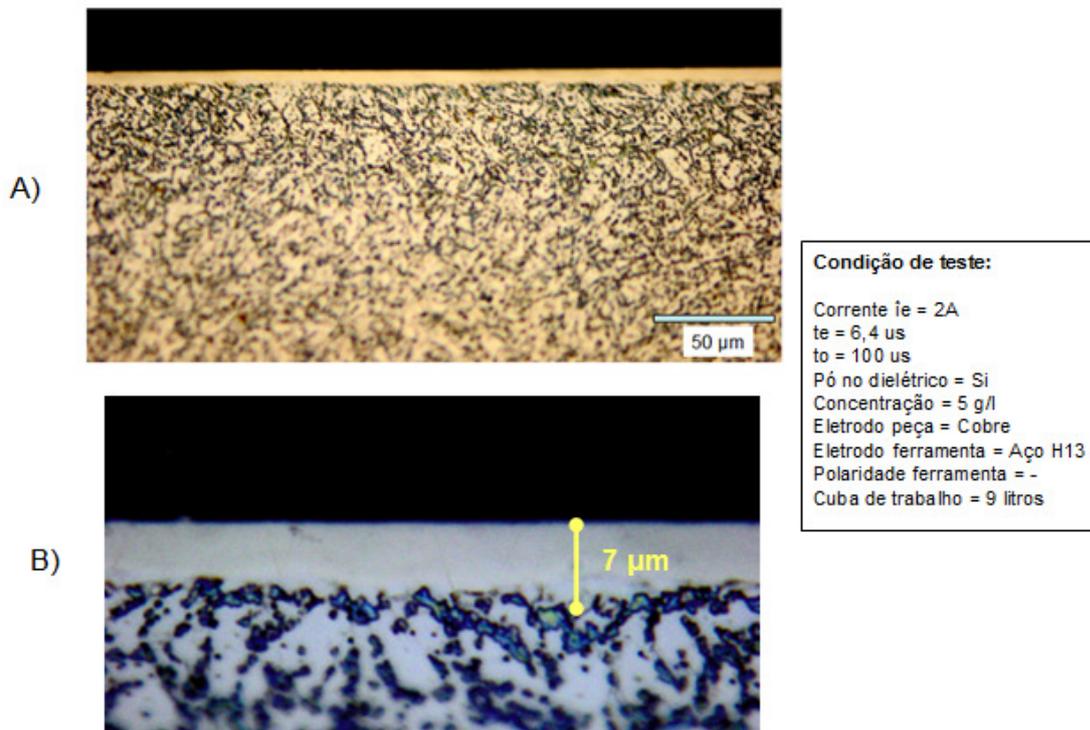


Figura 5.3.2 – Micrografia da seção transversal do aço H13 após usinagem com pó de silício no processo de PMEDM. Concentração de 5 g/l e corrente i_e de 2 A.

Como pode ser visto na micrografia A e B da figura 5.3.2, a camada resolidificada com a utilização de pó de silício para esta condição de usinagem apresenta uma camada totalmente uniforme, sem a presença de microtrincas e poros. Esta camada representa o material liquefeito que não foi expulso pela lavagem e que acabou por se solidificar na cratera e nas regiões circunvizinhas. É interessante observar a ausência de microtrincas desta camada, pois estas microtrincas são normalmente geradas em processos convencionais de EDM. A espessura máxima atingida para esta camada superficial, para este caso, está em torno de 7 μm . Observa-se também que a camada branca apresentou uniformidade de espessura.

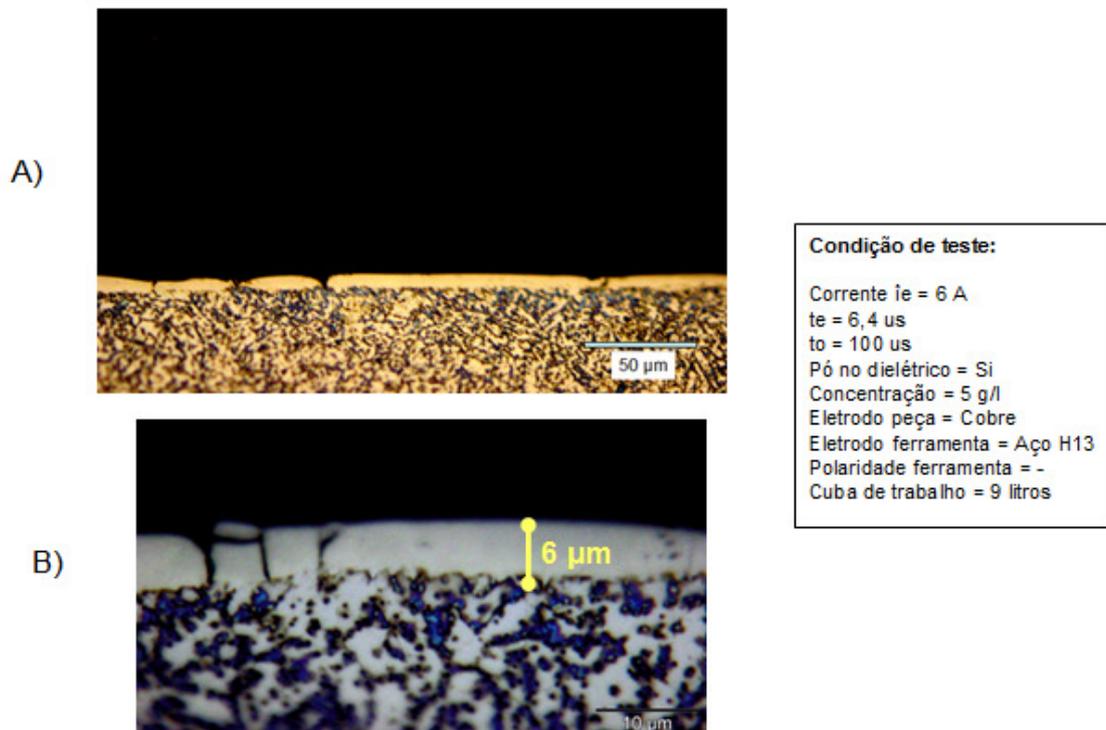


Figura 5.3.2.1 – Micrografia da seção transversal do aço H13 após usinagem com pó de silício no processo de PMEDM. Concentração de 5 g/l e corrente i_e de 6 A.

Na figura 5.3.2.1, é possível notar a influência do aumento da corrente i_e no processo de PMEDM. Ao comparar a camada resolidificada com a situação descrita anteriormente (concentração de 5 g/l e corrente i_e de 2 A), podemos notar que a camada não apresenta uniformidade ao longo da superfície, apresentando várias microtrincas. Com o aumento da corrente i_e ocorre o aumento da energia de descarga, representada por $W_e \approx u_e \cdot i_e \cdot t_e$ [], acarretando uma maior aquecimento da superfície eletroerodida, influenciando negativamente na resolidificação do material na superfície. É interessante observar que a micro-fissura não se propaga para o material base do aço H13. Observa-se também que a espessura da camada resolidificada atingiu um valor máximo de 6 μm , não apresentando uniformidade ao longo da superfície.

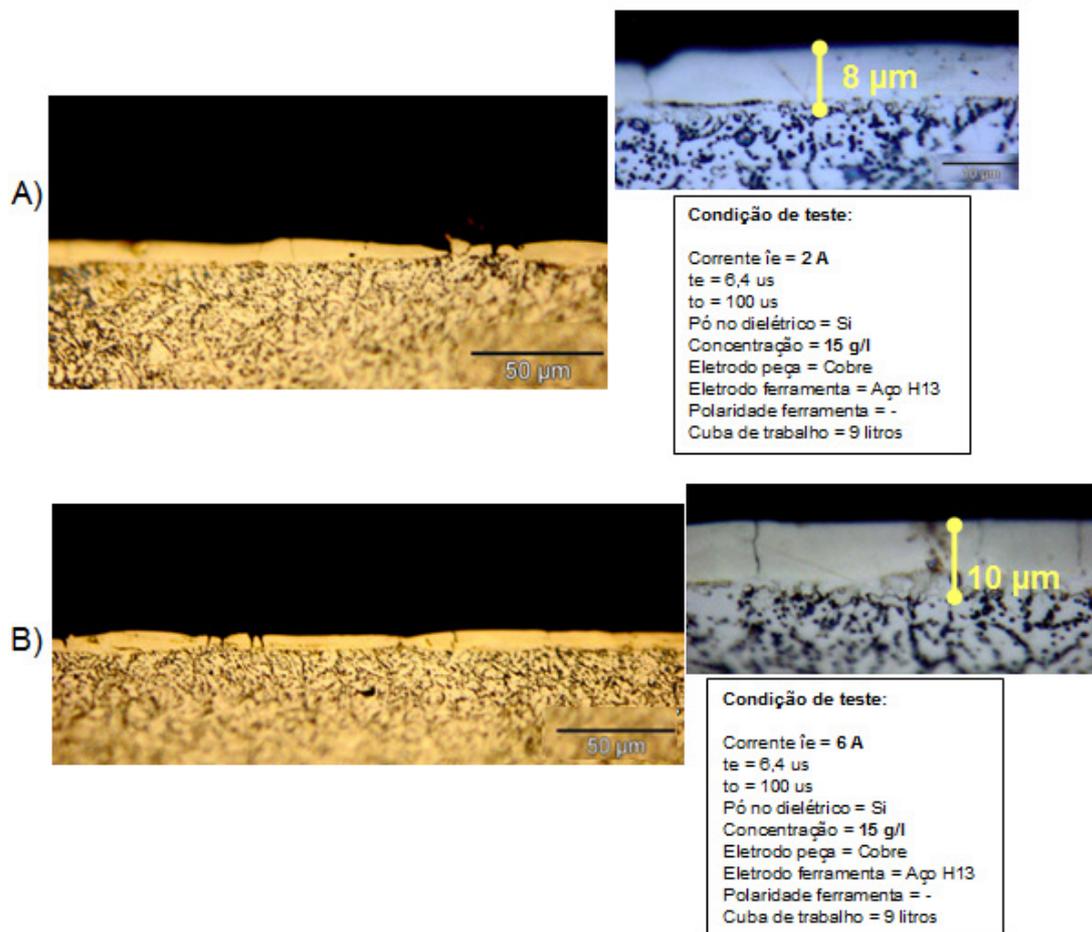


Figura 5.3.2.2 – Micrografia da seção transversal do aço H13 após usinagem com pó de silício no processo de PMEDM. Concentração de 15 g/l e corrente \hat{i}_e de 2 A e 6 A.

As micrografias A e B da figura 5.3.2.2 mostram a seção transversal da amostra do aço H13 usinada com uma concentração de 15 g/l de pó de silício para dois casos: A - concentração de 15 g/l e corrente \hat{i}_e de 2 A e B - Concentração de 15 g/l e corrente \hat{i}_e de 6 A. Para ambos os casos a camada resolidificada apresentou várias microtrincas, poros e sem uniformidade de espessura. Para o caso A a espessura atingiu um valor máximo de 8 μm , e para o caso B espessura máxima de 10 μm . Quando utilizado concentrações mais altas no processo de PMEDM, existe uma grande contaminação na região da fenda de trabalho, fazendo com o processo se torne instável e com a presença de curtos-circuitos, afetando diretamente a formação da camada resolidificada da peça.

Pode ser visto claramente que os melhores resultados em termos da uniformidade da camada resolidificada foi obtido com a concentração de 5 g/l e corrente \hat{i}_e de 2 A, conforme mostrado na figura 5.3.2.

5.3.3 Micrografias das amostras usinadas com pó de manganês

Na figura 5.3.3 pode ser visto a micrografia da seção transversal de uma amostra de aço H13 usinada com a utilização de pó de manganês em suspensão no dielétrico. Para a usinagem desta amostra uma concentração de manganês de 5 g/l e corrente i_e de 2 A foi utilizada.

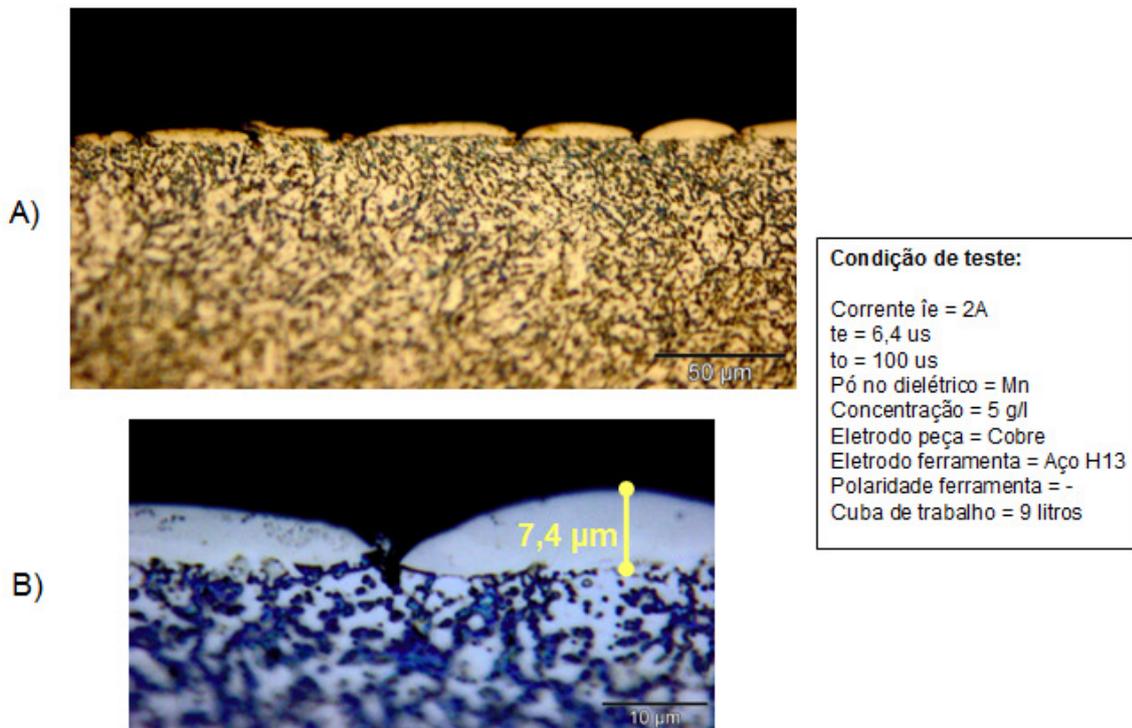


Figura 5.3.3 – Micrografia da seção transversal do aço H13 após usinagem com pó de manganês no processo de PMEDM. Concentração de 5 g/l e corrente i_e de 2 A.

Como pode ser visto na micrografia A e B da figura 5.3.3, a camada resolidificada com a utilização de pó de manganês para esta condição de usinagem apresenta uma camada totalmente irregular. Esta camada representa o material fundido na superfície da peça e que não foi expulso pela lavagem e que acabou por se solidificar na cratera e nas regiões circunvizinhas. É interessante observar que a camada resolidificada não apresenta uniformidade de espessura, mas se avaliarmos a micrografia B da figura 5.3.3, a densidade de microtrincas e poros é muito inferior ao comparado com a usinagem sem a utilização de

pó em suspensão para a corrente i_e de 2 A, figura 5.3.1. A espessura máxima atingida para esta camada superficial, para este caso, está em torno de 7,4 μm .

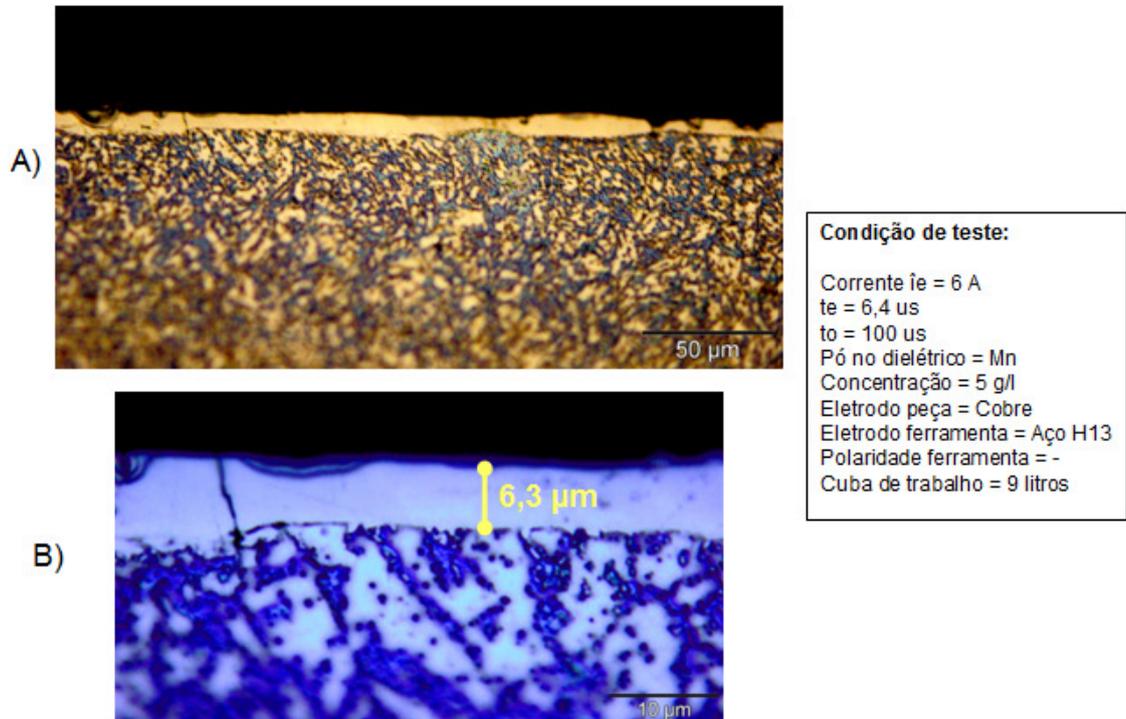


Figura 5.3.3.1 – Micrografia da seção transversal do aço H13 após usinagem com pó de manganês no processo de PMEDM. Concentração de 5 g/l e corrente i_e de 6 A.

Na figura 5.3.3.1, é possível notar a influência do aumento da corrente i_e no processo de PMEDM. Ao comparar a camada resolidificada com a situação descrita anteriormente (concentração de 5 g/l e corrente i_e de 2 A), podemos notar que a camada formada apresenta uma melhor uniformidade de espessura ao longo da superfície da peça, situação contrária a encontrada com a utilização de pó de silício. Apesar da maior uniformidade desta camada, microtrincas e poros ainda são encontrados. Com o aumento da corrente i_e ocorre o aumento da energia de descarga, representada por $W_e \approx u_e \cdot i_e \cdot t_e$ [J], acarretando uma maior aquecimento da superfície eletroerodida, para o caso do pó de manganês esta maior energia de descarga influenciou positivamente no processo, em termos de uniformidade da espessura da camada resolidificada. É interessante observar que a microfissura não se propaga para o material base do aço H13. Observa-se também que a espessura da camada resolidificada atingiu um valor máximo de 6,3 μm .

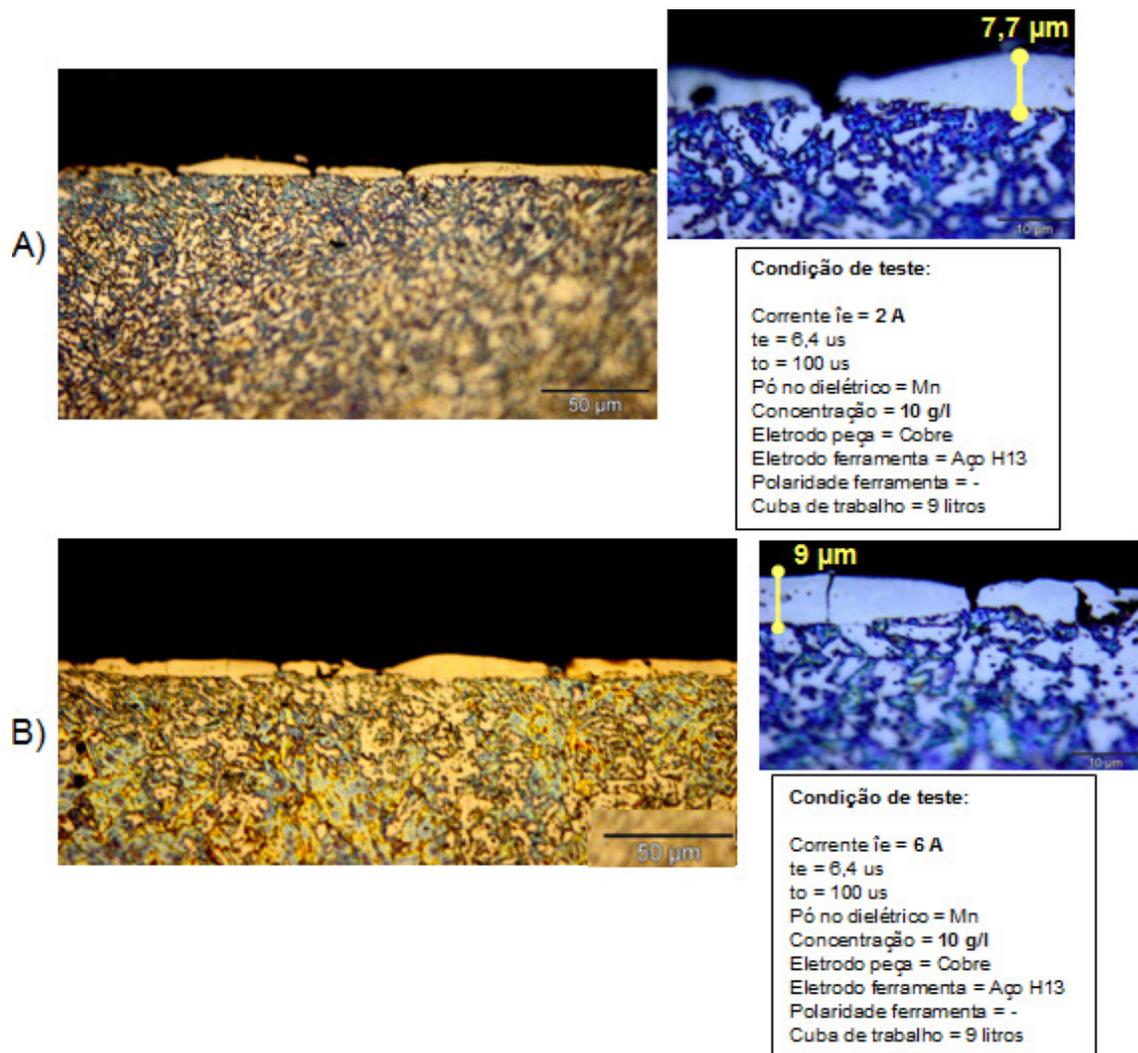


Figura 5.3.3.2 – Micrografia da seção transversal do aço H13 após usinagem com pó de manganês no processo de PMEDM. Concentração de 10 g/l e corrente i_e de 2 A e 6 A.

As micrografias A e B da figura 5.3.3.2 mostram a seção transversal da amostra do aço H13 usinada com uma concentração de 10 g/l de pó de manganês para dois casos: A - concentração de 10 g/l e corrente i_e de 2 A e B - Concentração de 10 g/l e corrente i_e de 6 A. Para ambos os casos a camada resolidificada apresentou várias microtrincas, poros e sem uniformidade de espessura. Para o caso A a espessura atingiu um valor máximo de 7,7 μm , e para o caso B espessura máxima de 9 μm .

Pode ser visto que os melhores resultados em termos da uniformidade da camada resolidificada foi obtido com a concentração de 5 g/l e corrente i_e de 6 A, conforme mostrado na figura 5.3.3.1.

5.3.4 Considerações sobre as micrografias analisadas

Quando utilizado concentrações mais altas no processo de PMEDM, existe uma grande contaminação na região da fenda de trabalho, fazendo com o processo se torne instável e com a presença de curtos-circuitos, afetando diretamente a formação da camada resolidificada da peça. No caso do pó de manganês melhores resultados em termos da uniformidade da camada resolidificada foram encontrados com maiores correntes i_e , neste caso 6 A ao invés de 2 A, segundo valores utilizados nos experimentos.

Os bons resultados encontrados para o pó de silício se devem principalmente o baixo valor de corrente i_e utilizado durante o ensaio e também devido à polaridade negativa do eletrodo-ferramenta, pois segundo Uno (1997) o processo de PMEDM trabalha com baixos valores de corrente, bem como a utilização de polaridade inversa do eletrodo-ferramenta, promovendo uma superfície com uma baixa rugosidade.

Provavelmente, uma das principais influências para as divergências de resultados dos pós utilizados, silício e manganês, se deram pela grande diferença de massas específicas entre os dois materiais. O pó de silício apresenta uma massa específica de 2,33 g/cm³, em torno de três vezes menor que a massa específica do pó de manganês 7,47 g/cm³. A massa específica do pó afeta diretamente a porcentagem de pó que pode ficar em suspensão no dielétrico, fazendo com que este pó penetre na fenda de trabalho. No caso do manganês, o pó apresenta uma maior dificuldade para ficar em suspensão, e como conseqüência uma menor concentração de pó estará presente na fenda de trabalho, pois possivelmente uma quantidade razoável de pó de manganês decantou na cuba de trabalho durante os experimentos.

5.4 Resultado das análises de Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)

A técnica de microscopia eletrônica de varredura (MEV) foi utilizada para uma melhor avaliação da camada resolidificada após a usinagem por PMEDM.

Inicialmente será apresentado o MEV dos pós utilizados (silício e manganês), onde será possível visualizar o formato e tamanho das partículas. Na seqüência será apresentada a análise MEV das amostras usinadas. Para a análise MEV, foram selecionadas as amostras que

apresentaram os melhores resultados em termos de formação da camada resolidificada com base na análise micrografia do tópico anterior.

5.4.1 MEV dos pós de silício e manganês

Na figura 5.4.1 e 5.4.1.1 pode ser visto a microscopia (MEV) de uma pequena amostra de pó de silício e manganês utilizado nos experimentos.

Pode ser visto nas figuras o formato das partículas dos pós, que segundo informações do fabricante apresenta um tamanho de partícula inferior a 5 μm para o silício e inferior a 10 μm para o manganês.

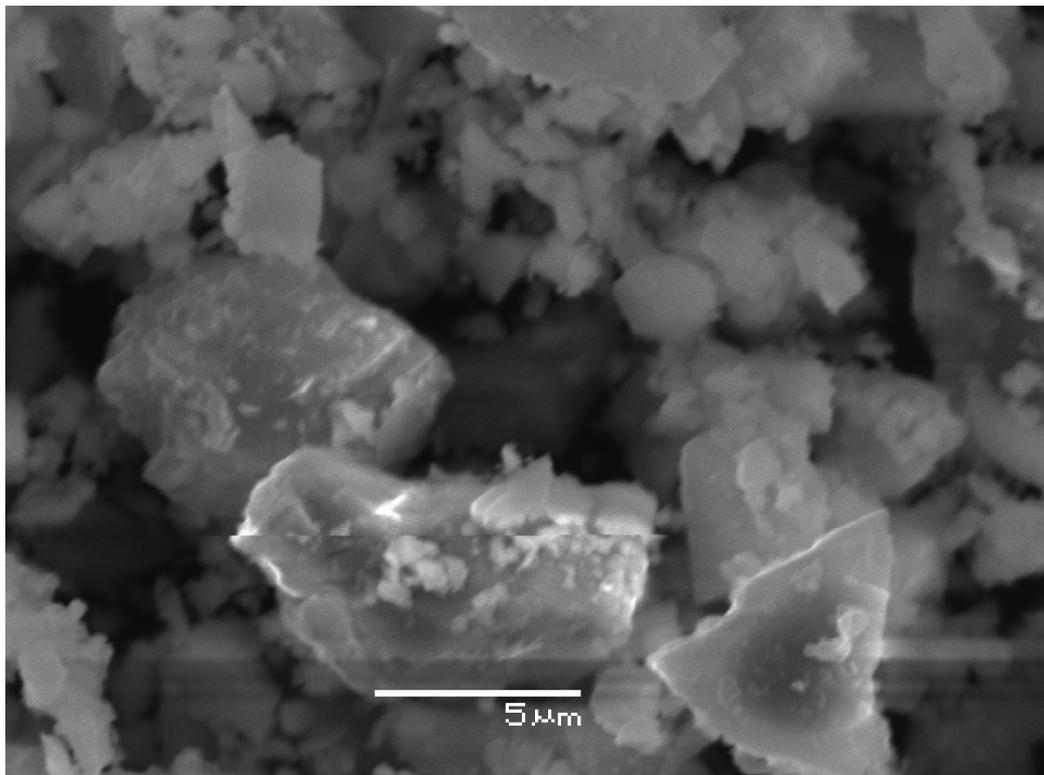


Figura 5.4.1 – Microscopia (MEV) do pó de silício

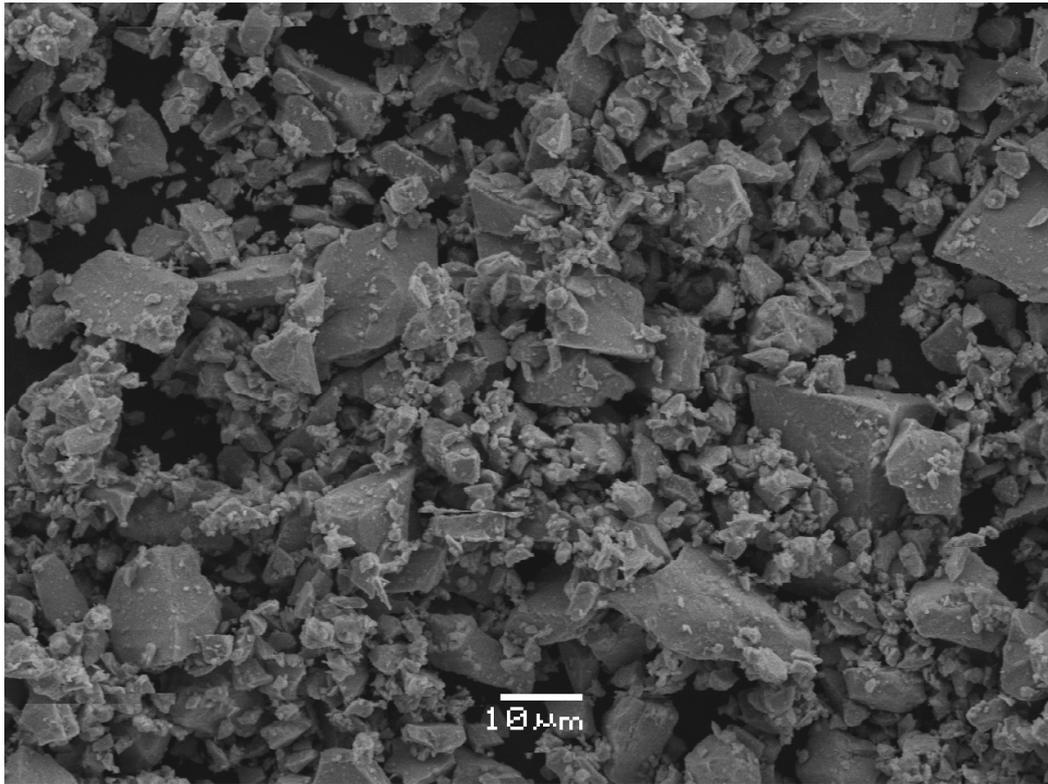


Figura 5.4.1.1 – Microscopia (MEV) do pó de manganês

5.4.2 MEV das amostras que apresentaram melhores resultados na formação da camada resolidificada após usinagem por PMEDM

Com base nos resultados encontrados com a micrografia das amostras que foram discutidas no capítulo anterior, os melhores resultados em termos da uniformidade da camada resolidificada foram escolhidos para a análise MEV. Na tabela 5.4.2 pode ser visto os detalhes das amostras escolhidas.

Tabela 5.4.2 – Amostras definidas para a microscopia MEV

Amostra	Pó	Concentração de pó [g/l]	Corrente de descarga [A]
1	Si	5	2
2		15	
3	Mn	5	6
4		10	
5	Sem pó	---	2

- MEV das amostras 1 e 2 – PMEDM com pó de silício

Nas figuras 5.4.2 e 5.4.2.1 pode ser visto MEV após usinagem com pó de silício para uma corrente de descarga i_e de 2 A, e concentrações de 5 g/l e 15 g/l, respectivamente.

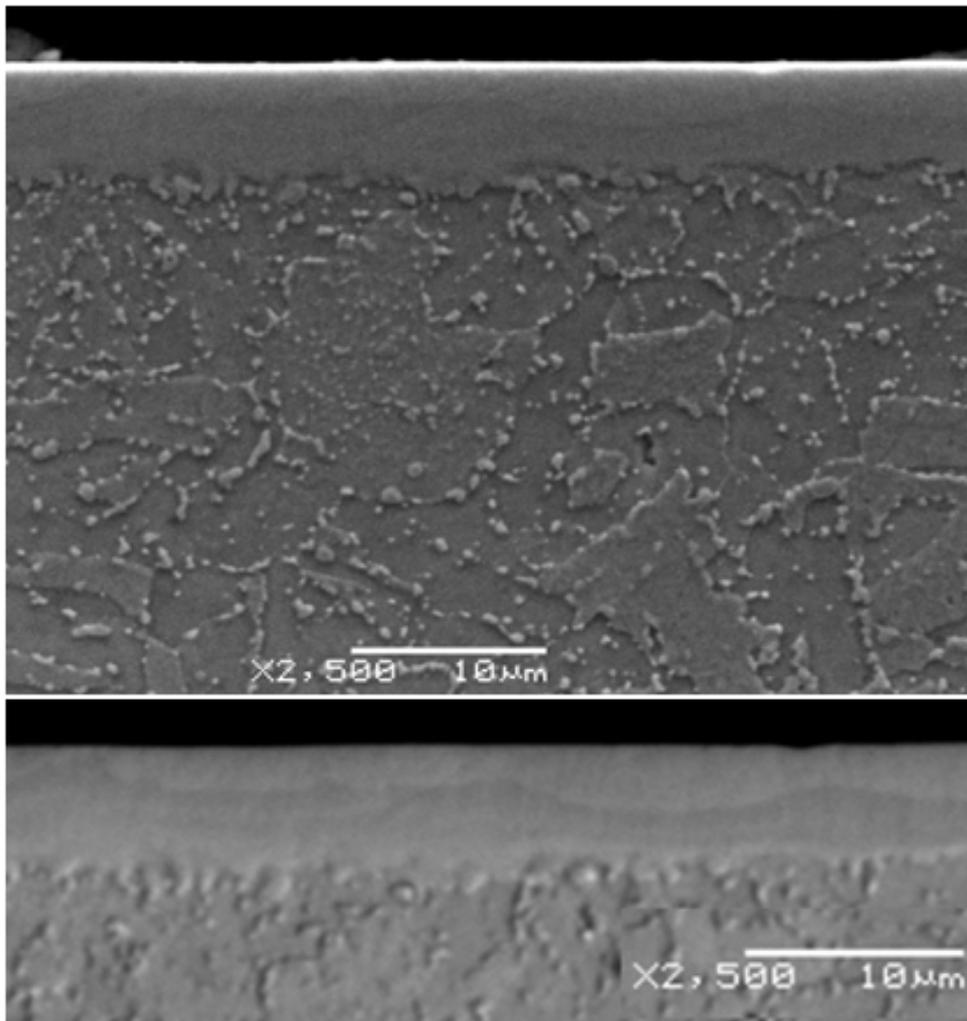


Figura 5.4.2 – Microscopia (MEV) da amostra 1, usinada com pó de silício com concentração de 5 g/l e corrente i_e de 2 A.

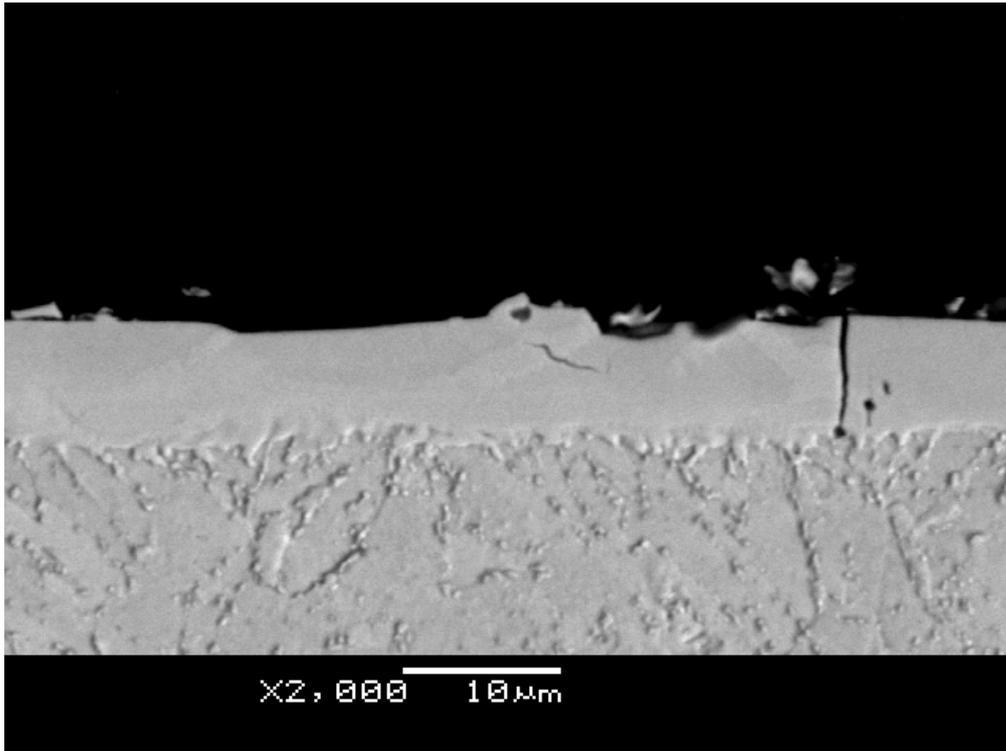


Figura 5.4.2.1 – Microscopia (MEV) da amostra 2, usinada com pó de silício com concentração de 15 g/l e corrente i_e de 2 A.

Assim como identificado na micrografia do tópico anterior, o MEV da amostra 1 apresenta uma camada uniforme, e sem a presença de microtrincas, quando utilizado pó de silício com concentração de 5 g/l e corrente i_e de 2 A. Nas figuras 5.4.2 e 5.4.2.1 podem ser observados “manchas” entre a parte superior e a parte inferior da camada resolidificada, essas manchas possivelmente indicam a diferença do número atômico nesta camada, sendo que as manchas mais claras apresentam um maior número atômico. Para a amostra 2, pode ser visto a influência do aumento de concentração de silício no dielétrico, apresentando uma camada resolidificada com a presença de microtrincas e uma superfície mais irregular, quando comparado com a amostra 1.

De acordo com Singh (2005) com a utilização de pós em suspensão no dielétrico ocorre um aumento da fenda de trabalho, melhorando o acabamento da superfície da peça, como resultado, o processo de EDM torna-se mais estável, promovendo uma camada resolidificada mais uniforme. Provavelmente com uma maior fenda de trabalho seja possível gerar um canal de plasma mais largo, possibilitando a formação de uma camada resolidificada mais uniforme.

Um ponto interessante que pode ser discutido neste tópico é o relato de Tzeng (2005), sobre a influência de concentração do pó no dielétrico. Segundo Tzeng (2005) a concentração

apresenta pouca influência no processo de EDM, fato que não ocorreu no trabalho em questão, onde ao variar a concentração de pó em suspensão no dielétrico diferentes resultados foram encontrados em termos da uniformidade da camada resolidificada

- MEV das amostras 3 e 4 – PMEDM com pó de manganês

Nas figuras 5.4.2.2 e 5.4.2.3 pode ser visto MEV após usinagem com pó de manganês para uma corrente de descarga i_e de 6 A, e concentrações de 5 g/l e 10 g/l, respectivamente.

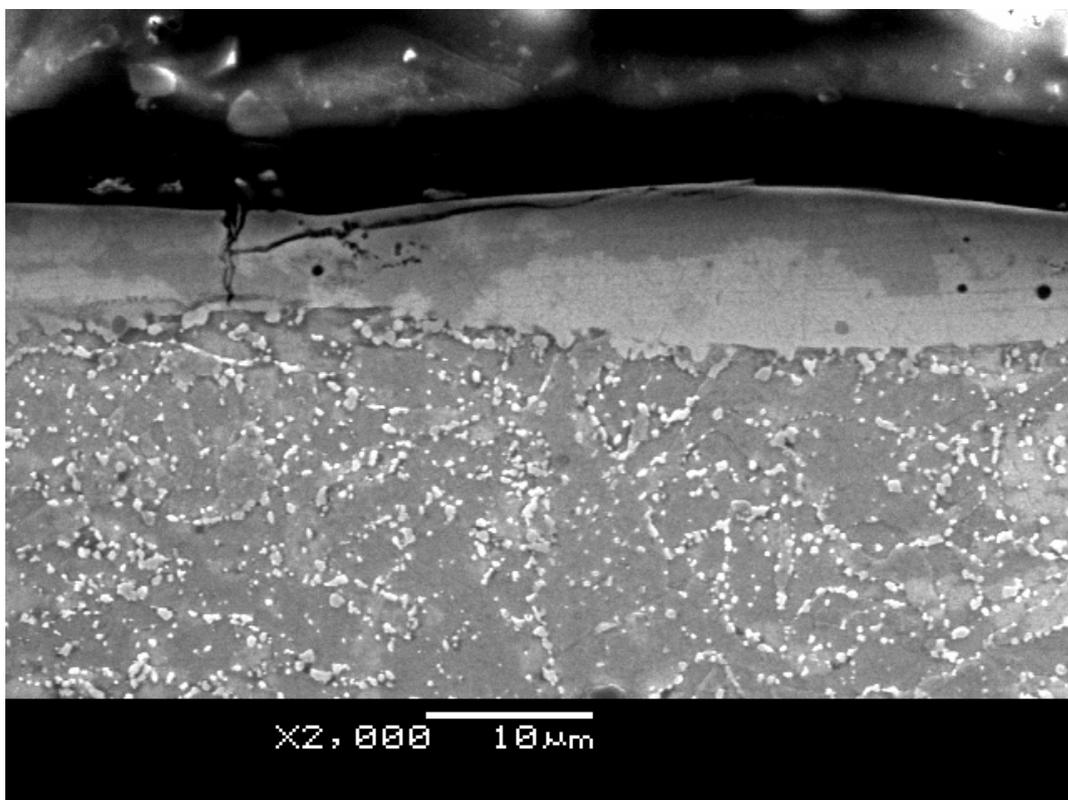


Figura 5.4.2.2 – Microscopia (MEV) da amostra 3, usinada com pó de manganês com concentração de 5 g/l e corrente i_e de 6 A.

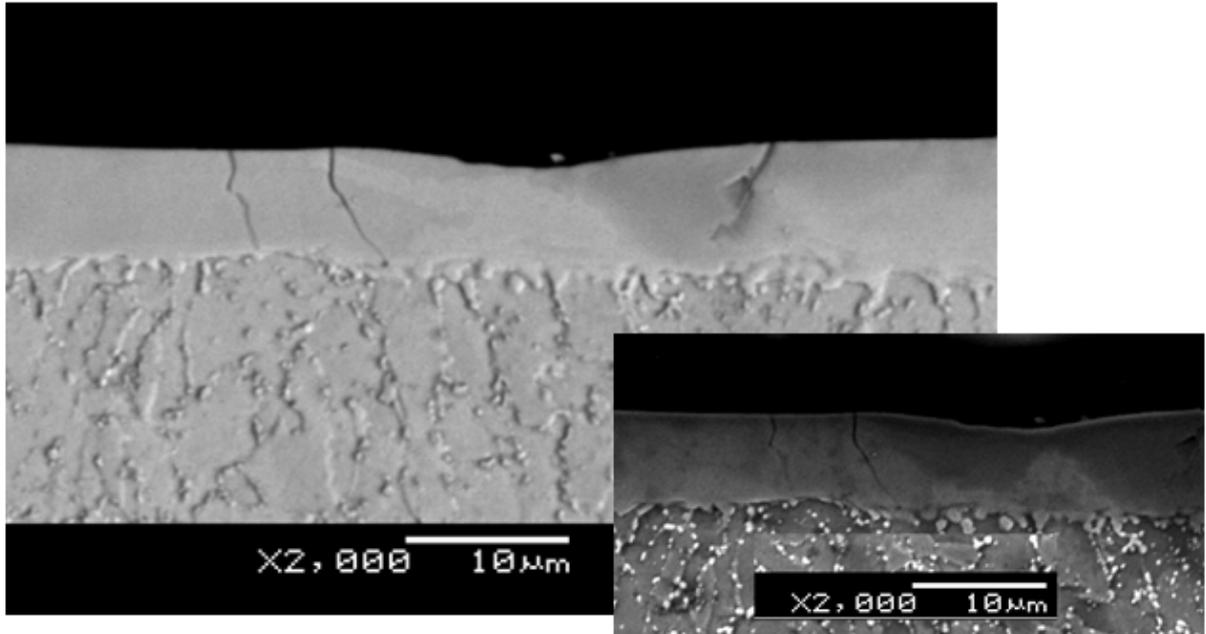


Figura 5.4.2.3 – Microscopia (MEV) da amostra 4, usinada com pó de manganês com concentração de 10 g/l e corrente i_e de 6 A.

Assim como identificado na micrografia do tópico anterior, o MEV da amostra 3 e 4 não apresentam uma camada totalmente uniforme, apresentando uma grande variação de espessura. A presença de microtrincas também pode ser visto em ambos as amostras. Nas figuras 5.4.2.2 e 5.4.2.3 também podem ser notados “manchas” na camada resolidificada.

- MEV da amostra 5 – processo convencional de EDM (sem pó no dielétrico)

Na figura 5.4.2.4 pode ser visto MEV após usinagem com o processo convencional de EDM com a corrente de descarga i_e de 2 A. Para esta usinagem foi utilizado o sistema convencional do equipamento CHARMILLES TECHNOLOGIES ROBOFORM 30 CNC. A amostra foi usinada fora da cuba de trabalho, sendo utilizado o tanque convencional do equipamento.

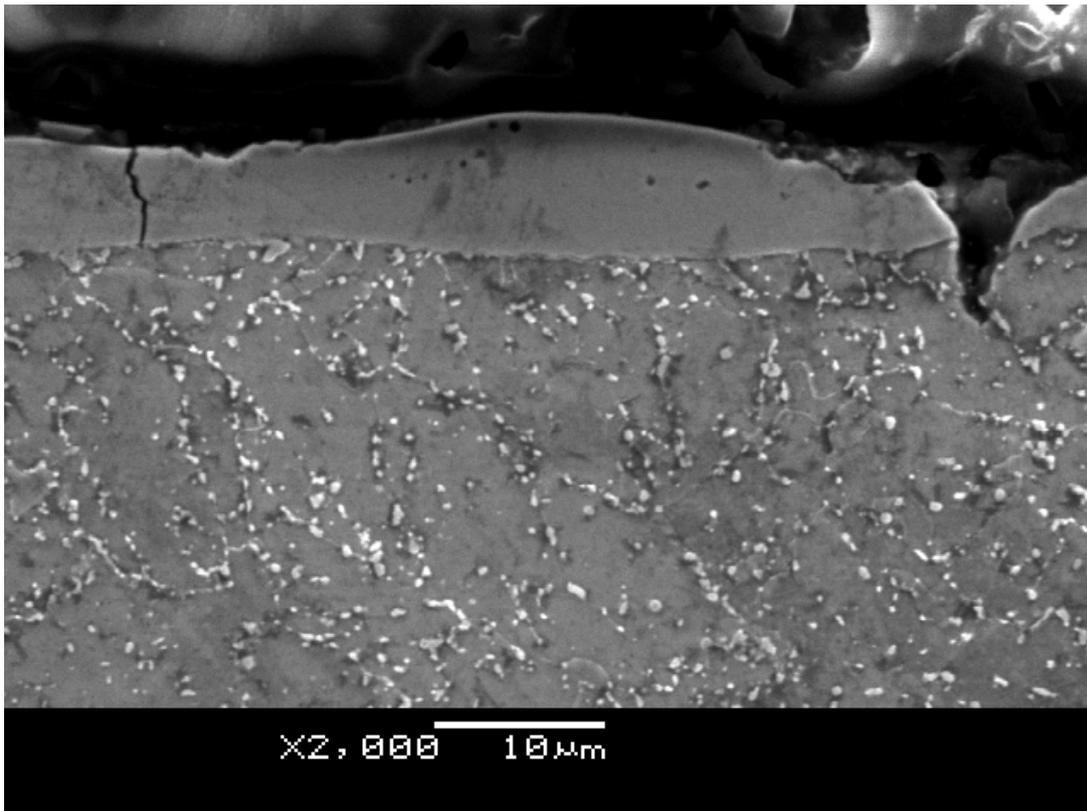


Figura 5.4.2.4 – Microscopia (MEV) da amostra 5, usinada com o processo convencional de EDM (corrente i_e de 2 A).

Com a usinagem convencional de EDM, a amostra apresentou uma camada resolidificada cheio de microtrincas, com uma grande variação de espessura, sendo claramente inferior ao processo de PMEDM em termos da uniformidade da camada resolidificada.

5.5 Resultados das análises de EDS (*Energy Dispersive Spectrometry*)

A fim de estabelecer um comparativo, a primeira amostra avaliada foi a de número 5, ou seja, a amostra usinada com o processo convencional de EDM, sem a utilização de pós em suspensão no dielétrico.

- EDS da amostra 5 (conforme tabela 5.4.2) – processo convencional de EDM (sem pó no dielétrico)

Como pode ser visto na figura 5.5.1, a porcentagem da massa atômica do silício não apresenta uma variação significativa ao longo da camada resolidificada em direção ao material base. Os outros elementos mostrados na figura 5.5.1, inclusive o silício, são elementos referentes à composição química do aço H13.

	Massa Atômica (%)				
	Si-K	V-K	Cr-K	Fe-K	Mo-L
<i>Ponto 1</i>	0.98	0.93	4.97	92.09	1.03
<i>Ponto 2</i>	1.09	1.19	5.43	92.14	0.15
<i>Ponto 3</i>	0.87	0.72	4.14	94.09	0.18

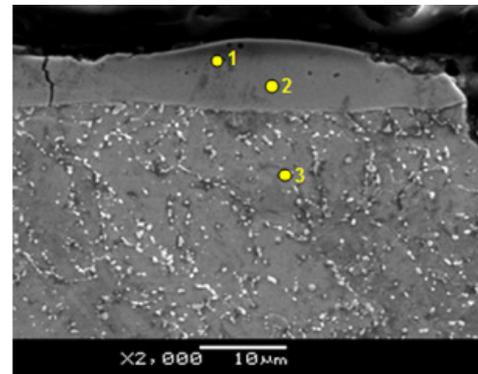


Figura 5.5.1 – EDS da amostra 5, usinada com o processo convencional de EDM (corrente i_e de 2 A).

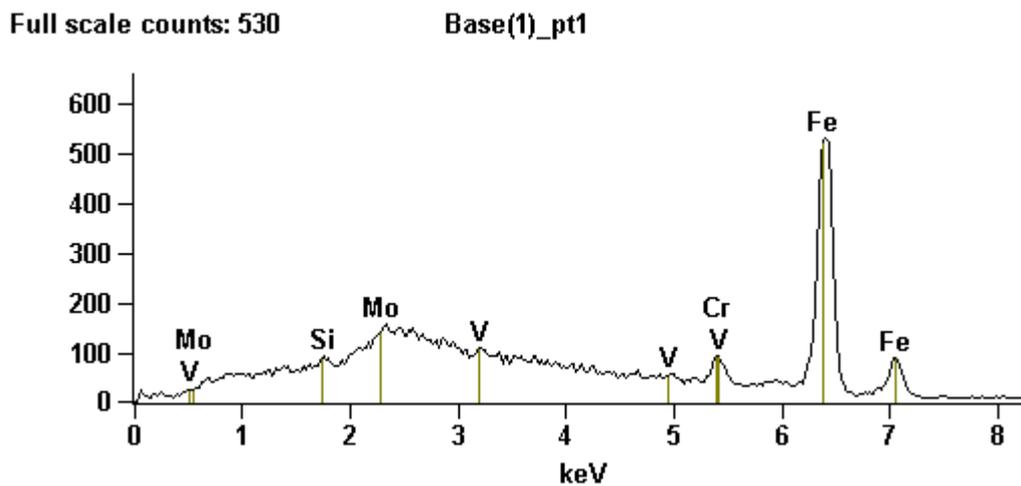


Figura 5.5.1.2 – Espectro EDS da amostra 5 (ponto 1), usinada com o processo convencional de EDM (corrente i_e de 2 A).

- EDS das amostras 1 e 2 (conforme tabela 5.4.2) – PMEDM com pó de silício

A figura 5.5.2 apresenta o EDS da amostra usinada com pó de silício com concentração de 5 g/l e corrente i_e de 2 A. Como pode ser visto a porcentagem da massa atômica do silício nos

pontos 1 e 2 apresentam maiores valores em termos de porcentagem de massa atômica quando comparado com o processo convencional de EDM.

	Massa Atômica (%)				
	Si-K	V-K	Cr-K	Fe-K	Mo-L
Ponto 1	2.43	1.83	6.71	87.90	1.12
Ponto 2	1.93	0.93	4.79	92.35	
Ponto 3	0.76	1.27	4.30	93.67	

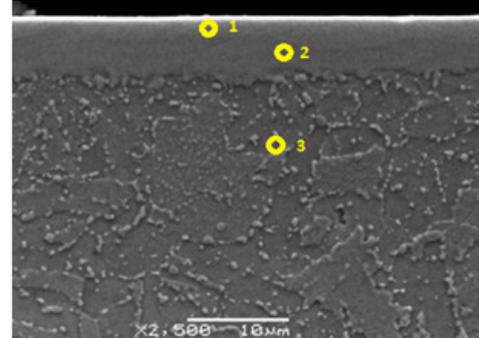


Figura 5.5.2 – EDS da amostra 1, usinada com pó de silício com concentração de 5 g/l e corrente iê de 2 A.

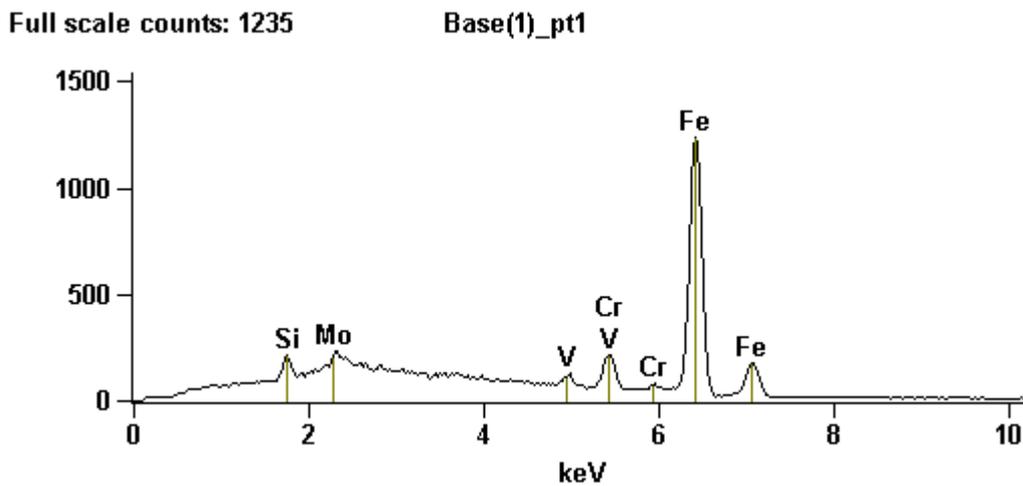


Figura 5.5.2.2 – Espectro EDS da amostra 1 (ponto 1), usinada com pó de silício com concentração de 5 g/l e corrente iê de 2 A.

Ao comparar o ponto 1 da figura 5.6.1 (EDM convencional) com o ponto 1 da figura 5.5.2 (PMEDM com pó de silício), pode ser vista a diferença da porcentagem atômica do silício entre as duas condições de testes, 0,98 % At contra 2,43 % At, ou seja, provavelmente houve agregação do pó de silício na camada resolidificada. A maior influência do silício na camada resolidificada foi à formação de uma camada homogênea e sem a presença de poros e microtrincas.

	Massa Atômica (%)				
	Si-K	V-K	Cr-K	Fe-K	Mo-L
Ponto 1	0.90	1.32	5.83	91.40	0.55
Ponto 2	0.93	0.61	5.32	92.96	0.17
Ponto 3	0.46	1.40	5.67	91.98	0.50
Ponto 4	0.43	3.09	5.40	90.12	0.97

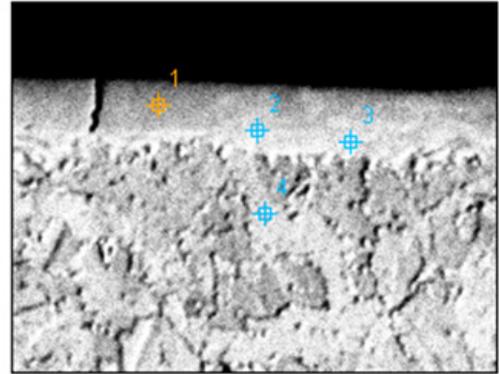


Figura 5.5.3 – EDS da amostra 2, usinada com pó de silício com concentração de 15 g/l e corrente i_e de 2 A.

A figura 5.5.3 apresenta o EDS da amostra usinada com pó de silício com concentração de 15 g/l e corrente i_e de 2 A. Apesar da maior concentração de pó no dielétrico, a porcentagem atômica de silício na camada resolidificada foi menor comparado com o caso anterior (concentração de 5 g/l de silício). Como descrito nos tópicos anteriores, uma maior concentração de silício no dielétrico proporcionou uma camada solidificada não uniforme, dificultando também a agregação do silício na camada resolidificada.

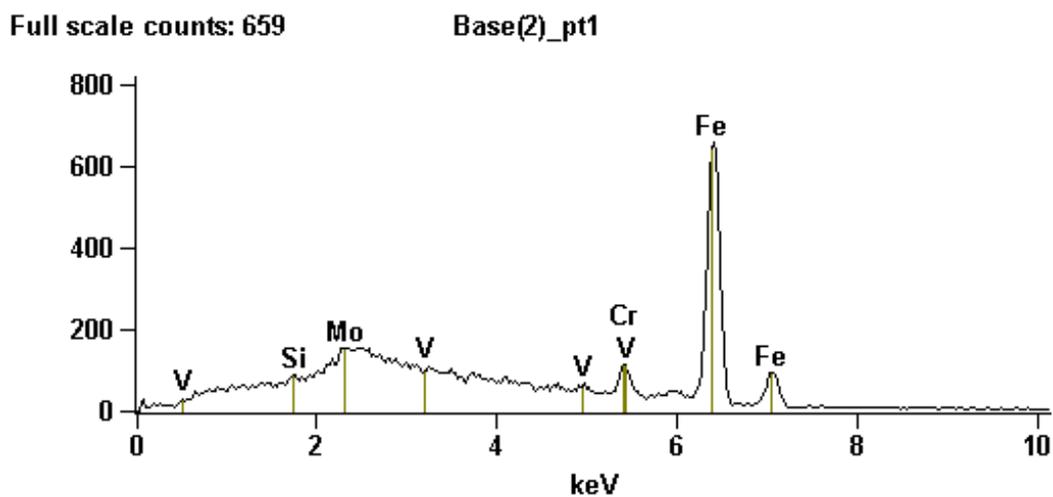


Figura 5.5.3.2 – Espectro EDS da amostra 2 (ponto 1), usinada com pó de silício com concentração de 15 g/l e corrente i_e de 2 A.

- EDS das amostras 3 e 4 (conforme tabela 5.4.2) – PMEDM com pó de manganês

A figura 5.5.4 apresenta o EDS da amostra usinada com pó de manganês com concentração de 5 g/l e corrente i_e de 6 A.

	Massa Atômica (%)				
	V-K	Cr-K	Fe-K	Cu-K	Mo-L
Ponto 1	2.10	6.61	91.30		
Ponto 2	1.86	5.53	88.80	1.80	0.94
Ponto 3	0.97	6.46	92.57		
Ponto 4	1.45	8.61	89.94		

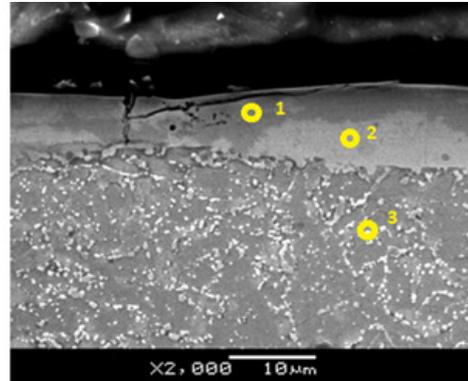


Figura 5.5.4 – EDS da amostra 3, usinada com pó de manganês com concentração de 5 g/l e corrente i_e de 6 A.

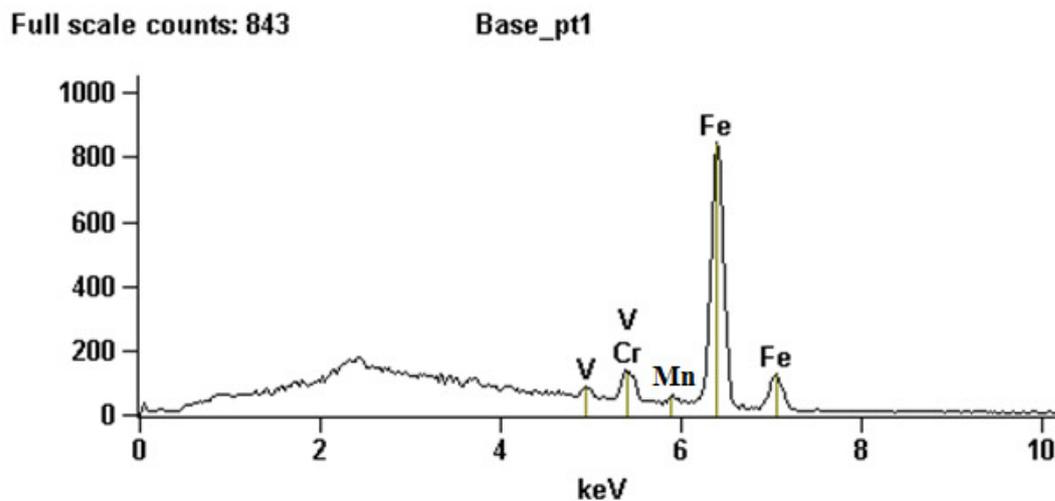


Figura 5.5.4.2 Espectro EDS da amostra 3 (ponto 1), usinada com pó de manganês com concentração de 5 g/l e corrente i_e de 6 A.

Apesar da tabela da figura 5.5.4 não apresentar a porcentagem do elemento manganês referente aos pontos 1 e 2, no Espectro da figura 5.5.4.2 pode ser visto o pico referente ao elemento manganês, e possivelmente um erro durante a medição ocorreu não registrando a porcentagem do manganês nos pontos 1 e 2. Na figura 5.5.4 a presença do elemento cobre (Cu) é provavelmente proveniente do eletro-ferramenta, onde foi utilizado um eletrodo de cobre eletrolítico para a realização dos experimentos.

A figura 5.5.5 apresenta o EDS da amostra usinada com pó de manganês com concentração de 10 g/l e corrente i_e de 6 A. A porcentagem atômica de 0.00 % de manganês acusada no ponto 1, foi provavelmente devido a algum erro durante a medição, pois como pode ser visto nos espectros das figuras 5.5.5.2 e 5.5.5.3 o pico referente ao manganês (valor em torno de 6 keV) pode ser visualizado. A presença do manganês será comprovada através da na análise de DRX (Difração de raio-X) que será discutida nos tópicos a seguir.

	Massa Atômica (%)					
	<i>C-K</i>	<i>V-K</i>	<i>Cr-K</i>	<i>Mn-K</i>	<i>Fe-K</i>	<i>Mo-L</i>
<i>Ponto 1</i>		2.01	7.43	0.00	86.42	1.38
<i>Ponto 2</i>	11.78	4.04	4.98	1.51	73.84	1.65

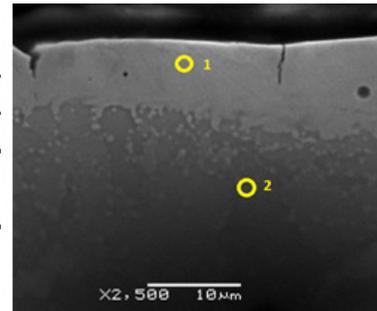


Figura 5.5.5 – EDS da amostra 4, usinada com pó de manganês com concentração de 10 g/l e corrente i_e de 6 A.

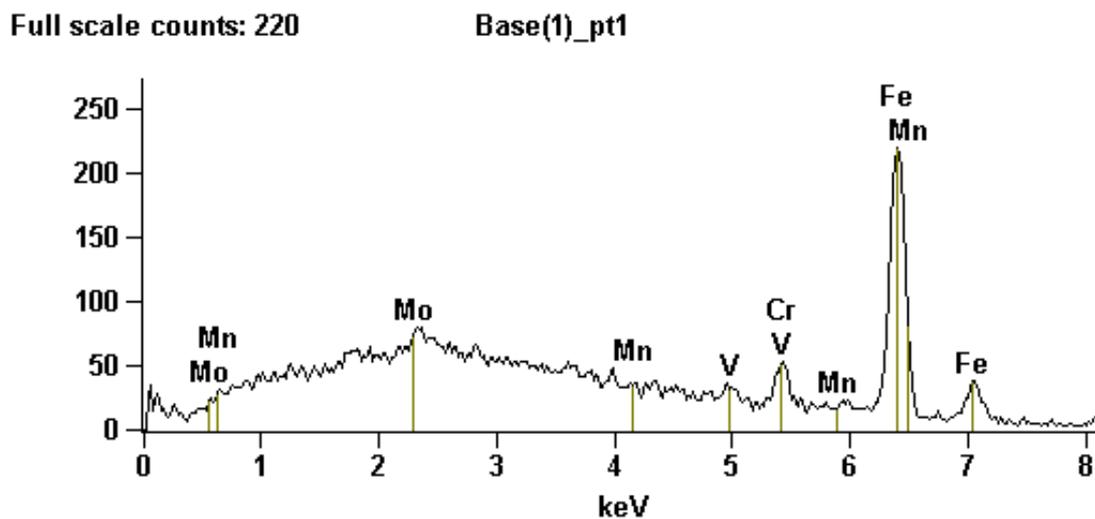


Figura 5.5.5.2 Espectro EDS da amostra 4 (ponto 1), usinada com pó de manganês com concentração de 10 g/l e corrente i_e de 6 A.

Full scale counts: 167

Base(1)_pt2

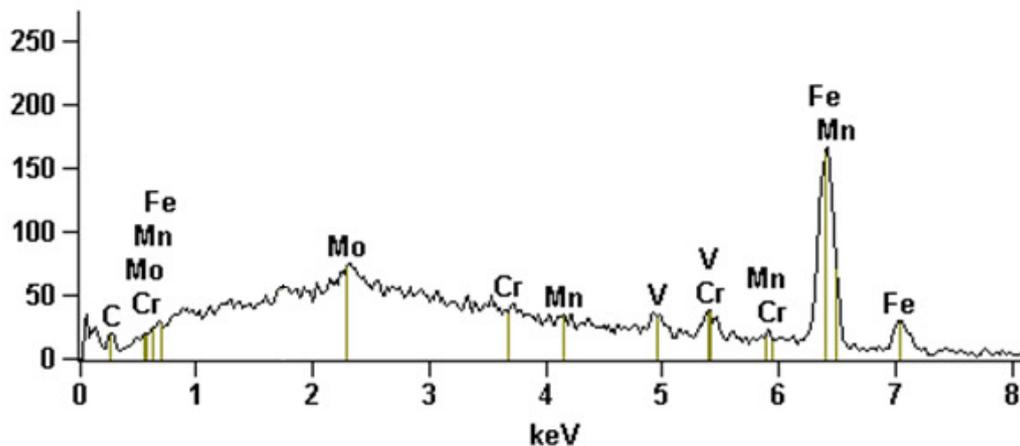


Figura 5.5.5.3 Espectro EDS da amostra 4 (ponto 2), usinada com pó de manganês com concentração de 10 g/l e corrente i_e de 6 A.

5.6 Resultado das análises de DRX (Difração de raios X)

Com base nos resultados descritos nos tópicos anteriores, foram definidas para a análise de DRX as amostras que apresentaram os melhores resultados em termos da uniformidade da camada resolidificada.

Quanto ao pó de silício a amostra 1 da tabela 5.4.2 (concentração de Si de 5 g/l e corrente i_e de 2 A) apresentou o melhor resultado em termos de rugosidade, microdureza, formação da camada resolidificada e agregação de silício segundo a análise de EDS. Para efeitos de comparativo a amostra 2 (concentração de Si de 15 g/l e corrente i_e de 2 A) também foi avaliada. Quanto ao pó de manganês a amostra escolhida foi a amostra 3 da tabela 5.4.2 (concentração de Mn de 5 g/l e corrente i_e de 6 A) por apresentar uma melhor uniformidade na formação da camada resolidificada. As duas condições de usinagem com o pó de manganês conforme tabela 5.4.2 apresentaram difratogramas similares.

- Difratogramas das amostras usinadas com pó de silício

Na figura 5.6.1 pode ser visto o difratograma da amostra usinada com pó de silício com um concentração de 5 g/l e corrente i_e de 2 A.

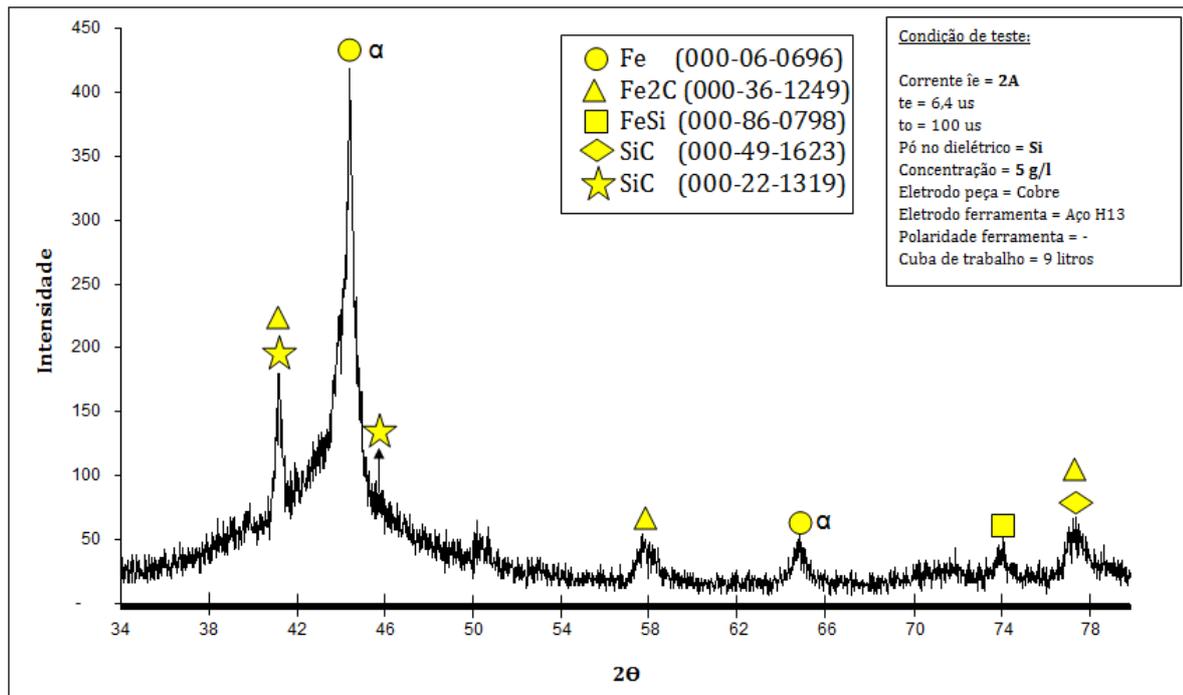


Figura 5.6.1 – Difratoograma da amostra 1, usinada com pó de silício com concentração de 5 g/l e corrente i_e de 2 A.

Através da difração de Raio-X foi identificado a formação de duas fases distintas que apresentaram o silício em sua composição, sendo as fases SiC e FeSi. Possivelmente o carbono proveniente da desintegração do hidrocarboneto (dielétrico) interagiu com o pó de silício presente no dielétrico originando a fase SiC. Uma fase intermetálica FeSi também pode ser observada no difratograma da figura 5.6.1. Além da formação de carbetos de silício houve a formação de carbetos de ferro (Fe₂C).

Na figura 5.6.2 pode ser visto o difratograma da amostra usinada com pó de silício com uma concentração de 15 g/l e corrente i_e de 2 A.

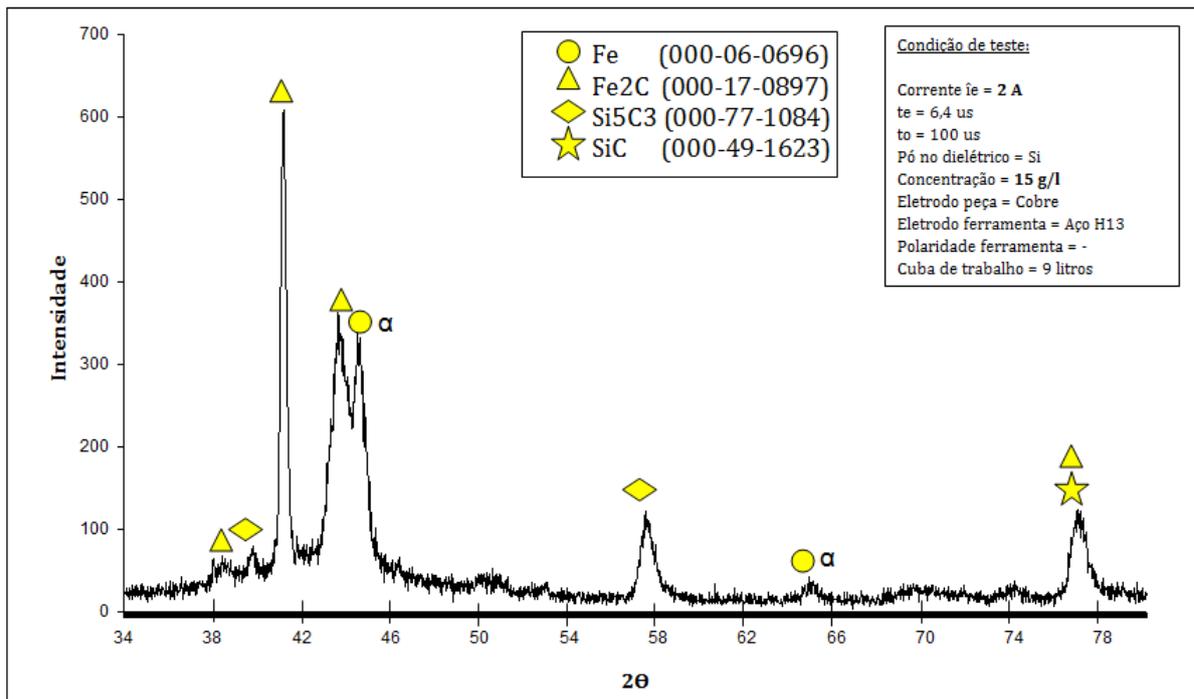


Figura 5.6.2 – Difratoograma da amostra 2, usinada com pó de silício com concentração de 15 g/l e corrente i_e de 2 A.

Assim como no difratograma anterior (figura 5.6.1) a amostra usinada com pó de silício com uma concentração de 15 g/l também apresentou a formação de carbeto de silício e carbeto de ferro, representada pelas fases Si_5C_3 , SiC e Fe_2C respectivamente. Esta amostra apresentou um pico mais intenso de carbeto de ferro (Fe_2C) na posição 2θ (41,28°).

Ambas as amostras usinadas com silício apresentaram a formação de carbeto de silício, onde possivelmente o silício em suspensão no dielétrico foi agregado na camada branca durante a resolidificação da mesma. Poder ser visto que o difratograma apresentou picos mais largos, provavelmente estes picos de maior largura indicam uma grande distorção da estrutura cristalina nesta camada. Foi identificada também a presença de mais de uma fase em determinados picos, conforme indicado nas figuras 5.6.1 e 5.6.2.

É suposto que, devido à alta temperatura durante a descarga elétrica do processo de EDM as partículas em suspensão no dielétrico fundem-se parcialmente na superfície da peça, ficando aderidas. Quando a próxima descarga ocorre, as partículas e a camada resolidificada são refundidas e misturadas, podendo gerar novas fases. [STEVENS, 1998].

O carbeto de silício apresenta uma dureza em torno de 2.800 HV, mas na análise de microdureza das amostras de silício uma dureza máxima de 718 HV foi identificada na camada resolidificada. Esta grande diferença da dureza pode indicar que o carbeto de silício pode estar presente em uma pequena quantidade na matriz da camada resolidificada.

- Difratomogramas das amostras usinadas com pó de manganês

Na figura 5.6.3 pode ser visto o difratograma da amostra usinada com pó de manganês com um concentração de 5 g/l e corrente i_e de 6 A.

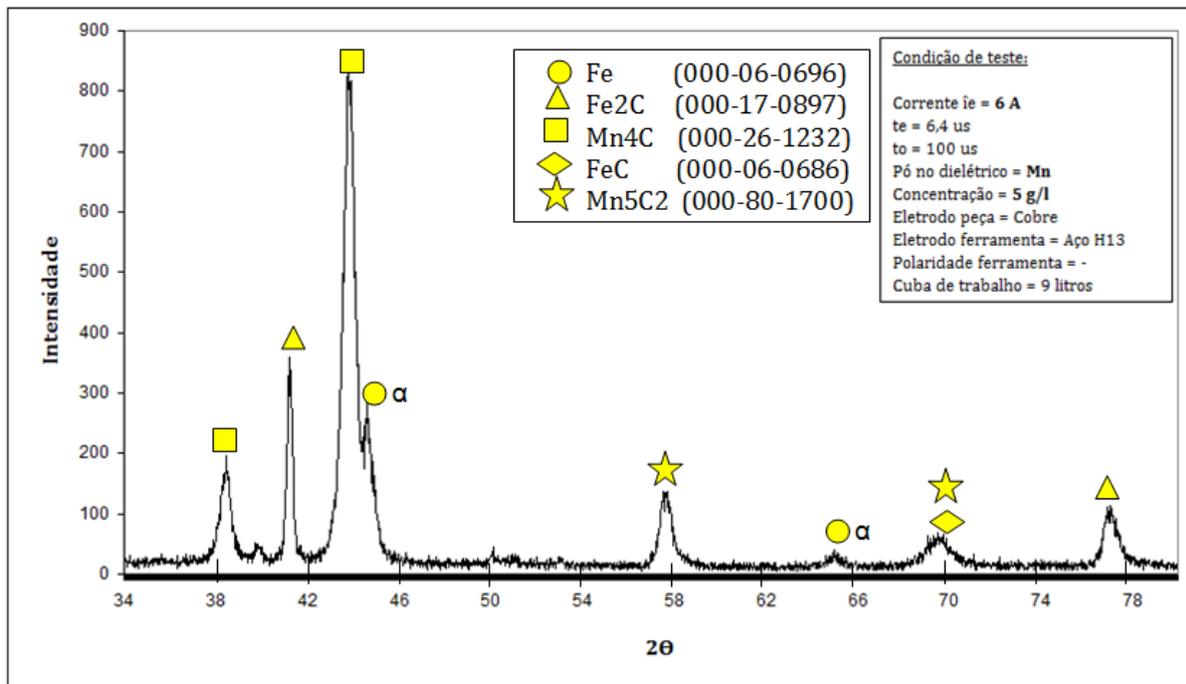


Figura 5.6.3 – Difrátograma da amostra 3, usinada com pó de manganês com concentração de 5 g/l e corrente i_e de 6 A.

Assim como nas amostras usinadas com pó de silício, o pó de manganês presente no fluido dielétrico também proporcionou a formação de carbeto de manganês na camada resolidificada, representada pelas fases Mn_4C e Mn_5C_2 do difratograma. O pico mais intenso do difratograma da figura 5.6.3 foi à posição 2θ ($43,80^\circ$) referente à fase Mn_4C . Foi identificado também a formação de carbeto de ferro, representado pelas fases Fe_2C e FeC .

A microdureza encontrada na camada resolidificada para esta amostra apresentou um valor máximo de 700 HV, possivelmente uma dureza inferior comparado ao carbeto de manganês. Assim como concluído para as amostras usinadas com pó de silício, o carbeto de manganês pode estar presente na matriz da camada resolidificada em pequenas quantidades.

CAPÍTULO VI

CONCLUSÕES

Após a realização dos testes definidos neste trabalho foi possível a obtenção de algumas conclusões importantes sobre a utilização de pós de silício e manganês no processo de eletroerosão do aço H13.

Conforme descrito abaixo, os pós utilizados nos experimentos apresentaram resultados diferentes quando comparado ao processo convencional de EDM.

- Ambos os pós, silício e manganês, apresentaram melhores resultados em termos da uniformidade da camada resolidificada comparado com o processo convencional de EDM (sem pó em suspensão no dielétrico).
- Para todos os ensaios onde foram utilizados pós em suspensão, menores valores de rugosidade Ra foram encontrados quando comparado com o processo de EDM sem a utilização de pós em suspensão.
- Referente ao aspecto da qualidade superficial em termos da rugosidade Ra, as amostras usinadas com o pó de silício ($i_e = 2 \text{ A}$ e 5 g/l) um valor de Ra de até cinco vezes menor comparado com processo convencional de EDM.
- O pó de manganês também proporcionou uma superfície com uma menor rugosidade, apresentando valores até duas vezes menores quando comparado com o processo convencional de EDM.
- Quando utilizado pós em suspensão no dielétrico, menores concentrações e baixas correntes de descarga proporcionam melhores resultados em termos de rugosidade.
- Com a utilização de pós de silício e manganês foi possível obter camadas resolidificadas com valores de dureza HV de até 40 % maior que o material base.

- A respeito da microdureza da camada resolidificada com a utilização de pó de silício no dielétrico, algumas conclusões podem ser estabelecidas:
 - a-) Quando utilizado uma baixa concentração de pó de Si, uma baixa corrente de descarga deve ser utilizada para atingir maiores valores de microdureza.
 - b-) Quando utilizado uma alta concentração de pó de Si, uma alta corrente de descarga deve ser utilizada para atingir maiores valores de microdureza.
- Os resultados de microdureza com a utilização de pó de manganês apresentaram valores similares às condições do pó de silício.
- Com a utilização de pó de silício com uma baixa concentração e baixa corrente de descarga (5 g/l e 2 A) uma camada uniforme e sem a presença de poros e microtrincas foi gerada. Também é possível concluir que uma maior concentração de pó e uma maior corrente de descarga afeta a camada resolidificada, fazendo com que a mesma apresente poros e microtrincas e uma formação não uniforme.
- Com a utilização do pó de manganês, o melhor resultado encontrado foi com a concentração de 5 g/l e corrente de 6 A, mas assim mesmo foi constatado a presença de microtrincas e poros. Para este caso a maior energia de descarga influenciou positivamente no processo, em termos de uniformidade da espessura da camada resolidificada.
- Com a utilização do pó de silício em suspensão no dielétrico a análise de EDS indicou uma maior presença de silício na camada resolidificada quando comparado ao processo convencional. Referente ao pó de manganês em suspensão no dielétrico, a análise de EDS indicou a presença de manganês na camada resolidificada nos espectros apresentados.
- Com a análise de DRX (Difração de Raio-X) foi identificada uma possível formação de carbeto de silício e manganês na camada resolidificada, onde possivelmente o pó suspenso no fluido dielétrico interagiu com o carbono proveniente da desintegração do hidrocarboneto (dielétrico) dando origem a estas fases. Possivelmente os carbetos formados devido à utilização de pós de Si e Mn estão presentes na matriz da camada resolidificada em pequenas quantidades.

CAPÍTULO VII

SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- Realizar novos testes para verificar a adesão da camada resolidificada, principalmente para a amostra usinada com a utilização de pó de silício com concentração de 5 g/l e corrente i_e de 2 A que apresentou uma camada totalmente uniforme;
- Como os melhores resultados deste trabalho foram obtido com baixas concentrações de pó de silício no dielétrico, seria interessante realizar novos testes com pó de silício com concentrações inferiores a 5 g/l e corrente de descarga i_e com valores abaixo de 2 A, com o intuito de avaliar a camada resolidificada;
- Avaliar a dureza da camada resolidificada pela superfície usinada (vista de topo) a fim de identificar a real dureza da camada resolidificada. Esta análise irá depender do efeito da rugosidade da superfície usinada;
- Realizar ensaios tribológicos sobre as amostras usinadas com pó de silício e manganês;
- Realizar ensaios com eletrodo-ferramenta de diâmetro inferior a 20 mm, para avaliar a influência da área de contato do eletrodo na formação da camada resolidificada.

CAPÍTULO VIII

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABU ZEID, O.A. **On the effect of electro-discharge machining parameters on the fatigue life of AISI D6 tool steel**, J. Mater. Process. Technol.68 (1) (1997) 27-32.

AMERICAN SOCIETY FOR METALS (ASM) **Metals Handbook 1993**, v.9 USA.

AMORIM, F. **Tecnologia de eletroerosão por Faíscas de Penetração para a Liga de Alumínio AMP 8000 e liga de Cobre (Cu Be) para ferramentas de Moldagem de Materiais Plásticos**. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica), 2002,164f. Universidade Federal de Santa Catarina, UFSC, Santa Catarina.

BOMMELI B., **Etude de l'influence de la contamination sur l' amorçage des décharges dans les diélectriques liquides, doctoral thesis**, Ecole de physique, Genève, Switzerland, 1978.

CHARMILLES TECHNOLOGIES, **"Manual de formação da máquina Roboform 30"**. [s.n], 1995. 320 p.

CROOKALL, J.R., HEUVELMAN, C.J., 1971. **Electro-discharge machining—the state of the art**. Annals of the CIRP 20 (1), 113–120.

DIBITONTO, D. D. et al.. Theoretical models of the electrical discharge machining process I: a simple cathode erosion mode. **Journal of Applied Physics**, USA, v. 66, n. 9, p. 4095-4103, nov. 1989.

ERDEN, A.; BILGIN, S. **Role of impurities in electric discharge machining, in: Proceedings of 21st International Machine Tool Design and Research Conference**, Macmillan, London, 1980, pp. 345–350.

EUBANK, P. T. et al. Theoretical models of the electrical discharge machining process III: the variable mass, cylindrical plasma mode. **Journal of Applied Physics**, USA, v. 73, n. 11, p. 7900-7909, jun. 1993.

FURUTANI, K., SANETO, A., TAKEZAWA, H., MOHRI, N., MIYAKE, H. **Accretion of titanium carbide by electrical discharge machining with powder suspended in working fluid** (2000).

GUSTAVO E. F. FERREIRA **Avaliação da resistência à fadiga térmica do aço AISI H13 nitretado pelos processos gasoso e por plasma**. 2001. 80f. Dissertação (Mestrado em Ciências e Engenharia de Materiais) Universidade Federal de Santa Catarina, Santa Catarina.

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

LUO, Y.F. **The dependence of interspace discharge transitivity upon the gap debris in precision electro-discharge machining**, *J. Mater. Process. Technol.*68 (1997) 127–131.

KANSAL, H.K., SINGH, S., KUMAR, P., 2006. **Technology and research developments in powder mixed electric discharge machining** (PMEDM).

KÖNIG, W.; KLOCKE, F. **Fertigungsverfahren** - 3: abtragen und generieren. Berlin: Springer, 1997. 3 v.

KÖNIG, W.; KLOCKE, F.; LENZEN, R. The electrical machining processes - what demands will they face in the future. **International Journal of Electrical Machining**, Japan, v.1, n.1, p. 3-7, 1996

KLOCKE, F; KARDEN, A. Materials Characteristics after cavity sinking by EDM. **Production Engineering**, Germany, v. 6, n. 2, p. 35-38, 1999.

KUN LING WU, BIING HWA YAN, FUANG YUAN HUANG, SHIM CHANG CHEN, 2005. **Improvement of surface finish on SKD steel using electro-discharge machining with aluminium and surfactant added dielectric**.

LHIUBET, C.; MEYER, R. M. Method of indirect determination of the anodic and cathodic voltage drops in short high-current electric discharges in a dielectric liquid. **Journal of Applied Physics**, USA, v. 52, n. 6, p.3929-3934, 1981.

MASUI , K., DEMIZI, K., SATO, Y., SONE, T. **Surface Modification of Tool Steels by Alloying Method Using EDM Process** (1990).

MING, Q. Y., HE, L. Y. **Powder-suspension dielectric fluid for EDM** (1995).

MOHRI, N.; TSUKAMOTO, J.; FUJINO, M., **Mirror-like finishing by EDM**, in: Proceedings of the 25th International Symposium on Machine Tool Design and Research, UK, 1985, pp. 329–336.

MOHRI, N.; TSUKAMOTO, J.; FUJINO, M. Surface modification by EDM—an innovation in EDM with semi-conductive electrodes, in: **Proceedings** of Winter Annual Meet ASME, vol. 34, 1988, pp. 21–30.

MOHRI, N.; et al., **A new process of additive and removal machining by EDM with a thin electrode**, Annals CIRP 40 (1) (2000) 123–126.

MOHRI, N.; SAITO, M.; HIGASHI, M.A. **A new process of finish machining on free surface by EDM methods**, Annals CIRP 40 (1) (1991) 207–210.

NARUMIYA, H.; MOHRI, N.; SAITO, N.; OTAKE, H.; TSUNEKAWA, Y.; TAKAWASHI, T.; KOBAYASHI, K. EDM by powder suspended working fluid, in: **Proceedings** of 9th ISEM, 1989, pp. 5–8.

NARUMIYA, H., MOHRI, N., SAITO, N., OOTAKE, H., TSUNEKAWA, Y., TAKAWASHI, T., KOBAYASHI, K., 1989. EDM by powder suspended working fluid. In: **Proceedings** of the ISEM-9, Nagoya, Japan, 5–8.

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

PECAS, P.; HENRIQUES, E.A. **Influence of silicon powder mixed dielectric on conventional electrical discharge machining**, Int. J. Mach. Tools Manuf. 43 (2003) 1465–1471.

PEÇAS, P., Henrique, H., Raposo, L., 2001. **Electrical discharge machining with additive: a way of mould steels non-manual polishing**, In: Lonardo, P.M. (Ed.), Proceedings of the First International Seminar in Innovative Manufacturing Engineering – PRIME 2001. CIRP, Genève, pp. 267-271.

SAITO, N. **The Future of Electrical Discharge Machining and the Revolution of Production Machining Technology**. Professor Emeritus – Toyota Technological Institute (1991).

SANJEEV KUMAR, RUPINDER SINGH, TP. SINGH, BL. SETHI (2008). **Surface modification by electrical machining: A review**.

SCHUMACHER, B.M., 1983. EDM technology for precision workpieces with excellent surface quality. **Proceedings** of the ISEM-7, 124–135.

SIMAO, J., LEE, H.G., ASPINWALL, D.K., DEWES, R.C., ASPINWALL, E.M., 2003. Workpiece surface modification using electrical discharge machining. **International Journal of Machine Tools & Manufacture** 43, 121-128.

SINGH, S., KANSAL, H.K., KUMAR, P., 2005. Parametric optimization of powder mixed electrical discharge machining by response surface methodology. **Journal of Materials Processing Technology** 169 (3), 427-436.

STEVENS, L. **Improvement of surface quality in die-sinking EDM**. 1998. 1 v. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) - Department of Mechanical Engineering, K.U. Leuven, Belgium.

TZENG, Y., CHEN, F., 2005. Investigation into some surface characteristics of electrical discharge machined SKD-11 using powder-suspension dielectric oil. **Journal of Materials Processing Technology** 170, 385-391

VAN DIJCK, F. et al. **Some results of physical research in EDM**. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM FOR ELECTROMACHINING, 4, 1974, Bratislava. Proceedings...Bratislava: [s.n.], [1973]. 1 v. p.68-85.

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

WONG, Y.S.; LIM, L.C.; RAHUMAN, I.; TEE, W.M. **Near-mirror-finish phenomenon in EDM using powder-mixed dielectric**, Int. J. Adv. Manuf. Technol. 79 (1998) 30-40.

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

UNO, Y.; OKADA, A. **Surface generation mechanism in electrical discharge machining with silicon powder mixed fluid**, Int. J. Elec. Mach. 2 (1997) 13-18.

UNO, Y.; OKADA, A.; HAYASHI, Y.; TABUCHI, Y. **Surface integrity in EDM of aluminum bronze with nickel powder mixed fluid**, J. Jpn. Soc. Elec. Mach. Eng. 32 (70) (1998) 24-31 (in Japanese).

YOUNG, W. **"Why die casting die fail"** Transactions of the tenth international die casting congress, Society and Die Cast Engineers; 1979.

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

APÊNDICE 1
MÁQUINA UTILIZADA
(AMORIM, 2001)



Figura 1.1 - Máquina Roboform 30 CNC.

1.1 - Máquina de Eletroerosão por Penetração

- Fabricante: CHARMILLES TECHNOLOGIES
 - Modelo: ROBOFORM 30 CNC (Fig. 1.1)
 - Movimentos
- Cursos: - X - 350 mm
- Y - 250 mm
- Z - 300 mm
- C - 360°
- Dimensões máximas da peça: 350 X 840 X 560 mm
 - Dimensões da mesa: 500 X 400 mm
 - Resolução de medida: 0,5 µm
 - Incremento de posicionamento: 1µm
 - Velocidade máxima (modo manual): 900 mm/min
 - Velocidade máxima de rotação do eixo C: 100 rpm
 - Cuba de trabalho:

- dimensões: 370 X 940 X 590 mm
- capacidade: 200 l
- nível mínimo/máximo: 100/350 mm
 - Reservatório de dielétrico:
 - dimensões: 330 X 920 X 1460 mm
- capacidade mínima/máxima: 325/350 l
- sistema de filtragem: 3 filtros de papel
- Lavagem:
 - injeção: pela peça, lateral e pelo eletrodo.
 - sucção: pela peça

1.2 - Parâmetros do Gerador

- Modo de atuação: pulso estático e relaxação.
- Polaridade do eletrodo-ferramenta: positiva e negativa.
- Abaixo estão alguns parâmetros de controle do gerador:

Corrente de descarga i_e [A]	0,5	1	2	3	4	6	8	12	16	24	32
-----------------------------------	-----	---	---	---	---	---	---	----	----	----	----

Duração de t_e [μ s]	0,2	0,8	1,6	3,2	6,4	12,8	25	50	100	200	400	800	1600	3200
-----------------------------	-----	-----	-----	-----	-----	------	----	----	-----	-----	-----	-----	------	------

Duração de t_o [μ s]	0,2	0,8	1,6	3,2	6,4	12,8	25	50	100	200	400	800	1600	3200
-----------------------------	-----	-----	-----	-----	-----	------	----	----	-----	-----	-----	-----	------	------

Tensão em aberto (U_i) [V]	80	120	160	200
--------------------------------	----	-----	-----	-----

Movimento de pulsação R e U [s]	0,1	0,2	0,4	0,8	1,6	3,2	6,4	12,8
------------------------------------	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	------

APÊNDICE 2

ANÁLISE MICROGRÁFICA AÇO H13

1. Objetivos

Determinar a espessura da camada termicamente afetada dos materiais, assim como obter fotografias da região transversal das amostras para a observação da existência de possíveis microfissuras e poros.

2. Preparação das amostras

Foram seguidas cinco etapas para a preparação das amostras do aço H13, como apresentadas a seguir:

- CORTE

As amostras foram cortadas com o auxílio de uma máquina de eletroerosão a fio CHARMILLES ROBOFIL 290, conforme figura ap 4.1.

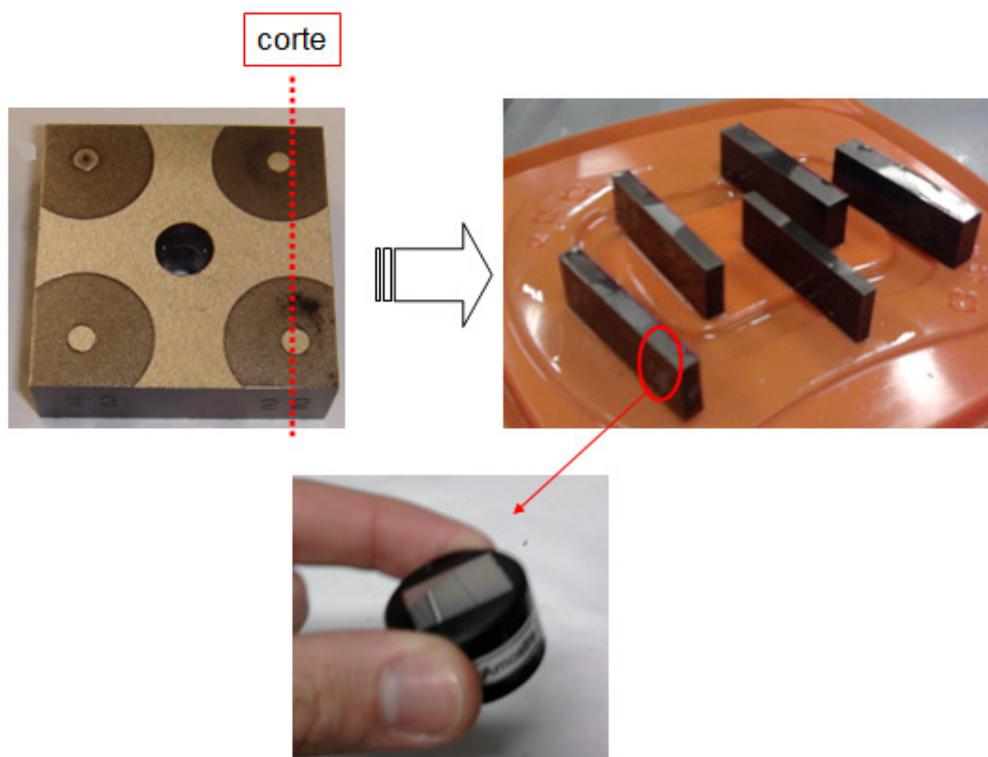


Figura ap 4.1 - Representação esquemática da peça eletroerodida e detalhe transversal da amostra para análise micrográfica.

- EMBUTIMENTO

Os exemplares das partes foram embutidas para facilitar o manuseio nas etapas posteriores. O embutimento ocorre da seguinte forma: junta-se com vaselina o êmbolo da prensa para melhor acomodar a amostra. Em seguida a mesma é posicionada centralizada no êmbolo de forma a expor adequadamente a parte que será analisada, sendo em seguida pressionada para devida acomodação.

- LIXAMENTO:

Após o embutimento, os corpos de prova passam pelo processo de lixamento que consiste em retirar o material encruado pelo corte. Foi utilizada uma lixadeira metalográfica dupla STRUERS LABOPOL-21 com lixas de granulometria de 220, 320, 400 e 600. Quanto maior a granulometria, mais fina a retirada de material.

- POLIMENTO

Foram utilizados os seguintes equipamentos e materiais: politriz metalográfica marca STRUERS e modelo LABOPOL-5 com bandeja de 200 mm de diâmetro, e álcool etílico como lubrificante. O processo deve ser feito da seguinte maneira: com o suporte da bandeja da politriz sob média rotação, translada-se a amostra em sentido contrário a movimentação do suporte, exercendo razoável pressão contra a bandeja.

- ATAQUE QUÍMICO:

O ataque químico na liga de titânio foi feito com uma solução denominada Nital. O tempo de exposição ideal foi de aproximadamente 30 segundos. Para o encerramento do ataque foi utilizado álcool etílico embebido em algodão, a fim de limpar totalmente a superfície da amostra, que, em seguida, foi devidamente secada com jato de ar.