



UNIVERSIDADE FEDERAL DE GOIÁS



ESCOLA DE ENGENHARIA ELÉTRICA, MECÂNICA E DE COMPUTAÇÃO

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA – PPGMEC

João Bosco da Cunha

**Efeito dos Parâmetros de Usinagem na Usinabilidade
dos aços Inoxidáveis 410D e 420A Ferrítico e Martensí-
tico no Processo de Eletroerosão por Penetração**

Goiânia
2023



UNIVERSIDADE FEDERAL DE GOIÁS
ESCOLA DE ENGENHARIA ELÉTRICA, MECÂNICA E DE COMPUTAÇÃO

TERMO DE CIÊNCIA E DE AUTORIZAÇÃO (TECA) PARA DISPONIBILIZAR VERSÕES ELETRÔNICAS DE TESES

E DISSERTAÇÕES NA BIBLIOTECA DIGITAL DA UFG

Na qualidade de titular dos direitos de autor, autorizo a Universidade Federal de Goiás (UFG) a disponibilizar, gratuitamente, por meio da Biblioteca Digital de Teses e Dissertações (BDTD/UFG), regulamentada pela Resolução CEPEC nº 832/2007, sem ressarcimento dos direitos autorais, de acordo com a [Lei 9.610/98](#), o documento conforme permissões assinaladas abaixo, para fins de leitura, impressão e/ou download, a título de divulgação da produção científica brasileira, a partir desta data.

O conteúdo das Teses e Dissertações disponibilizado na BDTD/UFG é de responsabilidade exclusiva do autor. Ao encaminhar o produto final, o autor(a) e o(a) orientador(a) firmam o compromisso de que o trabalho não contém nenhuma violação de quaisquer direitos autorais ou outro direito de terceiros.

1. Identificação do material bibliográfico

☒ Dissertação ☐ Tese ☐ Outro*: _____

*No caso de mestrado/doutorado profissional, indique o formato do Trabalho de Conclusão de Curso, permitido no documento de área, correspondente ao programa de pós-graduação, orientado pela legislação vigente da CAPES.

Exemplos: Estudo de caso ou Revisão sistemática ou outros formatos.

2. Nome completo do autor

João Bosco da Cunha

3. Título do trabalho

Efeito dos Parâmetros de Usinagem na Usinabilidade dos aços Inoxidáveis 410D e 420A Ferrítico e Martensítico no Processo de Eletroerosão por Penetração

4. Informações de acesso ao documento (este campo deve ser preenchido pelo orientador)

Concorda com a liberação total do documento ☒ SIM ☐ NÃO¹

[1] Neste caso o documento será embargado por até um ano a partir da data de defesa. Após esse período, a possível disponibilização ocorrerá apenas mediante:

a) consulta ao(a) autor(a) e ao(a) orientador(a);

b) novo Termo de Ciência e de Autorização (TECA) assinado e inserido no arquivo da tese ou dissertação.

O documento não será disponibilizado durante o período de embargo.

Casos de embargo:

- Solicitação de registro de patente;
- Submissão de artigo em revista científica;
- Publicação como capítulo de livro;
- Publicação da dissertação/tese em livro.

Obs. Este termo deverá ser assinado no SEI pelo orientador e pelo autor.



Documento assinado eletronicamente por **Daniel Fernandes Da Cunha, Coordenador**, em 10/03/2023, às 08:49, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **João Bosco Da Cunha, Técnico de Laboratório**, em 10/03/2023, às 08:54, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site

[https://sei.ufg.br/sei/controlador_externo.php?](https://sei.ufg.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0)

[acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0](https://sei.ufg.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0), informando o código verificador **3586166** e o código CRC **ECB89602**.

João Bosco da Cunha

**Efeito dos Parâmetros de Usinagem na Usinabilidade dos aços
Inoxidáveis 410D e 420A Ferrítico e Martensítico no Processo de
Eletroerosão por Penetração**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação *Stricto Sensu* em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Goiás, como requisito parcial para obtenção do Título de Mestre em Engenharia Mecânica. Área de Concentração: Ciências Mecânicas.

Orientador: Prof. Dr. Daniel Fernandes da Cunha.
Coorientador: Prof. Dr. Rhander Viana.

Universidade Federal de Goiás

Escola de Engenharia Elétrica, Mecânica e de Computação

Goiânia
2023

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor, através do
Programa de Geração Automática do Sistema de Bibliotecas da UFG.

Cunha, João Bosco da

Efeito dos Parâmetros de Usinagem na Usinabilidade dos aços Inoxidáveis 410D e 420A Ferrítico e Martensítico no Processo de Eletroerosão por Penetração [manuscrito] / João Bosco da Cunha. - 2023. 78 f.

Orientador: Prof. Daniel Fernandes da Cunha; co-orientador Rhander Viana.

Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Goiás, Escola de Engenharia Elétrica, Mecânica e de Computação (EMC), Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica, Goiânia, 2023.

1. Eletroerosão. 2. Aço inoxidável. 3. Taxa remoção material. 4. Desgaste eletrodo. I. Cunha, Daniel Fernandes da, orient. II. Título.

CDU 621



UNIVERSIDADE FEDERAL DE GOIÁS

ESCOLA DE ENGENHARIA ELÉTRICA, MECÂNICA E DE COMPUTAÇÃO

ATA DE DEFESA DE DISSERTAÇÃO

Ata nº 05 da sessão de Defesa de Dissertação de **João Bosco da Cunha**, que confere o título de Mestre(a) em **Engenharia Mecânica**, na área de concentração em **Ciências Mecânicas**.

Ao/s vigésimo sétimo dia do mês de fevereiro do ano de dois mil e vinte e três, a partir da(s) 14h00min., em sala virtual da plataforma Google Meet, realizou-se a sessão pública de Defesa de Dissertação intitulada “Efeito dos Parâmetros de Usinagem na Usinabilidade dos aços Inoxidáveis 410D e 420A Ferrítico e Martensítico no Processo de Eletroerosão por Penetração”. Os trabalhos foram instalados pelo(a) Orientador(a), Professor(a) Doutor(a) **Daniel Fernandes da Cunha (UFG)**, com a participação dos demais membros da Banca Examinadora: Professor(a) Doutor(a) **Deborah Oliveira (UnB)**, membro titular externo, cuja participação ocorreu através de videoconferência, Professor(a) Doutor(a) **Rhander Viana (UnB)**, membro titular externo, cuja participação ocorreu através de videoconferência e Professor(a) Doutor(a) **André Contin (UFG)**, membro titular interno, cuja participação ocorreu através de videoconferência. Durante a arguição os membros da banca não fizeram sugestão de alteração do título do trabalho. A Banca Examinadora reuniu-se em sessão secreta a fim de concluir o julgamento da Dissertação, tendo sido(a) o(a) candidato(a) **aprovado** pelos seus membros. Proclamados os resultados pelo(a) Professor(a) Doutor(a) **Daniel Fernandes da Cunha**, Presidente da Banca Examinadora, foram encerrados os trabalhos e, para constar, lavrou-se a presente ata que é assinada pelos Membros da Banca Examinadora, ao(s) vigésimo sétimo dia do mês de fevereiro do ano de dois mil e vinte e três.

TÍTULO SUGERIDO PELA BANCA



Documento assinado eletronicamente por **Daniel Fernandes Da Cunha, Coordenador**, em 27/02/2023, às 16:40, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Rhander Viana, Usuário Externo**, em 27/02/2023, às 17:50, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Déborah de Oliveira, Usuário Externo**, em 01/03/2023, às 13:00, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **André Contin, Professor do Magistério Superior**, em 02/03/2023, às 15:07, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site https://sei.ufg.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador 3528035 e o código CRC C493A65E.

Referência: Processo nº 23070.005716/2023-70

SEI nº 3528035

*Este trabalho é dedicado à minha esposa Luzivan,
aos meus filhos Gustavo Henrique, Isabella e Gio-
vanna que sempre me apoiaram neste trabalho.*

*Aos meus pais Manoel Pedro (in memorian) Terezi-
nha Rosa (in memorian).*

AGRADECIMENTOS

Primeiramente agradeço a Deus pelo dom da vida e a minha família pelo incentivo, amizade e pelo amor incondicional.

Ao Professor Dr. Daniel Fernandes da Cunha não somente pela orientação, mas pela confiança, paciência, ajuda e principalmente pela oportunidade de realizar este trabalho e por todo o crescimento e aprendizado que obtive no decorrer desta pesquisa.

Ao Professor Dr. Rhander Viana pela coorientação e pelas dúvidas esclarecidas.

Aos professores e técnicos da engenharia mecânica da UFG e aos amigos no incentivo, motivação e orientação nesta caminhada acadêmica.

A Scala Suprimento Industriais pela parceria e apoio durante este trabalho.

*Procure descobrir o seu caminho na vida.
Ninguém é responsável por nosso destino, a não ser nós mesmos.*

Chico Xavier.

RESUMO

A eletroerosão é um processo de usinagem não convencional que tem servido de alternativa para usinagem de materiais de difícil usinabilidade e geometrias complexas, através da remoção de material por meio de aplicação de descargas elétricas. No processo de usinagem por descargas elétricas (EDM) é necessário conhecer os parâmetros que afetam a remoção de material, o desgaste do eletrodo e o acabamento superficial da peça. Conhecer estes parâmetros proporciona uma maior produtividade e redução no custo do processo de usinagem. Neste contexto, este trabalho procura estabelecer, através de um método de planejamento de experimentos (DOE), uma análise do comportamento do processo com a variação da corrente, tempo de descarga elétrica e a abertura da fenda de trabalho durante a usinagem dos aços inoxidáveis AISI 410D e 420A, fornecidos no estado recozido. Após o tratamento térmico e a usinagem EDM alterando parâmetros de entrada, nas análises foi verificada estatisticamente que a corrente afetou a taxa de remoção de material (TRM), a taxa de desgaste do eletrodo (DE) e a rugosidade superficial. Estes dados comprovando a indicação da literatura na utilização de altas correntes para usinagens de desbaste, sacrificando o eletrodo para uma maior remoção de material, e menores correntes para usinagens de processos de acabamento, garantindo a geometria final e uma melhor qualidade superficial da cavidade usinada. O tratamento térmico, nesta pesquisa, não influenciou a taxa de remoção de material, desgaste do eletrodo e a rugosidade superficial.

Palavras-chaves: Eletroerosão; Aço inoxidável; Taxa de remoção de material; Taxa de desgaste do eletrodo.

ABSTRACT

Electrodischarge Machining is an unconventional machining process that has served as an alternative for machining difficult-to-machine materials and complex geometries by removing material through electrical discharges. In the electrical discharge machining (EDM) process, it is necessary to know the parameters that affect material removal, electrode wear and the surface finish of the workpiece. Knowing these parameters provides greater productivity and reduction of costs in machining process. In this context, this work seeks to establish, through a design of experiments (DOE), an analysis about the behavior of the process with different values of electrical current, electrical discharge time and the working GAP during machining AISI stainless steels 410D and 420A, supplied in annealed state. After tempering process, it changes its ferritic to martensitic microstructure. It was statistically verified that electrical current affected material removal rate (MRR), electrode wear rate (EW) and surface roughness. These data confirms literature review about using higher currents for rough machining, sacrificing the electrode tool for increasing material removal process, and smaller electrical currents for finishing machining parameters, guaranteeing the final geometry and better surface quality of the machined cavity. Heat treatment is shown by this research to have no significant influence on material removal rate, electrode wear and surface roughness.

Keywords: Electrical discharge machining; Stainless steel; Material removal rate; Electrode wear rate.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1: Remoção de material em um pulso na usinagem EDM.	20
Figura 2.2: Circuito de Lazarenko.	21
Figura 2.3: Máquina de Eletroerosão por Penetração.	22
Figura 2.4: Fases de uma descarga elétrica durante o processo de EDM.	23
Figura 2.5: Fase da Ignição.	23
Figura 2.6: Fase da Formação do canal de plasma.	24
Figura 2.7: Fase da Fundição e sublimação do material da peça e eletrodo.	25
Figura 2.8: Fase da limpeza dos resíduos produzidos no processo.	25
Figura 2.9: Representação tipos básicos de eletroerosão.	26
Figura 2.10: Evolução da tensão e corrente elétrica durante a descarga de uma faísca, tempos de duração dos mesmos e parâmetros elétricos.	28
Figura 2.11: Representação de uma tabela tecnológica fornecida pelo fabricante.	28
Figura 2.12: Rugosidade média aritmética (Ra).	30
Figura 2.13: Rugosidade total (Rt).	30
Figura 2.14: Efeito da temperatura de austenitização na dureza de aços inoxidáveis martensíticos forjados.	34
Figura 3.1: Fluxograma de trabalho.	35
Figura 3.2: Amostra dos aços inoxidáveis AISI 410D e 420A como fornecidos.	36
Figura 3.3: Forno de tratamento térmico JUNG.	37
Figura 3.4: Resfriamento forçado.	37
Figura 3.5: Retifica Plana Tangencial.	38
Figura 3.6: Balança de precisão.	40
Figura 3.7: EDM por penetração.	41
Figura 3.8: Suporte de fixação da amostra.	42
Figura 3.9: Eletrodo de cobre eletrolítico.	43

Figura 3.10: Rugosímetro digital modelo SJ-20, Mitutoyo.....	43
Figura 3.11: Direções de aquisição de rugosidade.	44
Figura 3.12: Microscópio ZEISS modelo Discovery V8.	44
Figura 3.13: Medição raio na superfície erodida.	45
Figura 3.14: Microscópio motorizado ZEISS AXIO Imager 2	45
Figura 3.15: Imagem MO do aço 410D como recebido	46
Figura 3.16: Imagem MO do aço 410D recebido transversal.....	47
Figura 3.17: Imagem MO do aço 410D temperado.....	48
Figura 3.18: Imagem MO do aço 410D temperado transversal.	48
Figura 3.19: Imagem MO do aço 420A como recebido.	49
Figura 3.20: Imagem MO do aço 420A recebido transversal.....	49
Figura 3.21: Imagem MO do aço 420A temperado.....	50
Figura 3.22: Imagem MO do aço 420A temperado transversal.	50
Figura 3.23: Durômetro Vickers HV-110.	51
Figura 4.1: Gráfico de Pareto dos Efeitos na TRM do AISI 410D.	53
Figura 4.2: Gráfico da Interação I_e *GAP para a TRM (mm^3/min) - AISI 410D.....	53
Figura 4.3: Gráfico de Pareto dos Efeitos na TRM do AISI 420A.	55
Figura 4.4: Gráfico da Interação I_e *GAP para a TRM (mm^3/min) - AISI 420A.....	55
Figura 4.5: Gráfico de Pareto dos Efeitos na TRM do AISI 410D x 420A.	56
Figura 4.6: Gráfico de Pareto dos Efeitos na DE do AISI 410D.....	58
Figura 4.7: Gráfico da Interação I_e *On para a DE (mm^3/min) - AISI 410D.	58
Figura 4.8: Gráfico da Interação I_e *GAP para a DE (mm^3/min) - AISI 410D.	59
Figura 4.9: Gráfico de Pareto dos Efeitos na DE do AISI 420A.....	59
Figura 4.10: Gráfico de efeitos principais da I_e para a DE (mm^3/min) - AISI 420A.....	61
Figura 4.11: Gráfico de Pareto dos Efeitos na DE do AISI 410D x 420A.....	61
Figura 4.12: Valores Overcut AISI 410D.....	62

Figura 4.13: Gráfico de Pareto dos Efeitos no overcut do AISI 410D.	63
Figura 4.14: Valores Overcut AISI 420A.	63
Figura 4.15: Gráfico de Pareto dos Efeitos no overcut do AISI 420A.	64
Figura 4.16: Gráfico de Pareto dos Efeitos na overcut do AISI 410D x 420A.....	64
Figura 4.17: Comparação do overcut do AISI 410D x 420A.	65
Figura 4.18: Amostra usinadas.....	66
Figura 4.19: Valores Ra AISI 410D.....	66
Figura 4.20: Gráfico de Pareto dos Efeitos na Ra do AISI 410D.	67
Figura 4.21: Gráfico da Interação Ie para a Ra (μm) - AISI 410D.....	67
Figura 4.22: Valores Ra AISI 420A.....	68
Figura 4.23: Gráfico de Pareto dos Efeitos na Ra do AISI 420A.	68
Figura 4.24: Gráfico da Interação Ie para a Ra (μm) - AISI 420D.....	69
Figura 4.25: Gráfico de Pareto dos Efeitos na Ra do AISI 410D x 420A.	69
Figura 4.26: Valores Rt AISI 410D.	70
Figura 4.27: Gráfico de Pareto dos Efeitos no parâmetro de rugosidade Rt do AISI 410D. ...	70
Figura 4.28: Gráfico da Interação Ie para a Rt (μm) - AISI 410D.....	71
Figura 4.29: Valores Rt AISI 420A.	71
Figura 4.30: Gráfico de Pareto dos Efeitos na Ra do AISI 420A.	72
Figura 4.31: Gráfico da Interação Ie para a Rt (μm) - AISI 420A.....	72
Figura 4.32: Gráfico de Pareto dos Efeitos para Rt do AISI 410D x 420A.....	73
Figura 4.33: Valores Dureza AISI 410D.	74
Figura 4.34: Valores Dureza AISI 410D Transversal.....	74
Figura 4.35: Valores Dureza AISI 420A.	75
Figura 4.36: Valores Dureza AISI 420A Transversal.....	75
Figura 4.37: Posicionamento retirada de dureza transversal.....	76
Figura 4.38: Valores Dureza Transversal AISI 410D.....	77

Figura 4.39: Valores Dureza Transversal AISI 420A.	77
Figura 4.40: Camada refundida aço 410D como recebido.	78
Figura 4.41: Camada refundida aço 410D temperado.	79
Figura 4.42: Camada refundida aço 420A como recebido.	80
Figura 4.43: Camada refundida aço 420A temperado.	80
Figura 4.44: Aço 420A temperado - Zona termicamente afetada.	81

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1: Parâmetros de têmpera e revenimento dos aços inoxidáveis AISI 410 e 420.....	34
Tabela 3.1: Composição química dos aços inoxidáveis AISI 410D e 420A.	36
Tabela 3.2: Sequência de ensaios.....	39
Tabela 3.3: Parâmetros da EDM.	42
Tabela 4.1: TRM aço AISI 410D.....	52
Tabela 4.2: TRM aço AISI 420A.....	54
Tabela 4.3: DE aço AISI 410D.	57
Tabela 4.4: DE aço AISI 420A.	60

LISTA DE SÍMBOLOS

EDM	<i>Electrical Discharge Machining</i> /Usinagem por Descargas Elétricas
GAP	Comprimento da centelha / Distância entre o eletrodo e a peça
Ra	Rugosidade média (μm)
Rt	Rugosidade total (μm)
Rz	Rugosidade média (μm)
A	Corrente (A)
On	Tempo de descarga (μs)
Ie	Corrente durante a descarga (A)
DC	Tempo de Pausa (%)
$\hat{u}_i$	Tensão em aberto [V];
$\hat{u}_e$	Tensão média da descarga [V];
U	Tensão média de trabalho durante usinagem [V];
td	Tempo de retardo de ignição da descarga [μs];
te	Duração da descarga [μs];
ti	Duração do pulso de tensão (td+te) [μs];
to	Duração do intervalo entre duas sucessivas descargas [μs];
tp	Duração do período do ciclo de uma descarga [μs];
$\hat{i}_e$	Corrente máxima durante a descarga [A];
i_e	Corrente média durante a descarga [A];
δ	Relação de contato;
TRM	Taxa de remoção do material;
DE	Taxa de desgaste do eletrodo;
MO	Microscópio Óptico;
AISI	<i>American Iron and Steel Institute</i>
DOE	<i>Design of Experiments</i> – Projeto de Experiências

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	17
1.1 Justificativa.....	19
1.2 Objetivos	19
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	20
2.1 Usinagem por Eletroerosão	20
2.2 Processo de eletroerosão	26
2.3 Rugosidade	29
2.4 Aço Inoxidável	30
2.5 Tratamento Térmico	33
3. MATERIAIS E MÉTODOS.....	35
3.1 Materiais.....	36
3.2 Projeto DOE (Planejamento Fatorial Completo).....	38
3.3 Medição da perda de massa.....	39
3.4 Preparação da máquina.....	41
3.5 Análise da rugosidade	43
3.6 Análise do <i>overcut</i>	44
3.7 Análise microestrutural superficial	45
3.8 Análise de dureza	51
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	52
4.1 Retirada de Material	52
4.2 <i>Overcut</i>	62
4.3 Rugosidade superficial	65
4.4 Análise da dureza superficial	74
4.5 Análise das alterações na microestrutura	78
5. CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS.....	82
5.1 Conclusões.....	82
5.2 Sugestões de trabalhos futuros	83
6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	84

1. INTRODUÇÃO

Com a grande exigência do mercado industrial, a busca por novos materiais e processos de fabricação cada vez mais sofisticados, e que atendam a um conjunto de características que resulte em alta qualidade é cada vez maior. Dentre essas características têm-se aquelas voltadas para as propriedades do material como a elevada resistência à fadiga, à corrosão e ao desgaste, e atributos que levam em consideração o menor tempo de fabricação, custo reduzido e durabilidade da peça produzida (SANTOS, 2010). A partir do aumento da utilização desses materiais de altas resistências, surge a dificuldade da fabricação, visto que são difíceis de serem usinados utilizando-se métodos convencionais (SABBO, 2017). Assim, métodos não convencionais de fabricação ganham espaço, e entre eles encontra-se a usinagem por eletroerosão, ou *Electro Discharge Machning* (EDM).

De acordo com Benedict (1987), a eletroerosão é um processo térmico que usa descargas elétricas para erodir a superfície de materiais que são condutores elétricos. O processo de remoção de material ocorre como resultado da geração de temperaturas extremamente altas, a partir da alta intensidade das descargas elétricas, vaporizando o material a ser erodido (EL-HOFY, 2005).

Dessa forma, por apresentar um mecanismo de remoção de material com alta performance, o processo de eletroerosão apresenta as seguintes vantagens segundo El-Hofy (2005):

- Fabricação de cavidades com paredes e características finas;
- Fabricação de peças de geometrias mais difíceis;
- A dureza do material usinado não afeta o processo;
- Processo livre de rebarbas.

Para que o processo de EDM seja bem desempenhado e uma boa precisão e acabamento sejam alcançados, há uma série de parâmetros relativos à sua operação que precisam ser ajustados (BENEDICT, 1987). A corrente elétrica utilizada, a frequência da descarga elétrica, a fenda de trabalho (GAP) entre os eletrodos e a duração da descarga elétrica são parâmetros que necessitam de uma combinação adequada para obter os resultados desejados.

Além dos parâmetros do processo, conhecer a usinabilidade do material a ser trabalhado em relação ao mecanismo escolhido também é importante, isso porque essa característica pode ser entendida como a facilidade ou dificuldade que um material tem de ser usinado por um dado

procedimento. De acordo com Mills (1983), não há um parâmetro específico que determine a usinabilidade do material, diferente de outras propriedades, essa vai depender também do interesse do usuário. Em alguns casos ela pode ser relacionada especificamente com o acabamento superficial, outros como o material se comporta em relação a um conjunto de condições de usinagem pré-definidos, por exemplo. Por se tratar de uma propriedade que não tem um parâmetro específico definido é significativo possibilitar o melhor ajuste dos parâmetros de usinagem conforme a qualidade superficial almejada (ROSSETO, 2022)

A maioria dos materiais apresenta algum tipo de interação com o meio que, com frequência, pode gerar sua deterioração. Para cada tipo de material há um mecanismo de deterioração diferente. Para os metais, Callister (2002) diz que há uma perda efetiva de material, seja por dissolução, que resulta na corrosão, ou pela formação de uma incrustação ou película de material não metálico, a oxidação.

Também segundo Callister (2002), foi estimado nos anos 2000 que aproximadamente 5% da receita de uma nação industrializada são gastos na prevenção à corrosão, e manutenção ou substituição de produtos deteriorados pela corrosão. A perda de peças metálicas por essa deterioração gerou a busca de novos mecanismos de proteção e até mesmo de novas ligas, resultando, entre elas, no aço inoxidável.

O aço inoxidável apresenta no geral as características dos aços e se destaca pela resistência à corrosão, solucionando esse grande problema da perda pela deterioração. Pelas suas características oferece uma grande variedade de usos e acabamentos. Como resultado, o aço inoxidável pode ser encontrado em muitos objetos do cotidiano. Segundo APERAM (2022), o aço em questão também desempenha um papel proeminente em uma série de indústrias, incluindo energia, transporte, construção, pesquisa, medicina, alimentos e logística.

Os aços inoxidáveis martensíticos de grau 410, 420A, 420B e 420C tem sido amplamente utilizados para a fabricação de instrumentos cirúrgicos cortantes e não cortantes, cutelaria, moldes para injeção de polímeros e componentes mecânicos que combinam elevada resistência mecânica e resistência à corrosão (APERAM, 2022).

Estes são comercializados no estado recozido com dureza aproximadas de 200 HB, após a conformação, são submetidos a tratamentos térmicos para obter a dureza que se deseja (DALIBON et al., 2019).

1.1 Justificativa

A busca por competitividade e produtividade em um mercado globalizado e cada vez maior, faz com que as indústrias do segmento metal mecânico busquem equipamentos e processos versáteis, e que sejam capazes de usinar metais de diferentes composições químicas e durezas. Neste contexto, estão inseridos os processos não convencionais de usinagem, como a eletroerosão.

Na usinagem convencional a relação entre o processo de corte e as propriedades mecânicas dos materiais, assim como o efeito do tratamento térmico realizado na peça, tem sido bastante explorada por diversos autores, e muitos são os resultados já difundidos. Já os processos não convencionais, como a eletroerosão, ainda necessitam de muitas pesquisas que possam contribuir com resultados para a indústria, com o intuito de melhorar a tomada de decisão na escolha de parâmetros a serem utilizados na usinagem de uma diversidade de materiais, como os aços inoxidáveis martensíticos.

Desta forma, este trabalho tem como motivação a aplicação de metodologias que possam avaliar o desempenho da eletroerosão por penetração na usinagem dos aços inoxidáveis 410D e 420A, possibilitando de certa maneira fundamentar, fazer uma análise exploratória dos resultados obtidos, consolidar a técnica utilizada, e, posteriormente, contribuir com a literatura especializada da área.

1.2 Objetivos

Objetivo geral

Esta pesquisa tem como objetivo avaliar a influência do tratamento térmico no processo de usinagem por eletroerosão por penetração dos aços inoxidáveis AISI 410D e 420A, com a variação dos parâmetros de usinagem, na qualidade da superfície gerada, e se o tratamento térmico dos aços inoxidáveis utilizados influencia no produto final.

Objetivos específicos:

- Avaliar o sobrecorte obtidos pela usinagem em eletroerosão por penetração dos aços inoxidáveis AISI 410D e 420A com e sem tratamento térmico.
- Avaliar a rugosidade gerada após a usinagem dos aços inoxidáveis AISI 410D e 420A com e sem tratamento térmico, pelo processo de eletroerosão por penetração.
- Avaliar a taxa de remoção de material usinado e a taxa de desgaste do eletrodo.

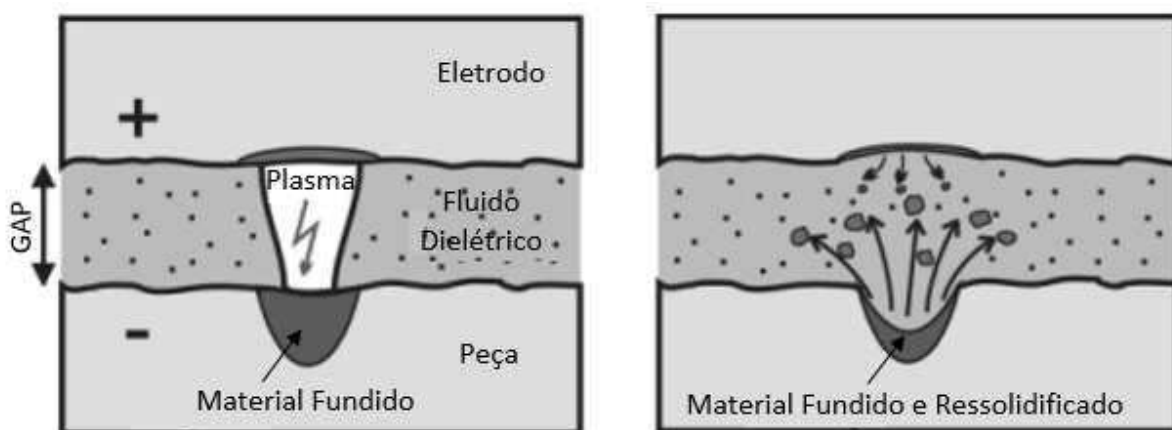
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Usinagem por Eletroerosão

EDM é um processo de usinagem não convencional que envolve a remoção de material pelo processo térmico com sucessivas descargas elétricas de alta frequência que geram fusão e vaporização de materiais (EUBANK, 1993), entre um eletrodo e uma peça de qualquer material condutor de eletricidade, sem contato mecânico entre eletrodo e peça eliminando tensões mecânicas e vibração durante a usinagem, independentemente de qualquer dureza e ou resistência mecânica (BERI et al, 2014). No processo cada faísca da descarga elétrica gera energia térmica que funde e evapora pequenas porções de material. Para que ocorra essas descargas, o eletrodo e a peça permanecem separados por uma pequena distância, chamada de fenda de trabalho ou GAP, e submersos por um fluido dielétrico. A remoção de material se dá no ponto mais próximo entre o eletrodo e a peça, formando uma cavidade com o formato oposto do eletrodo, com a remoção do material o equipamento move o eletrodo para mais próximo da peça mantendo a distância constante (STEVENS, 1998).

A aplicação mais usual deste processo está ligada à fabricação de ferramentas na produção de moldes, matrizes e punções de estampo, é utilizado também no acabamento de peças da indústria aeronáutica, automotiva e de componentes cirúrgicos no que tange à fabricação de componentes em ligas de alta resistência, como os aços inoxidáveis e as superligas de titânio e a base de níquel (AMORIM, 2002). A Figura 2.1 traz uma representação da remoção de material em um pulso na EDM.

Figura 2.1: Remoção de material em um pulso na usinagem EDM.

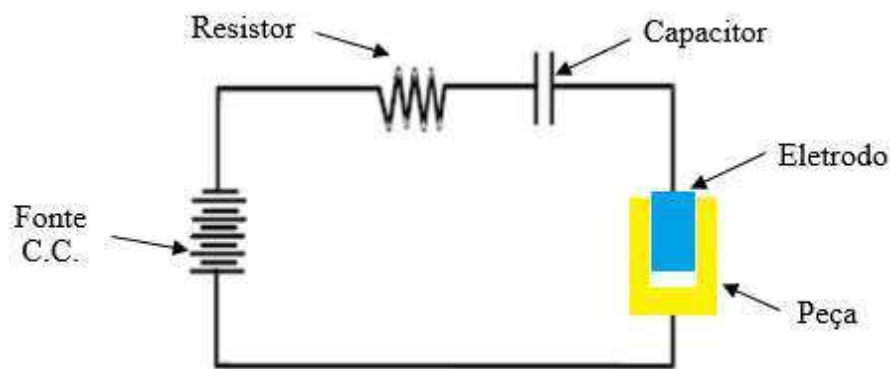


Fonte: adaptado de BLEYS (2006)

O início do processo EDM foi com a descoberta do efeito erosivo da descarga elétrica ou centelha, pelo químico inglês Joseph Priestley no ano de 1770, de acordo com König & Klocke (1997) as primeiras aplicações do processo de usinagem através de descargas elétricas datam do período entre a primeira e a segunda guerra mundial, basicamente este processo era utilizado na remoção de ferramentas de usinagem, geralmente confeccionadas em aço rápido e metal-duro, quebradas dentro de cavidades profundas. Os equipamentos utilizados eram rudimentares e o controle da distância entre o eletrodo e a peça era feito manualmente (OLINIKI, 2009).

O início do processo EDM foi com a descoberta do efeito erosivo da descarga elétrica ou centelha, pelo químico inglês Joseph Priestley no ano de 1770, de acordo com König & Klocke (1997) as primeiras aplicações do processo de usinagem através de descargas elétricas datam do período entre a primeira e a segunda guerra mundial, basicamente este processo era utilizado na remoção de ferramentas de usinagem, geralmente confeccionadas em aço rápido e metal-duro, quebradas dentro de cavidades profundas. Os equipamentos utilizados eram rudimentares e o controle da distância entre o eletrodo e a peça era feito manualmente. A Figura 2.2 traz um esquema do sistema resistência capacitância utilizado pelos irmãos Lazarenko.

Figura 2.2: Circuito de Lazarenko.



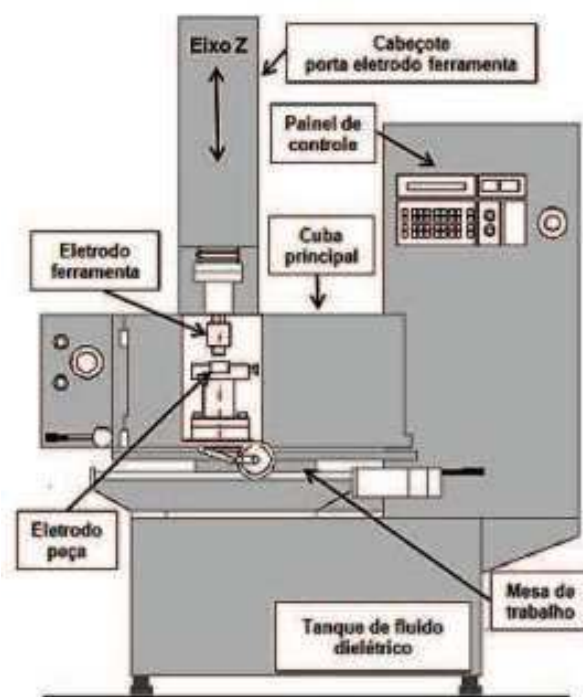
Fonte: adaptado de KONIG; KLOCKE (1996)

Com o desenvolvimento de semicondutores a partir de 1960, houve uma grande melhoria nas máquinas de EDM, tornando os movimentos dos eletrodos mais precisos, melhorando o desempenho do processo (HOUMAN, 1983; MASAKI et al, 1990).

Atualmente, as máquinas de EDM CNC possuem geradores que permitem a geração de pulsos estáticos e um controle da duração do pulso da descarga elétrica, havendo um controle mais preciso na energia aplicada ao processo que possibilita a obtenção de um processo mais

fino (SILVA, 2006; OLINIKI, 2009). A Figura 2.3 traz uma máquina de EDM por penetração com a identificação dos seus principais componentes.

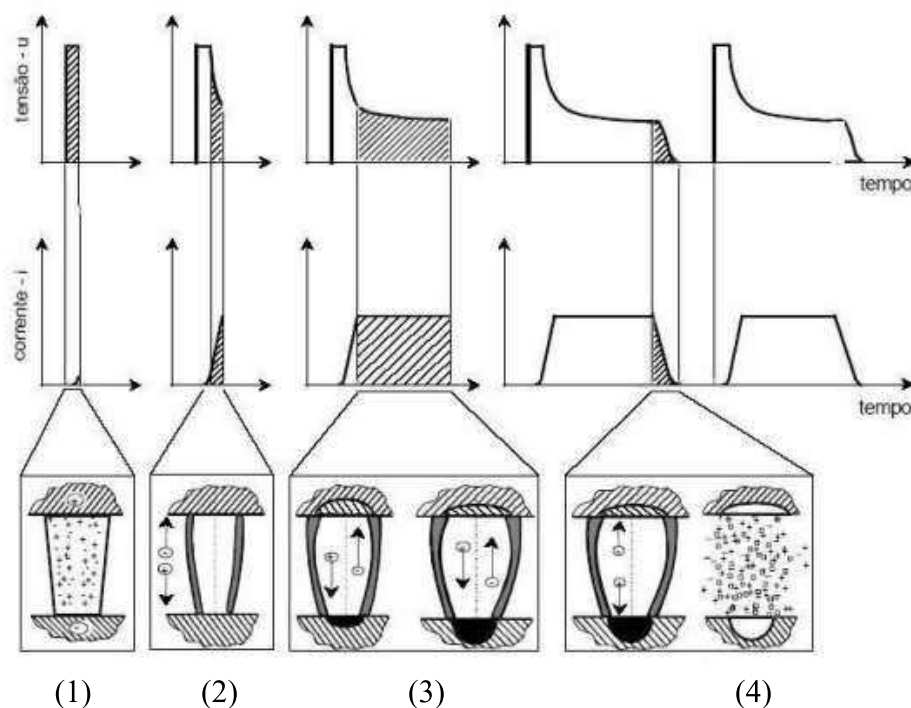
Figura 2.3: Máquina de Eletroerosão por Penetração.



Fonte: SANTOS (2013)

Existem várias teorias para explicar a natureza da usinagem por EDM, a teoria da termoeletrônica é a mais aceita para explicar o que ocorre durante descarga elétrica na remoção do material na EDM (AMORIM, 2002). O ciclo de uma descarga elétrica entre o eletrodo carregado positivamente (ânodo) e a peça negativa (cátodo) (ou vice-versa), submerso em fluido dielétrico, é dividido em quatro fases consecutivas. A Figura 2.4 representa os quatro ciclos da descarga elétrica em uma máquina de EDM: 1) Ignição; 2) Formação do canal de plasma; 3) Fundição e sublimação dos materiais da peça e eletrodo, e; 4) Limpeza dos resíduos produzidos no processo.

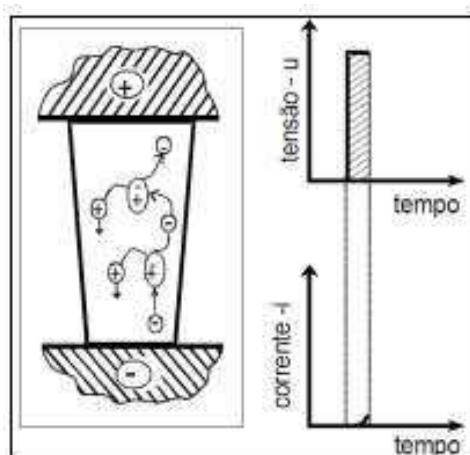
Figura 2.4: Fases de uma descarga eléctrica durante o processo de EDM.



Fonte: AMORIM (2002)

De acordo com Amorim (2002) e Santos (2013), a ignição (fase 1) ocorre quando há um distanciamento de 0,05 a 1,0 mm entre o eletrodo e a peça, como o dielétrico tem a função de isolante, existe uma tensão elétrica, sem fluxo de corrente. O polo positivo emite elétrons que se aceleram e se chocam com as moléculas do fluido dielétrico entre o eletrodo e a peça, liberando mais elétrons e íons positivos que se encaminham para o cátodo, ilustrado na Figura 2.5.

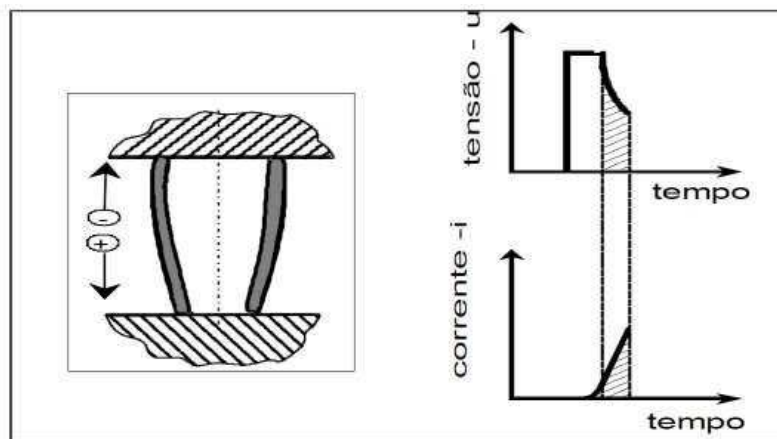
Figura 2.5: Fase da Ignição.



Fonte: AMORIM (2002)

Segundo Santos (2013) na formação do canal de plasma (fase 2) ocorre a multiplicação em altíssima velocidade do fenômeno de ionização por impacto, íons positivos liberados do dielétrico se chocam contra o cátodo, liberando elétrons que são atraídos para o ânodo, gerando superaquecimento e evaporação de uma pequena quantidade de dielétrico, aumentando a corrente elétrica e um decréscimo da resistência do dielétrico formando túneis transportadores de energia elétrica, tanto para o ânodo quanto para cátodo, neste momento a corrente atinge os níveis regulados pelo operador da máquina EDM, concentrando-se em uma pequena superfície da peça. A corrente restringe-se exclusivamente à superfície do canal de descarga e concentra-se em uma seção mínima, formando um canal de plasma que fica contornado por uma bolha de vapor e pelo dielétrico, ilustrado na Figura 2.6.

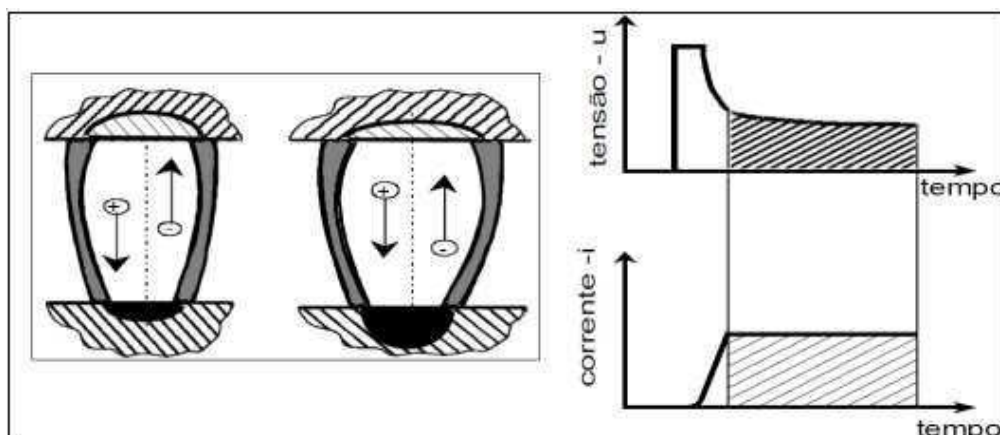
Figura 2.6: Fase da Formação do canal de plasma.



Fonte: Fonte: AMORIM (2002)

Na sequência, ocorre a fusão e sublimação de uma pequena porção do eletrodo e da peça (fase 3), onde o canal de plasma de alta energia funde e evapora continuamente por condução térmica, por um período de tempo estipulado pelo operador, ocasionando uma pequena poça de material líquido no eletrodo e na peça, ilustrado na Figura 2.7.

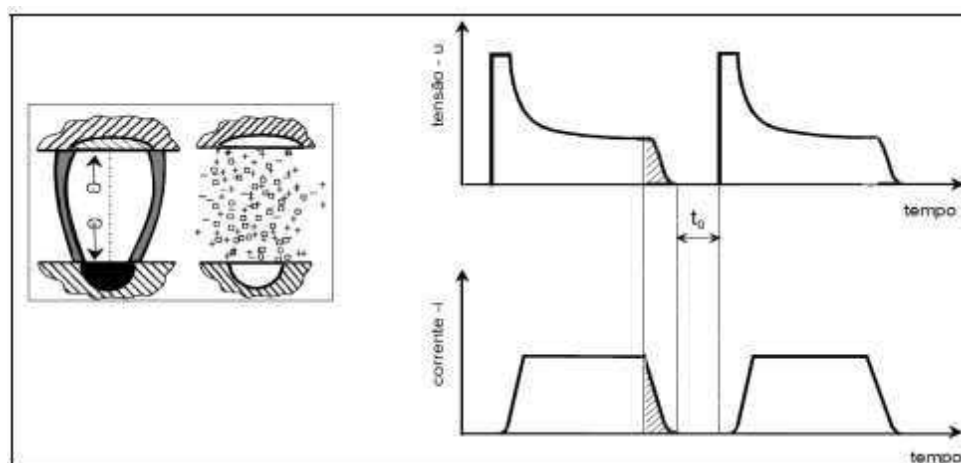
Figura 2.7: Fase da Fundição e sublimação do material da peça e eletrodo.



Fonte: Fonte: AMORIM (2002)

A ejeção do material (fase 4) evaporado acontece após a interrupção instantânea da descarga elétrica, a instantânea queda de pressão extingue o canal de plasma e a bolha de gás, uma parte do material fundido se solidifica e a outra parte é expulsa pela pressão de circulação do fluido (BLEYS et al., 2006), ilustrado na Figura 2.8.

Figura 2.8: Fase da limpeza dos resíduos produzidos no processo.



Fonte: Fonte: AMORIM (2002)

As partículas fundidas são removidas da região pelo dielétrico, desintegradas na forma de minúsculas esferas, e no seu lugar fica uma pequena cratera. O fornecimento de corrente é interrompido pelo afastamento do eletrodo. Uma nova descarga recomeça com a reaproximação do eletrodo até a distância GAP. O dielétrico, além de atuar como isolante, participa desta limpeza e refrigera a superfície usinada (SODRÉ, 2017).

De acordo com a teoria termoelétrica, as propriedades mecânicas da peça e do eletrodo têm pouca influência sobre o desempenho do processo. Entretanto, as propriedades termofísicas

como condutividade térmica e elétrica, a expansão térmica, a temperatura de fusão e de ebulição, influenciam consideravelmente no processo (SANTOS, 2007; AMORIM, 2002).

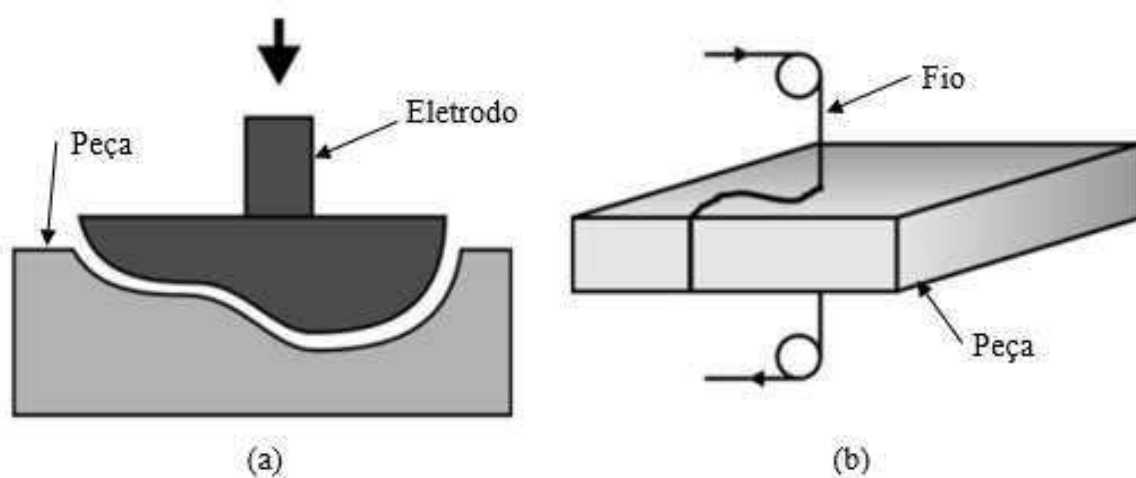
Erden e Kaftanoglu (1981) relatam que apenas entre 10 a 15% do material superaquecido pelo canal de plasma é ejetado da poça de fusão devido à queda de pressão no final da descarga. Assim, entre 85 a 90% do material fundido é depositado e ressolidificado na superfície da peça, produzindo a camada refundida.

2.2 Processo de eletroerosão

Os processos de eletroerosão podem ser classificados como eletroerosão por penetração (EDM) e eletroerosão a fio (WEDM). Ambos processos utilizam descargas elétricas para remover material eletricamente condutivo, na eletroerosão por penetração tanto o eletrodo quanto a peça fica submerso em fluido dielétrico que normalmente é um composto de hidrocarbonetos, enquanto na eletroerosão a fio somente a área de usinagem é submersa e o fluido comumente utilizado é a água deionizada devido a sua baixa viscosidade o que permite uma melhor limpeza no local de usinagem (BENEDICT, 1987).

Segundo Amorim (2002), na EDM por penetração (Figura 2.9a), o eletrodo conduz a sua imagem à peça conforme avança na cavidade usinada, sendo que o avanço do eletrodo pode ocorrer no sentido vertical (eixo Z) ou horizontal (eixos X e Y). No processo de EDM a fio (Figura 2.9b) é usado um fio bobinado que se desenrola continuamente, sendo a peça produzida pelo movimento relativo entre o fio e a peça.

Figura 2.9: Representação tipos básicos de eletroerosão.



Fonte: Adaptado de BLEYS (2006)

2.2.1 Parâmetros de controle no processo de eletroerosão

A seleção dos parâmetros EDM, em função do tipo de material da peça e do eletrodo é importante para garantir a precisão dimensional, rugosidade, integridade superficial, desgaste do eletrodo, tolerância de forma e posição, depende, entre outras coisas, do regime de trabalho adotado pelo operador da EDM, tais como polaridade, material do eletrodo, tensão e corrente elétrica, duração do pulso e tempo entre pulsos, selecionados para aplicações específicas (BENEDICT, 1987).

Para definir os parâmetros de usinagem são utilizadas tabelas fornecidas por fabricantes ou tabelas tecnológicas desenvolvidas com base na norma alemã VDI 3402, porém, tais tabelas não distinguem a condição de tratamento térmico ao qual a peça foi submetida, tampouco a dureza das mesmas (SODRÉ, 2017). A Figura 2.10 apresenta, de acordo com a norma europeia VDI 3402-1990, um resumo e definição dos principais parâmetros elétricos de controle do processo de EDM.

Com estes parâmetros é possível controlar múltiplas variáveis que permitem obter os resultados pretendidos. São eles:

$\hat{u}_i$ - tensão em aberto [V];

u_e - tensão média da descarga [V];

U - tensão média de trabalho durante usinagem [V];

t_d - tempo de retardo de ignição da descarga [μs];

t_e - duração da descarga [μs];

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

t_o - duração do intervalo entre duas sucessivas descargas [μs];

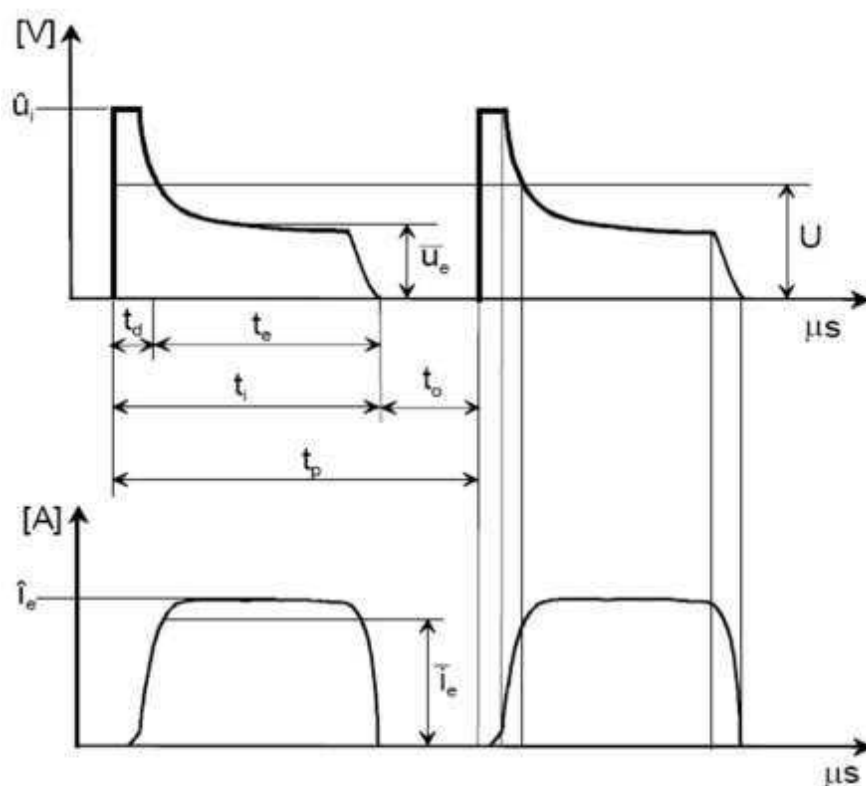
t_p - duração do período do ciclo de uma descarga [μs];

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

i_e - corrente média durante a descarga [A];

δ - relação de contato: razão entre a duração do pulso (t_i) e a duração do período do ciclo de descarga- representa a razão entre o tempo de pulso t_i e o tempo de período do ciclo da descarga (t_p).

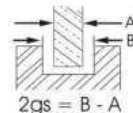
Figura 2.10: Evolução da tensão e corrente elétrica durante a descarga de uma faísca, tempos de duração dos mesmos e parâmetros elétricos.



Fonte: AMORIM (2002)

A Figura 2.11 apresenta uma tabela utilizada para a regulação de uma EDM fornecida pelo fabricante.

Figura 2.11: Representação de uma tabela tecnológica fornecida pelo fabricante.

ELETRODO: Cobre (Eletrolítico)	POLARIDADE DO ELETRODO: (+)
PEÇA: Aço	TENSÃO: 100V
	

VALORES ESTABELECIDOS			RUGOSIDADE	REMOÇÃO MATERIAL	DESGASTE	SUBDIMENSIONAMENTO				CONDIÇÃO TESTE		
On	Ie	Dc	Rmax	Vw	Vv	PRESSÃO (mm)		SUCÇÃO (mm)		Vmin	Iav	Área
μs	QT	%	μm	mm³/min	%	2gs max	2gs	2gs max	2gs	Volt	A	Cm²
5	1	48	7	1.6	10	0.071	0.045	0.058	0.032	45	1	5
10	1	65	8	4.0	5	0.085	0.053	0.072	0.040	45	2	5
20	1	76	11	6.8	3	0.114	0.068	0.099	0.053	45	2	5
20	2	76	13	23	7	0.128	0.075	0.113	0.060	43	4	5
50	1	89	14	6.8	1.5	0.141	0.082	0.125	0.066	40	2.5	5
50	2	89	17	27	1.6	0.168	0.094	0.154	0.080	40	5	5

Fonte: ELETRO (2015)

Em que:

O Impulso On determina a duração do pulso ou tempo de descarga. É o tempo durante o qual a centelha possui energia elétrica.

Quantidade de corrente I_e trata-se da corrente de descarga consumida no processo de eletroerosão sendo um parâmetro de extrema importância na qualidade e rendimento da operação. Este parâmetro se relaciona diretamente com o grau de acabamento desejado, o desgaste do eletrodo e a velocidade de usinagem.

Pausa Dc é o parâmetro relacionado ao tempo de pausa entre duas descargas consecutivas. Neste tempo ocorre a interrupção da descarga elétrica, sendo o tempo necessário à estabilização do ambiente no GAP, incluído o tempo de explosão da bolha de gases, após o tempo de corrente ligada.

De acordo com Santos (2007) pela teoria termoelétrica, as propriedades mecânicas do material da peça e do eletrodo têm pouca influência sobre o desempenho do processo.

2.3 Rugosidade

A rugosidade de uma superfície são os desvios, saliências ou reentrâncias, encontradas em peças de qualquer material, são irregularidades perceptíveis ou não, que influência nas características mecânicas da superfície como: qualidade de deslizamento e aderência, resistência ao desgaste, à fadiga, à corrosão, ao escoamento de fluidos e lubrificantes, ajustes, qualidade do ajuste, da vedação e da aparência.

São usados dois sistemas básicos de medidas da rugosidade: o da linha média M e o da envolvente E. A norma ABNT NBR ISO 4287-2002 adota no Brasil o sistema M, que é o mais utilizado em outros países. A França adota os dois sistemas.

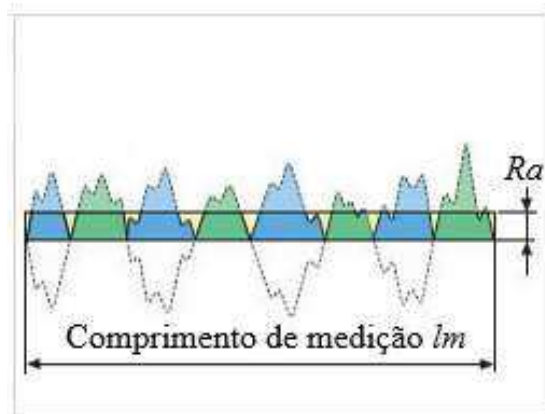
Segundo Marques (2020) na usinagem EDM o valor da rugosidade depende principalmente do comportamento de solidificação do material fundido após o final da descarga e a mudança de fase do mesmo.

2.3.1 Rugosidade média aritmética (R_a)

Segundo Agostinho 1986, rugosidade média corresponde à média aritmética dos valores absolutos das ordenadas dos afastamentos (Z_i) dos pontos do perfil de rugosidade em relação à linha média, dentro do comprimento de medição (l_m), ou seja, se colocarmos acima da linha

média todos os valores do perfil de rugosidade e calcularmos a nova média das áreas, tem-se o valor de Ra , conforme observado na Figura 2.12.

Figura 2.12: Rugosidade média aritmética (Ra).

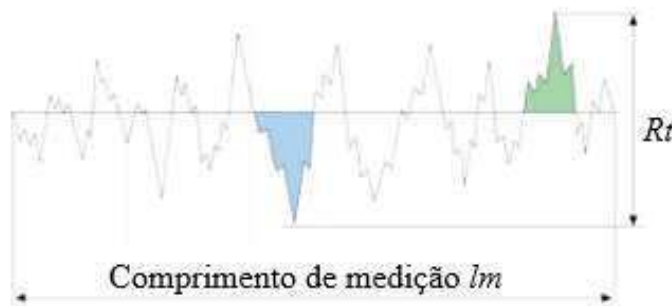


Fonte: Adaptado de OLIMPUS (2022)

2.3.2 Rugosidade total (Rt)

Corresponde à distância vertical entre o pico mais alto e o vale mais profundo no comprimento de medição (l_m), conforme observado na Figura 2.13.

Figura 2.13: Rugosidade total (Rt).



Fonte: Adaptado de OLIMPUS (2022)

2.4 Aço Inoxidável

São ligas de ferro (Fe), carbono (C) e cromo (Cr), podendo conter também Níquel (Ni), Silício (Si); Manganês (Mn); Vanádio (V); molibdênio (Mo), Nióbio (Nb) e outros elementos, com no mínimo 10,5% de peso de Cr. O Cr é o principal responsável pela elevada resistência à corrosão destes aços, que em contato com o ar atmosférico ou outro ambiente oxidante, existe a tendência de se formar rapidamente uma camada de óxido de cromo na superfície destas ligas que é impermeável e insolúvel nos meios corrosivos usuais (MODENESI, 2001). A corrosão é uma reação que ocorre entre os aços comuns e o oxigênio, levando a formação de uma camada

porosa de óxido de ferro, mais conhecida como “ferrugem”. A película formada pelo cromo não deixa que essa camada porosa se forme, ela impede que o ferro presente na liga entre em contato com o oxigênio do ar.

Tiveram como origem estudos realizados em 1912, tanto na Inglaterra como na Alemanha. O aço estudado na Inglaterra era uma liga de ferro e cromo com cerca de 13% de cromo, uma liga inoxidável muito próxima ao que hoje chamamos de 420. Na Alemanha, tratou-se de uma liga que, além de ferro e cromo, continha também níquel, uma liga inoxidável bastante parecida com o que hoje conhecemos como 302 (APERAM, 2022).

Para cada tipo de estrutura, ambiente de trabalho e esforços, serão empregados tipos específicos de aços inoxidáveis para que atinjam os objetivos esperados.

De acordo com Davis (1994), a classificação dos aços inoxidáveis baseia-se na microestrutura observada na temperatura ambiente, resultante da adição de determinados elementos de liga e processos termomecânicos realizados. Mesmo existindo diferentes classificações, os aços inoxidáveis são, a princípio, divididos em três grandes grupos: a série 400, a série 300 e a série 200. A série 400 é a dos aços inoxidáveis de liga Fe-Cr, que se dividem em dois grupos: os aços ferríticos que apresentam cromo mais alto e carbono mais baixo e os aços martensíticos em que o cromo é mais baixo e carbono mais alto. A série 300 é a dos aços inoxidáveis austeníticos de liga Fe-Cr-Ni, e a série 200 é a dos aços inoxidáveis de liga Fe-Cr-Ni-Mn.

As ligas Fe-Cr que contém entre 11,5% a 18% de cromo e entre 0,1% e 0,5% de carbono, são os aços inoxidáveis martensíticos, com essa concentração de carbono permite a transformação de ferrita em austenita em altas temperaturas, e durante o resfriamento, a austenita se transforma em martensita. Sua resistência à corrosão tende a ser inferior à dos outros tipos de aços inoxidáveis. São adequados em aplicações que requerem elevada resistência mecânica, dureza e resistência à abrasão (MODENESI, 2001; PAREDES, 1999; PADILHA, 1994).

Estes aços são utilizados nas indústrias químicas e petroquímicas, na geração de energia, nas indústrias aeronáutica e aeroespacial, além da cutelaria e ferramentaria. Sua elevada temperabilidade permite que estes sejam temperados ao ar, porém é necessário um tratamento de revenimento posterior para produzir uma boa combinação entre as propriedades de resistência, tenacidade e ductilidade (PAREDES, 2020).

Outros aços inoxidáveis martensíticos são variantes do aço 420. O aço 410 possui uma quantidade máxima de carbono de 0,15%. Sendo a martensita uma fase rica em carbono, é evidente que este aço, ao ser temperado, atinge uma dureza menor que a do 420. Esses aços são

fabricados e vendidos pela indústria siderúrgica no estado recozido, com estrutura ferrítica, baixa dureza e boa ductilidade.

Já a liga de Fe-Cr-Ni, são os aços inoxidáveis austeníticos. Dos três grupos, estes aços são os que apresentam maior resistência à corrosão. Eles combinam baixo limite de escoamento com alta resistência à tração e bom alongamento, oferecendo as melhores propriedades para trabalho a frio, não são magnéticos e não são endurecíveis por tratamento térmico (MODENESI, 2001; PAREDES, 1999; PADILHA, 1994).

Os aços inoxidáveis ferríticos são ligas Fe-Cr com predominância da ferrita em temperatura ambiente. Tem entre 12% a 30% de cromo e baixo teor de carbono, mantêm-se ferríticos mesmo em temperaturas relativamente altas, havendo apenas crescimento de grão. Como não são austenitizados, estes aços não podem ser endurecidos por têmpera e sua granulação só pode ser refinada por combinação de trabalho mecânico e recozimento de recristalização. Apresentam uma boa resistência à corrosão e à oxidação (MODENESI, 2001; PAREDES, 1999; PADILHA, 1994), apresenta a maioria das propriedades mecânicas e resistência à corrosão que os aços austeníticos, que são mais caros, e ainda supera em algumas características, como baixa expansão térmica, alta condutibilidade térmica, dentre outras (ISSF, 2019).

Dentro da classificação dos aços inoxidáveis, ainda se tem os aços inoxidáveis duplex e aços inoxidáveis endurecíveis por precipitação. Os aços inoxidáveis duplex são ligas que contém cerca de 18% a 30% de Cr, 1,5% a 4,5% de Mo e adições de elementos formadores e estabilizantes da austenita, principalmente, o níquel e o nitrogênio, de maneira a formar uma microestrutura, à temperatura ambiente, formada de partes iguais de ferrita e austenita. Por terem excelentes propriedades mecânicas e resistência à corrosão, possuem ampla utilização nas indústrias químicas, de óleo, gás, papel e celulose, evaporadores, dutos e tanques de condução e armazenamento de material corrosivo. Os endurecíveis por precipitação são obtidos através de adição de cobre, titânio, nióbio e alumínio. São capazes de desenvolver elevados níveis de resistência mecânica pela formação de finos precipitados, junto com a microestrutura martensítica, ductilidade e tenacidade superiores a outros aços de resistência similar (MODENESI, 2001; PAREDES, 1999; PADILHA, 1994).

O aço 410D (UNS S41003) é um aço inoxidável ferrítico com baixa adição de elementos de liga e baixo teor de cromo, apresenta elevada resistência mecânica à tração, boa soldabilidade e boa resistência em ambientes corrosivos e abrasivos quando comparado a aços de baixo carbono comuns (APERAM, 2021).

A substituição de aços carbono por aços inoxidáveis proporciona o aumento da vida útil dos equipamentos, redução de custos com manutenção e a redução de espessura das chapas, que no caso do aço 410D pode chegar a até 50%, devido sua elevada resistência mecânica por tração e resistência à corrosão, quando comparado aos aços de baixo carbono comuns (FARIA *et al.*, 2015 apud NUNES, 2020).

O aço inoxidável martensítico mais conhecido e utilizado é o AISI 420, que na sua condição recozida é conformado ou trabalhado a frio (ALCÂNTARA, 2021). A sua capacidade de ser endurecido por tratamento térmico atingindo altos níveis de resistência (APERAM, 2022), são amplamente utilizados em aplicações de cutelaria, moldes para injeção de polímeros e componentes mecânicos que combinem elevada resistência mecânica e resistência à corrosão (PINEDO, 2004).

2.5 Tratamento Térmico

Tratamento térmico refere-se a um conjunto de processos que visam melhorar as propriedades físicas e mecânicas dos metais com aquecimento e resfriamento de forma controlada, sem interferir na sua forma final. O processo de tratamento térmico pode ser realizado de forma total ou parcial da peça, reorganizando a forma estrutural dos átomos (COPPERMETAL, 2022).

O processo de têmpera nos aços consiste no aquecimento do material dentro do campo austenítico, seguido de resfriamento até uma temperatura abaixo da temperatura de início da transformação martensítica, sendo este rápido o suficiente para obtenção de martensita (CALLISTER, 1999, 1977; LESLIE, 1981; SMITH, 2010).

Segundo Crawford (1982), a temperatura de austenitização não deve ser muito baixa, pois esta conduz a baixos valores de tenacidade devido a não dissolução dos carbonetos e, ao mesmo tempo, não deve ser muito alta para evitar o crescimento acentuado dos grãos austeníticos.

Na Tabela 2.1, apresenta as temperaturas recomendadas para têmpera e revenido, bem como o limite de resistência e dureza destes aços inoxidáveis. As temperaturas usuais de têmpera para o aço AISI 410 se encontram entre 925 °C a 1010 °C e para o aço AISI 420 entre 980 °C a 1065 °C.

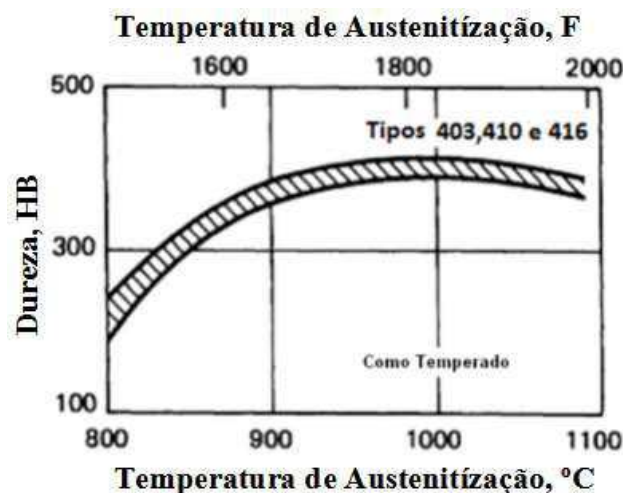
Tabela 2.1: Parâmetros de têmpera e revenimento dos aços inoxidáveis AISI 410 e 420.

Tipo	Têmpera		Meio	Temperatura de Revenido				Limite de Resistência a Tração		Dureza HRC
	Temperatura			°C		F		MPa	ksi	
	°C	°F		min.	max.	min.	max.			
410	925-1010	1700-1850	Ar ou óleo	565	605	1050	1125	760-965	110-140	25-31
				205	370	400	700	1105-1515	160-220	38-47
420	980-1065	1800-1950	Ar ou óleo	205	370	400	700	1550-1930	225-280	48-56

Fonte: Adaptado ASM (1991).

Estes mesmos resultados também podem ser observados na Figura 2.14 para o aço AISI 410, onde se verifica que as temperaturas entre 950 e 1050 °C propiciam uma maior dureza após a têmpera, indicando uma maior solubilização dos carbonetos de cromo. Consequentemente neste trabalho optou-se pela temperatura de têmpera de 1050 °C.

Figura 2.14: Efeito da temperatura de austenitização na dureza de aços inoxidáveis martensíticos forjados.



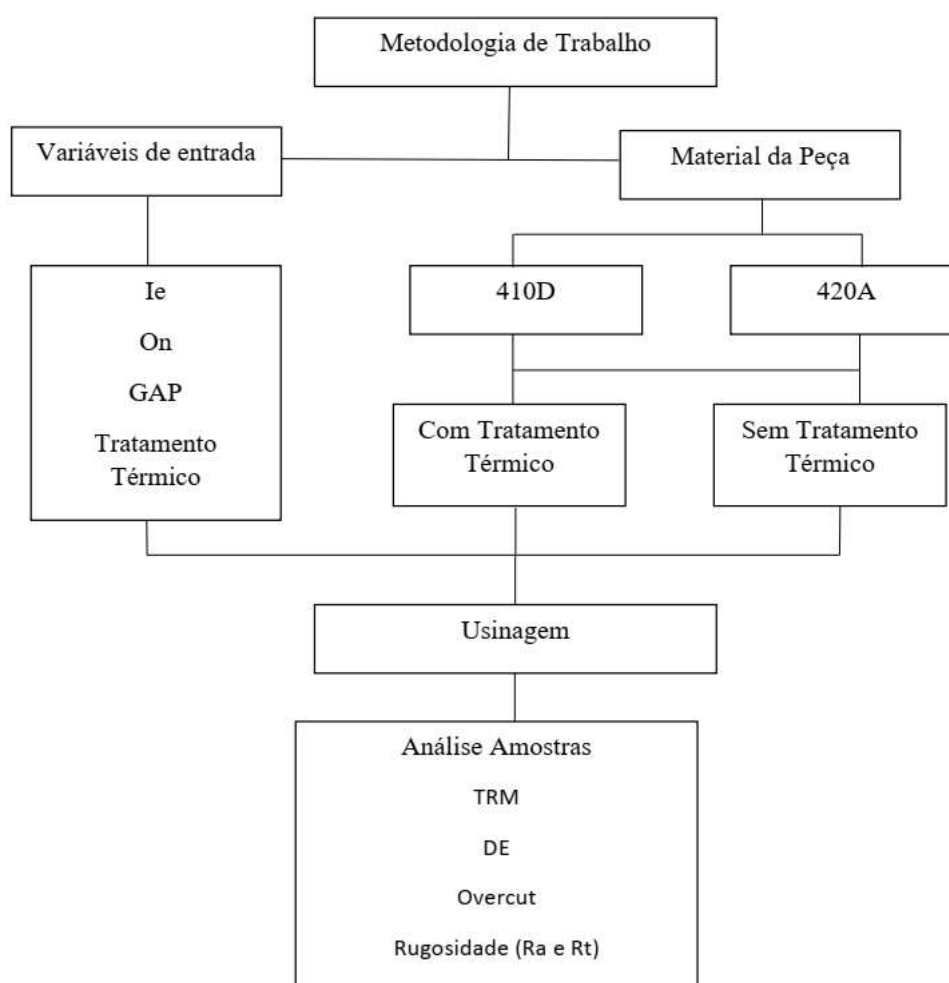
Fonte: Adaptado ASM (1991).

Durante a usinagem, a garantia de parâmetros como precisão dimensional, rugosidade superficial, tolerância de forma e posição depende, entre outras coisas, do regime de trabalho adotado pelo operador do equipamento de usinagem, que no caso do EDM é função do tipo de material da peça e do eletrodo ferramenta. De acordo com a teoria de eletroerosão, as propriedades mecânicas da peça e do eletrodo ferramenta, influenciam muito pouco no processo, ao contrário do que ocorre com as propriedades físicas, tais como, condutividade térmica e elétrica, que por sua vez influenciam profundamente no processo (SANTOS, 2007).

3. MATERIAIS E MÉTODOS

O procedimento para a realização dos experimentos respeitou uma sequência de preparação das amostras desde a obtenção dos materiais como recebidos até a usinagem por eletroerosão e avaliação dos resultados tendo como objetivo a comparação do comportamento das amostras tratadas termicamente com as que foram mantidas na condição sem tratamento térmico. A Figura 3.1 apresenta um fluxograma que foi desenvolvido para sistematizar, orientar e organizar os trabalhos de usinagem e análise dos resultados. Os experimentos foram realizados no Laboratório de Materiais e Fabricação (LAMAF) da Escola de Engenharia Elétrica, Mecânica e de Computação (EMC) da Universidade Federal de Goiás (UFG).

Figura 3.1: Fluxograma de trabalho.



Fonte: Próprio Autor

3.1 Materiais

Os corpos de prova foram confeccionados em aço inoxidável AISI 410D e AISI 420A de espessuras 5,3 mm e 4,7 mm, respectivamente, na estrutura ferrítica. A Tabela 3.1 apresenta as composições químicas dos referidos aços.

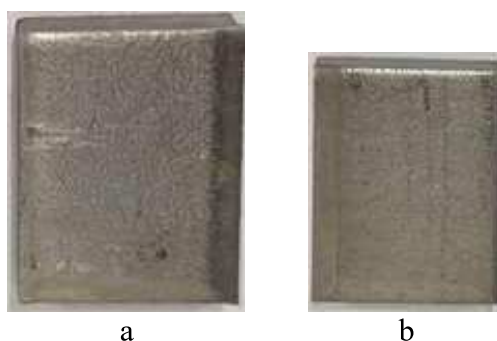
Tabela 3.1: Composição química dos aços inoxidáveis AISI 410D e 420A.

Aço	C	Mn	Si	P	S	Cr	Ni
410D	0,0150	0,58	0,50	0,028	0,0008	11,16	0,34
420A	0,3200	0,28	0,40	0,028	0,0011	12,18	0,19

Fonte: APERAM (2022)

As amostras foram fornecidas pela empresa Aperam South América, de chapas laminadas à quente e já cortadas em guilhotina nas dimensões aproximadas de: 22x25 mm para as de AISI 410D (Figura 3.2a) e de 20x20 mm para as de AISI 420A (Figura 3.2b).

Figura 3.2: Amostra dos aços inoxidáveis AISI 410D e 420A como fornecidos.



Fonte: Próprio autor

3.1.1 Tratamento térmico

Para a transformação estrutural dos aços inoxidáveis da microestrutura ferrítica para o estado martensítico foi realizado um tratamento térmico utilizando um forno de indução da marca JUNG modelo 3010 de 6 kW de potência, foi utilizada uma temperatura de 1050 °C por 30 min, segundo Pinedo (2004) com temperaturas acima de 1050 °C a dureza diminui devido ao aumento da austenita retida, e com a opção de resfriamento ao ar forçado em detrimento a outros, devido ao fato de os aços inoxidáveis martensíticos terem elevada temperabilidade, e causar trincas nos corpos de prova (ALCANTARA, 2021). Na Figura 3.3 é mostrado o forno utilizado com todas as amostras dos aços em estudo no seu interior.

Figura 3.3: Forno de tratamento térmico JUNG.



Fonte: Próprio autor

A Figura 3.4 demonstra o resfriamento das amostras dos aços inoxidáveis AISI 410D e 420A.

Figura 3.4: Resfriamento forçado.



Fonte: Próprio autor

3.1.2 Retificação plana das amostras

Como as amostras foram confeccionadas de chapas laminadas à quente e recozida, cortadas utilizando uma guilhotina e aquecidas no forno, foi realizada a retificação plana ao mesmo tempo em todas as amostras, nas duas faces para que as mesmas ficassem paralelas e com a

mesma espessura auxiliando no alinhamento das amostras na usinagem na EDM. As espessuras das amostras, após a usinagem, foram 4,8 mm e 4,2 mm dos aços AISI 410D e 420A. A Figura 3.5 mostra a retificadora plana tangencial utilizada, localizada no Laboratório de Materiais e Fabricação – LAMAF da Engenharia Mecânica da UFG.

Figura 3.5: Retifica Plana Tangencial.



Fonte: Próprio autor

A retificação das amostras foram realizadas em uma retificadora plana tangencial, do fabricante ATLASMAQ, modelo RPA-800, semiautomática, com potência nominal do motor que aciona o eixo-arvore de 5 CV e rotação constante em 2450 rpm, velocidade de movimento longitudinal da mesa variável de 5 à 25 m/min, velocidade automático do eixo transversal de 0,1 à 3,5 mmcurso e movimentação do eixo vertical de 0,01 mm por divisão.

O rebolo empregado na retificação foi de óxido de alumínio branco (Al_2O_3), que é adequado para aços até 62HRC, com a seguinte especificação: WA46L; do fabricante DEAN ABRASIVE PRODUCTS CORP. Antes da usinagem das amostras foram feitos a prévia dresagem do rebolo. Para isso, foi utilizado um dressador de ponta única de diamante com cone morse 1 do fabricante Rossi.

Durante os experimentos foi utilizado o fluido de corte do tipo solúvel, semi-sintético, estabilizado e leitoso SE-I com diluição de 1:20 em água, do fabricante DIMETIL. O fluido foi aplicado continuamente por meio do sistema de bombeamento original da retificadora.

3.2 Projeto DOE (Planejamento Fatorial Completo)

Para a execução do experimento optou-se pelo planejamento fatorial completo de com quatro fatores a dois níveis. Quatro fatores porque foram quatro as variáveis de entrada consideradas mais importantes para o processo. Foram escolhidos dois níveis, pois, segundo Ribeiro

e Caten (2003), são projetos simples de serem analisados, úteis em estágios iniciais de pesquisa, onde há muitos fatores a serem investigados e que exigem um número relativamente baixo de ensaios. Este projeto do tipo 2^k , onde k é igual a 4, produz dezesseis combinações de fatores, ou seja, 16 ensaios para cada aço. Ainda que sejam recomendadas repetições para a estimação do erro, devido à restrição experimental referente a indisponibilidade de um sistema de medição sensível à pequena variação de tempo entre os ensaios, neste experimento não foram realizadas repetições.

Das quatro variáveis escolhidas para análise, três são as mais comuns em eletroerosão por penetração: corrente elétrica (I_e), tempo de descarga (On) e fenda de trabalho (GAP) (BENEDICT, 1987). A quarta variável escolhida foi o tratamento térmico, amostra sem (-1) ou com (1) tratamento térmico.

Para evitar erros experimentais devido a qualquer variável não controlada, optou-se em utilizar a aleatorização do experimento. Na Tabela 3.2 está indicado a sequência de ensaios utilizando os parâmetros escolhidos.

Tabela 3.2: Sequência de ensaios.

Ordem Ensaio	Amostra	I_e	On	GAP	Tratamento
1	2	8	80	20	-1
2	13	3	80	24	1
3	12	8	150	20	1
4	14	8	80	24	1
5	4	8	150	20	-1
6	9	3	80	20	1
7	16	8	150	24	1
8	1	3	80	20	-1
9	15	3	150	24	1
10	3	3	150	20	-1
11	7	3	150	24	-1
12	8	8	150	24	-1
13	10	8	80	20	1
14	11	3	150	20	1
15	5	3	80	24	-1
16	6	8	80	24	-1

Fonte: Próprio autor

3.3 Medição da perda de massa

Antes e após cada ensaio de usinagem foram medidas as massas dos corpos de prova e do eletrodo de cobre eletrolítico utilizado, visando o cálculo do material consumido de ambos

durante a usinagem. Para eliminar erros sistemáticos durante a etapa de pesagem devido à impregnação do fluido e resíduos sobre a superfície da peça e eletrodo, após o processo de usinagem, para eliminar estes resíduos, foi utilizada uma solução de álcool isopropílico 98% e jato de ar comprimido e secagem com secador térmico.

Para medir a massa do eletrodo e das amostras foi utilizado uma balança de precisão, marca *BEL* modelo MARK S 622, mostrada na Figura 3.6.

Figura 3.6: Balança de precisão.



Fonte Próprio autor

Com a medição da massa inicial e final dos corpos de prova e dos eletrodos utilizados, adquiridos em local adequado para a medição, e conhecidas as devidas densidades do aço inoxidável, de 7,80 g/cm³ (Aço Inox - Especificações Técnicas da Aperam, 2022) e do cobre eletrolítico, de 8,90 g/cm³ (Catálogo – Cobre da Coppermetal, 2022), foi possível calcular o volume de material erodido das amostras e dos eletrodos antes e após a usinagem. Para diminuir a influência dos possíveis erros aleatórios sobre os resultados, foram realizadas 3 repetições para cada medição de massa. A média destas medições equivale à medida utilizada nas análises dos resultados.

Com a obtenção do volume de material removido e do tempo de usinagem foi possível calcular a Taxa de Remoção de Material (TRM), a qual diz respeito à capacidade do processo de remover material, isto é, o quanto de material pode ser removido em uma unidade de tempo. A TRM é dada pela Equação 3.1.

A taxa de remoção de material será dada pela equação:

$$TRM = \frac{\text{Volume de material da peça (mm}^3\text{)}}{\text{tempo de usinagem (min)}} \quad 3.1$$

Semelhante a Equação 3.1, a DE mede a velocidade com que o eletrodo se desgasta e é calculada pela Equação 3.2.

$$DE = \frac{\text{Volume de material do eletrodo (mm}^3\text{)}}{\text{tempo de usinagem (min)}} \quad 3.2$$

3.4 Preparação da máquina

As amostras utilizadas neste trabalho foram usinadas em uma máquina de eletroerosão por penetração marca ELETRO modelo ONC 400. Esta máquina possui um sistema mecânico de guias lineares e esferas recirculantes com curso de trabalho de 400 mm no eixo “X”, 300 mm no eixo “Y” e 255 mm no eixo “Z”, com potência total de 6,5 kVA. Admite uma massa de eletrodo de até 120 kg e de 1000 kg apoiado sobre a mesa. O equipamento conta com acessórios como leitor digital dos eixos, porta eletrodo, sistema orbital e estabilizador de tensão, Eletro (2015), conforme Figura 3.7.

Figura 3.7: EDM por penetração.



Fonte: ELETRO (2015)

Para evitar que a amostra não seja deslocada pelo fluido ou que fixe no eletrodo, foi feito um suporte de fixação. A Figura 3.8 demonstra o suporte.

Figura 3.8: Suporte de fixação da amostra.



Fonte: Próprio autor

Primeiramente foram feitos vários pré-testes para definir os parâmetros a serem utilizados no processo de usinagem por EDM. Os testes foram realizados em amostras dos aços AISI 410D e 420A, nas estruturas ferrítica e martensítica. Foram variados valores de I_e , GAP e O_n , Mantendo D_c constante de 80%, optou-se como final de erosão a profundidade de 1mm. Como referência foram utilizados os parâmetros de pesquisas com aços analisados.

Em relação aos parâmetros de usinagem e com o objetivo de identificar as diferenças de dimensão de *overcut*, taxa de remoção do material, taxa de desgaste do eletrodo e rugosidade, foram empregados os mesmos parâmetros de usinagem tanto para as peças tratadas termicamente bem como para as peças sem tratamento térmico.

A Tabela 3.3 mostra os parâmetros de entrada no planejamento fatorial adotado. Como parâmetro de saída do planejamento fatorial foram utilizadas as rugosidades (R_a e R_t), TRM, DE e o *overcut*.

Tabela 3.3: Parâmetros da EDM.

PARÂMETROS	NÍVEL 1	NÍVEL 2
I_e	3	8
O_n (μs)	80	150
GAP (μm)	20	24
Tratamento térmico	-1 (Sem)	1 (Com)

Fonte: Próprio autor

O eletrodo utilizado foi o de cobre eletrolítico com diâmetro de 10 mm e 35 mm de comprimento, fixado em um suporte de latão com diâmetro de 19 mm e 140 mm de comprimento, conforme Figura 3.9. O referenciamento do eletrodo foi realizado na face da peça e para final de usinagem levou em conta a profundidade da usinagem de 1mm.

Figura 3.9: Eletrodo de cobre eletrolítico.



Fonte: Próprio autor

O sistema de lavagem é realizado por um jato lateral com bico posicionado próximo a fenda de trabalho e pelo sistema de imersão. Amorim (2002) salienta em seus ensaios que esses métodos de lubrificação são suficientes para cavidades rasas e, desta forma, o fluido dielétrico consegue efetuar eficientemente a remoção de excesso de partículas erodidas longe da fenda de trabalho, bem como realizar o arrefecimento adequado. Esse método também mantém algumas partículas dentro da fenda de trabalho de maneira a reduzir o tempo de retardo de ignição da descarga (td).

3.5 Análise da rugosidade

A rugosidade da região erodida foi avaliada utilizando-se um rugosímetro da marca Mitutoyo modelo SJ-201, apresentado na Figura 3.10. Este equipamento pode aplicar filtro digital 2CR, PC75 ou Gaussiano, apresentando valores dos parâmetros de rugosidade Ra (Rugosidade média aritmética) e Rt (Rugosidade total). Sua haste apresenta um deslocamento de 350 μm no eixo Z e de 12,5 mm no eixo X. As velocidades de medição e de avanço são de 0,25 e 0,5 mm/s, respectivamente, e a velocidade de retorno é de 0,8 mm/s; a resolução e a faixa de medição é de 0,4 μm /350 μm , 0,1 μm /100 μm , 0,05 μm /50 μm e 0,01 μm /10 μm ; os valores de *cut-off* podem ser escolhidos dentre 0,25, 0,8 e 2,5 mm; o apalpador tem ponta de diamante com raio de 5 μm , sendo aplicada força de 4 mN (0,4 gf); o método de detecção é indutivo, com saída de dados por comunicação RS-232C para o computador (Mitutoyo, 2016).

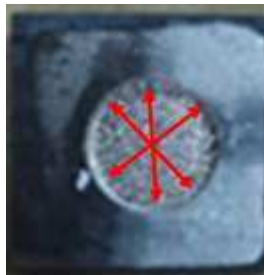
Figura 3.10: Rugosímetro digital modelo SJ-20, Mitutoyo.



Fonte: MITUTOYO (2022)

Foram avaliados tanto a rugosidade média aritmética (R_a) e a rugosidade total (R_t). Antes da análise as amostras foram limpas com álcool isopropílico. Avaliação feita em laboratório climatizado e com umidade controlada, o rugosímetro foi regulado com cutoff de 0,8 mm com três espaços amostrais, sendo efetuadas três medições em direções conforme a Figura 3.11.

Figura 3.11: Direções de aquisição de rugosidade.



Fonte: Próprio autor

3.6 Análise do *overcut*

Para análise de *overcut* foi utilizado um microscópio do fabricante ZEISS, modelo Discovery V8, conforme mostrado na Figura 3.12, com câmera para aquisição de imagem, modelo MR5c.

Figura 3.12: Microscópio ZEISS modelo Discovery V8.



Fonte: ZEISS (2022)

Para a análise do *overcut*, foram realizadas três medições do diâmetro final de cada região usinada, como exemplificado na Figura 3.13. Após a imagem capturada, é possível selecionar vários pontos na figura, onde o *software* interpola aqueles pontos e calcula um círculo

equivalente àqueles pontos selecionados. Neste caso, foram selecionados 10 pontos na imagem para que fosse gerado o círculo e identificado o raio equivalente da zona erodida da amostra.

Figura 3.13: Medição raio na superfície erodida.



Fonte: Próprio autor

O *overcut* é expresso como metade da diferença do diâmetro do furo produzido ao diâmetro da ferramenta, conforme Equação 3.3.

$$Overcut = \frac{d_c - d_f}{2} (mm) \quad 3.3$$

onde d_f é o diâmetro da ferramenta e d_c é o diâmetro equivalente da cavidade produzida pela ferramenta na peça.

3.7 Análise microestrutural superficial

Na análise da microestrutura foi utilizado um microscópio óptico do fabricante ZEISS, modelo AXIO Imager 2, conforme mostrado na Figura 3.14, com câmera para aquisição de imagem, modelo MR5c.

Figura 3.14: Microscópio motorizado ZEISS AXIO Imager 2



Fonte: MITUTOYO (2022)

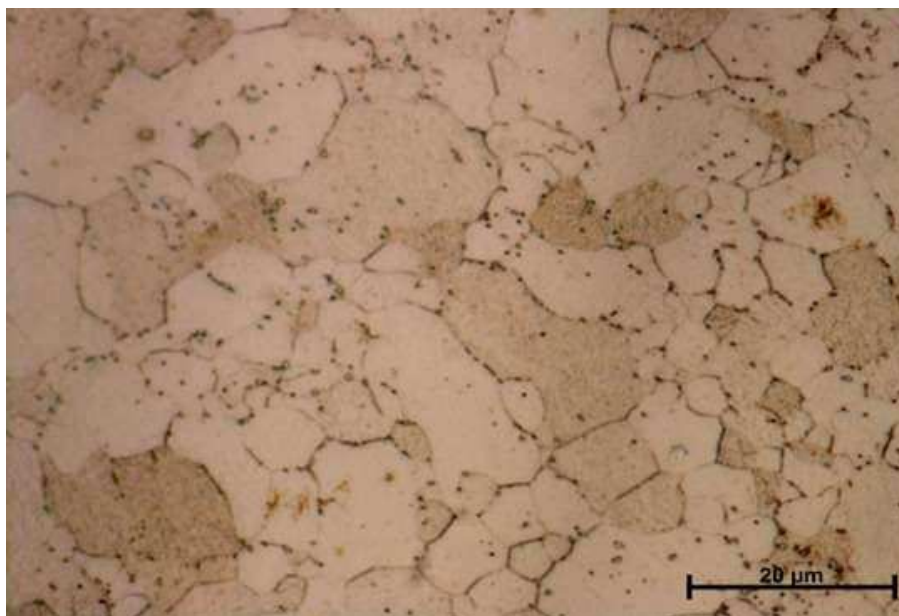
Para avaliar a microestrutura das amostras dos aços AISI 410D e 420A, temperadas e como recebidas, foram feitas a preparação metalográfica de: lixamento com lixas de granulometrias 80, 120, 220, 400, 600, 1200 e 2000 Mesh, lubrificadas por água, e o polimento feito com suspensão de diamante de 1μ sobre pano de polimento. A cada troca de lixa e pano de polimento, foi realizada a limpeza das amostras com álcool isopropílico a fim de remover impurezas e contaminações. Todas as etapas preparatórias foram realizadas de forma manual em lixadeira e politriz metalográfica.

As amostras foram examinadas na seção longitudinal à direção de laminação, ao longo e transversal da superfície retificada. O ataque químico foi feito com o reagente Vilela por cerca de 40 segundos e cerca de 15 segundos nos aços AISI 410D e 420A respectivamente.

3.7.1 Caracterização da amostra

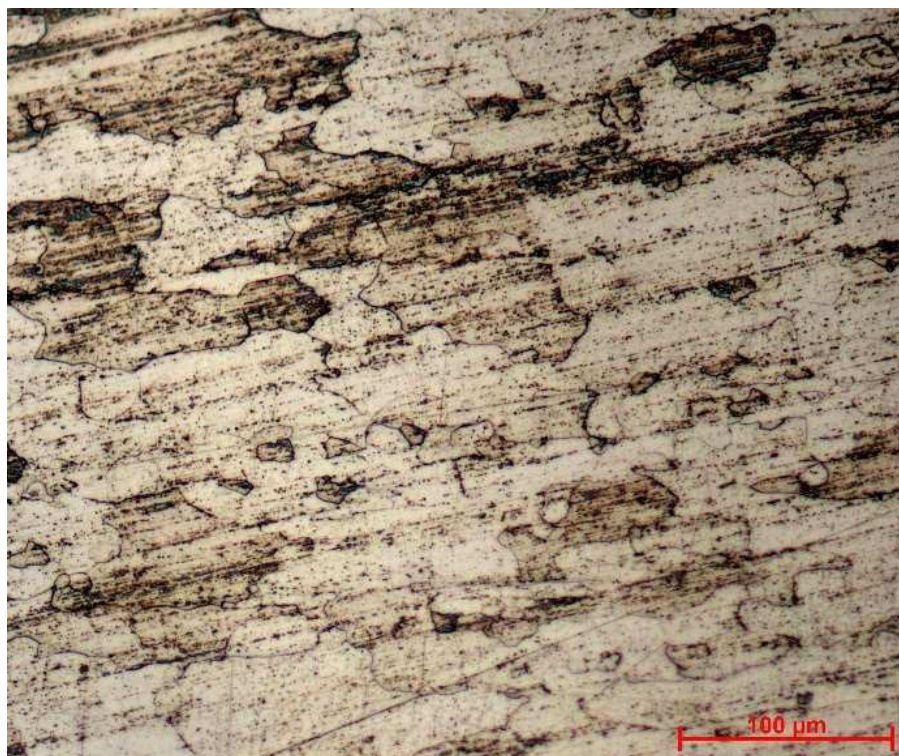
A Figura 3.15 apresenta a microestrutura da amostra, da superfície retificada e a Figura 3.17 da transversal, do aço AISI 410D como recebida, observa-se uma microestrutura majoritariamente ferrítica com precipitados de carboneto de cromo do tipo $Cr_{23}C_6$. As microestruturas observadas estão de acordo com o esperado para o processo de fabricação de um aço inoxidável ferrítico laminado a quente e recozido.

Figura 3.15: Imagem MO do aço 410D como recebido



Fonte: Próprio autor

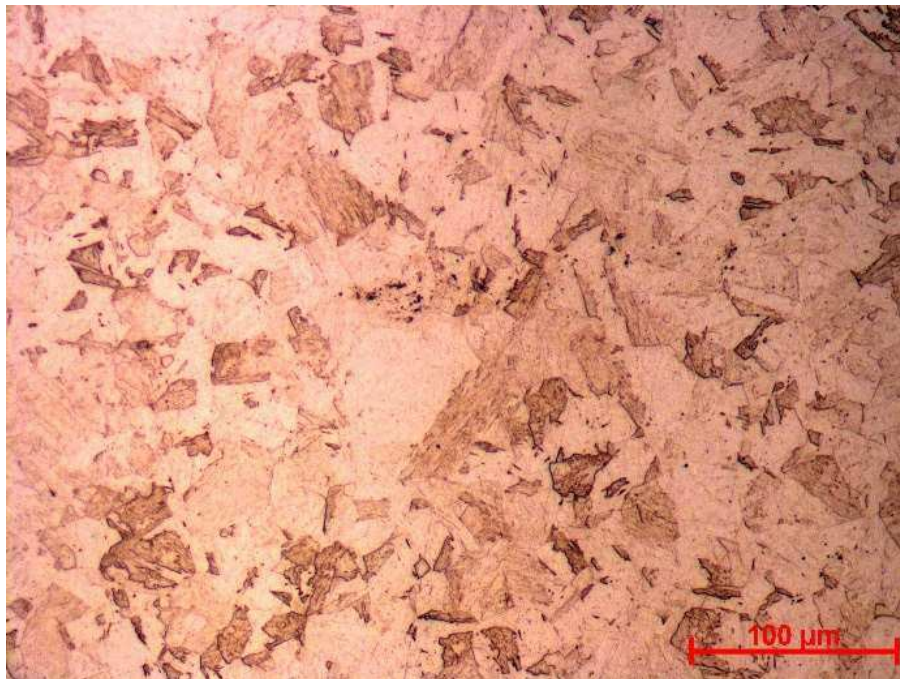
Figura 3.16: Imagem MO do aço 410D recebido transversal.



Fonte: Próprio autor

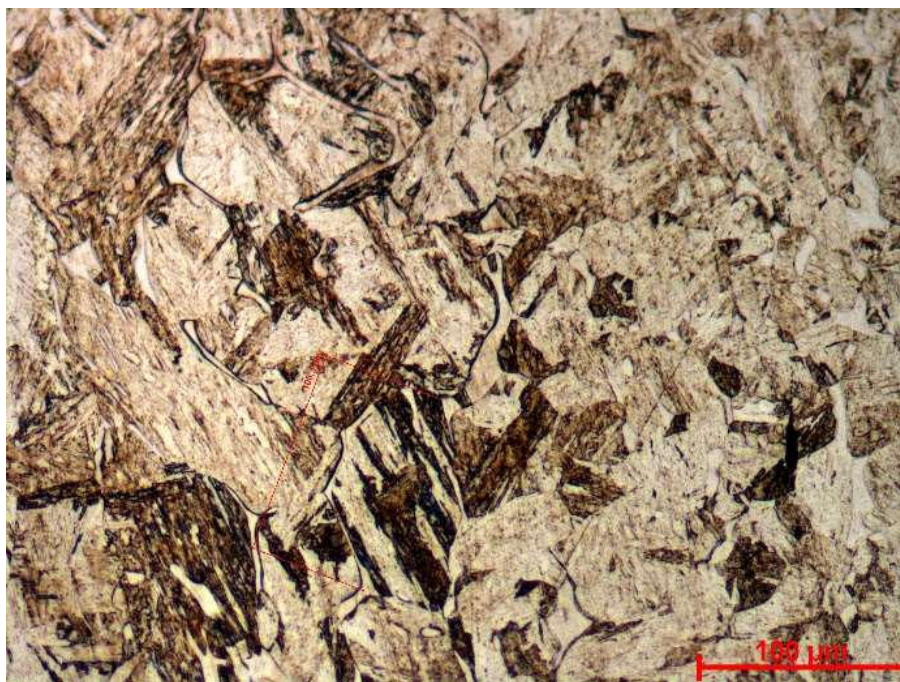
A Figura 3.17 apresenta a microestrutura da amostra, da superfície retificada e a Figura 3.18 da transversal, do aço AISI 410D, obtida da amostra temperada onde apresenta a microestrutura predominantemente martensítica, o que está de acordo com o esperado, uma vez que a temperatura de austenitização adotada nesse tratamento térmico é superior à temperatura de austenitização final do aço (NUNES, 2020; ARRUDA, 2019; VILELA, 2019).

Figura 3.17: Imagem MO do aço 410D temperado



Fonte: Próprio autor

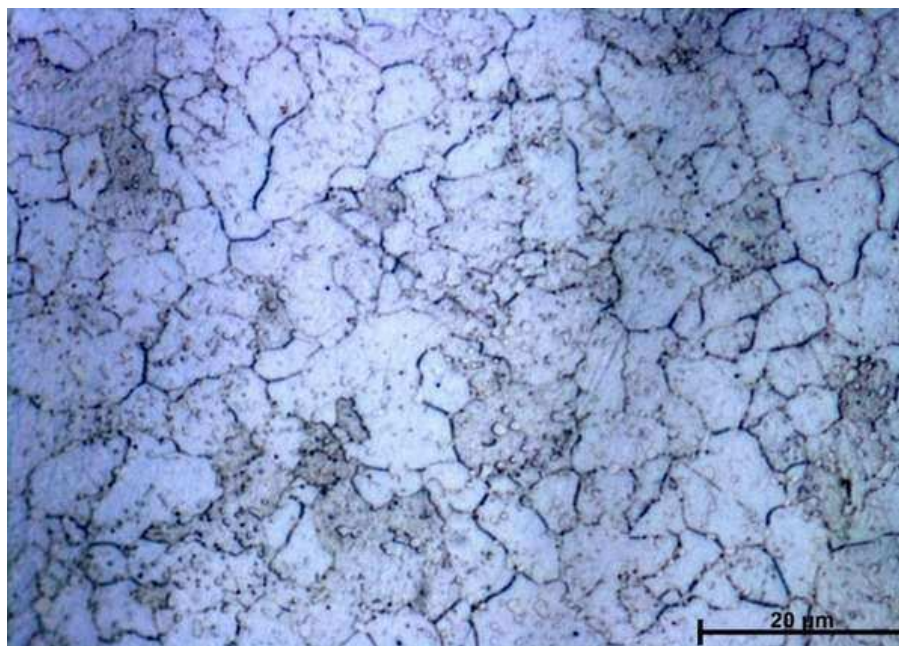
Figura 3.18: Imagem MO do aço 410D temperado transversal.



Fonte: Próprio autor

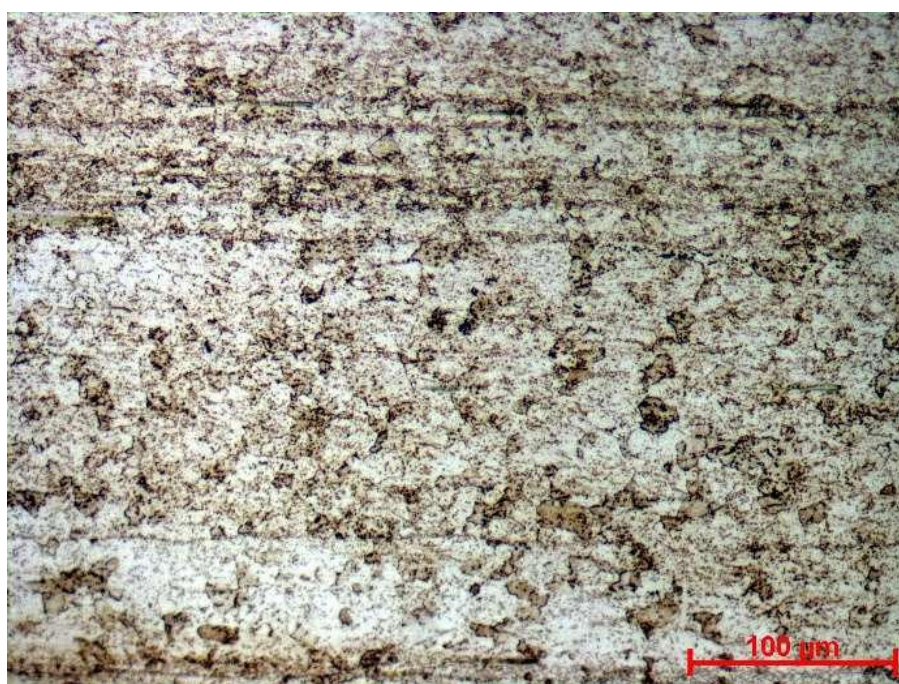
A Figura 3.19 apresenta a microestrutura da amostra, da superfície retificada e a Figura 3.20 da transversal, do aço AISI 420A, obtida da amostra como recebida onde a microestrutura é constituída de fase ferrítica com a presença de carbonetos esferoidizados dispersos, do tipo carboneto de cromo do tipo Cr_{23}C_6 nesta matriz.

Figura 3.19: Imagem MO do aço 420A como recebido.



Fonte: Próprio autor

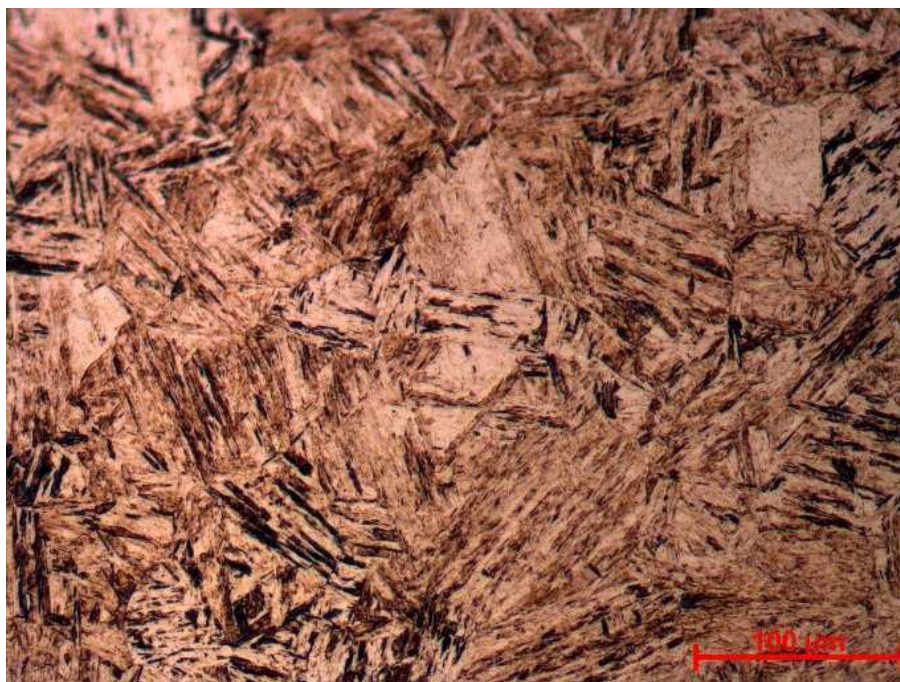
Figura 3.20: Imagem MO do aço 420A recebido transversal.



Fonte: Próprio autor

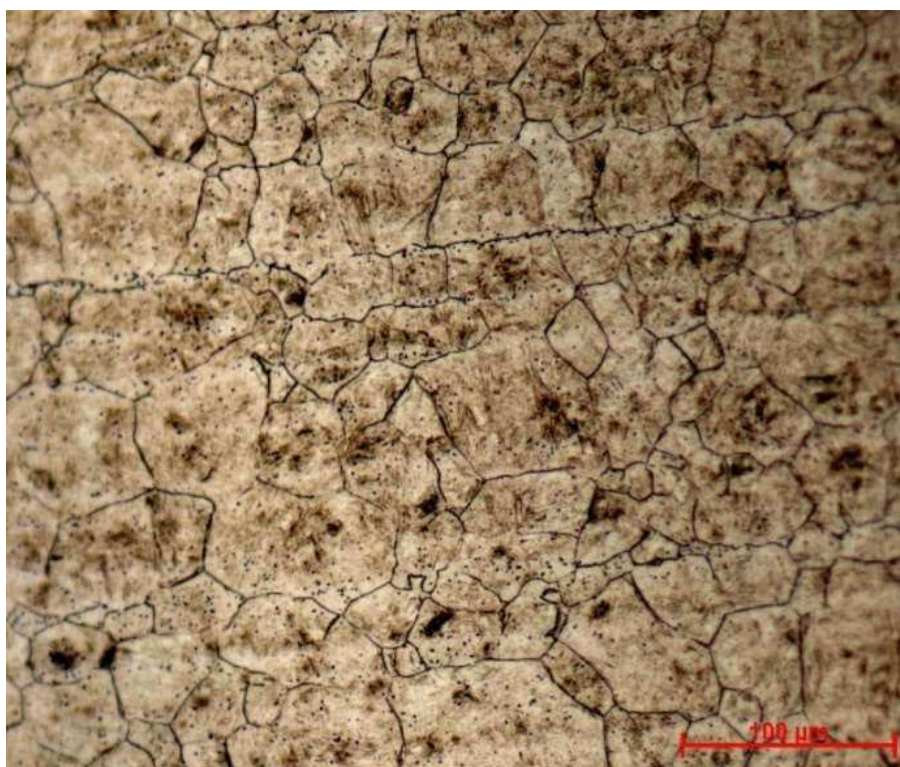
A Figura 3.21 apresenta a microestrutura da amostra, da superfície retificada, do aço AISI 420A, obtida da amostra temperada onde apresenta a microestrutura martensítica do tipo em ripas e a Figura 3.22, da transversal à superfície retificada, apresenta uma fase martensítica com contornos de grãos austeníticos prévios.

Figura 3.21: Imagem MO do aço 420A temperado



Fonte: Próprio autor

Figura 3.22: Imagem MO do aço 420A temperado transversal.



Fonte: Próprio autor

3.8 Análise de dureza

Para a análise da dureza foi utilizado o durômetro Vickers da marca Mitutoyo modelo HV-100, conforme exemplificado na Figura 3.23.

Figura 3.23: Durômetro Vickers HV-110.



Fonte: MITUTOYO (2022)

Para determinar a dureza média, antes da eletroerosão foram realizadas cinco medições aleatórias na superfície de cada amostra. Para a dureza na escala Vickers (HV) foi aplicada uma carga de 5kgf durante o tempo de 20s.

Para evidenciar os efeitos da eletroerosão na microestrutura das amostras, durante a usinagem, optou-se por cortar as amostras na cortadora, com disco diamantado e refrigerado com o fluido de corte do tipo solúvel, semi-sintético, estabilizado e leitoso SE-I com diluição de 1:20 em água, do fabricante DIMETIL. As amostras foram embutidas em resina sintética (baquelite) em uma embutidora a quente. Em seguida, foi realizado o lixamento, polimento, ataque com reativo Vilella, análise da microestrutura e dureza, na seção transversal à direção erodida. Para a dureza HV foi aplicada uma carga de 1kgf e o tempo de 10s.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Retirada de Material

A Tabela 4.1 exibe os valores da TRM obtidos como resultado para cada ensaio dos experimentos com o aço AISI 410D, que apresenta valores entre 12,66 mm³/min e 54,68 mm³/min.

Tabela 4.1: TRM aço AISI 410D.

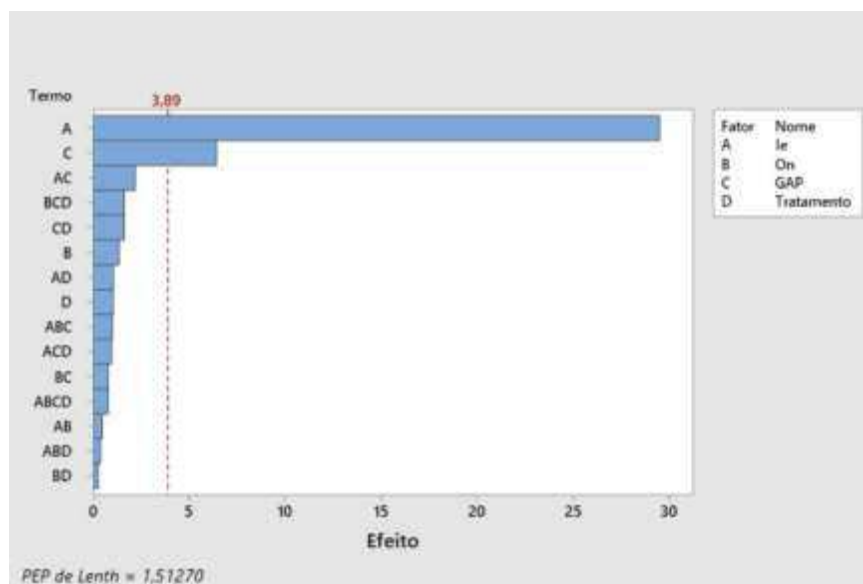
Amostra	TRM (mm ³ /min)
1	47,66
2	13,56
3	48,74
4	43,62
5	46,31
6	23,44
7	46,15
8	21,33
9	12,66
10	22,16
11	13,14
12	44,06
13	54,68
14	21,30
15	14,38
16	46,64

Fonte: Próprio autor

Após a obtenção dos dados experimentais, os resultados foram avaliados estatisticamente. A Figura 4.1 mostra o gráfico de Pareto dos efeitos padronizados dos fatores avaliados

na TRM do AISI 410D, onde indica que a I_e e o GAP tiveram efeitos estatisticamente significativos sobre a TRM, pois foram os que ultrapassam a linha vertical tracejada no valor de 3,89 para um nível de confiança de 99,5%.

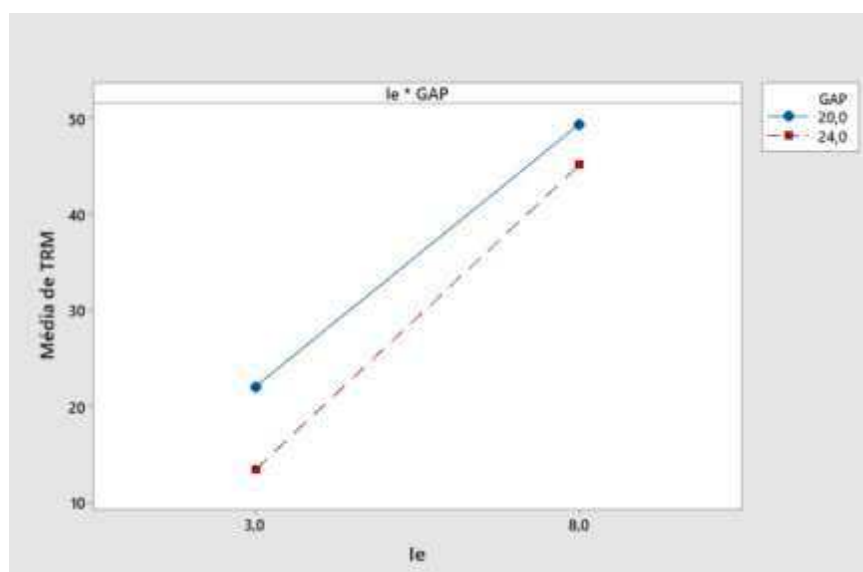
Figura 4.1: Gráfico de Pareto dos Efeitos na TRM do AISI 410D.



Fonte: Próprio autor

A Figura 4.2 mostra o efeito das interações entre os parâmetros I_e *GAP a taxa de remoção nos ensaios com o aço AISI 410D, pode-se perceber que com a adoção da I_e de 8 em conjunto com um GAP de 20 fornece os melhores resultados, pois promoveu um maior TRM que pretende-se seja majorado.

Figura 4.2: Gráfico da Interação I_e *GAP para a TRM (mm^3/min) - AISI 410D.



Fonte: Próprio autor

A Tabela 4.2 exibe os valores da TRM obtidos como resultado para cada ensaio dos experimentos com o aço AISI 420A, que apresenta valores entre 13,87 mm³/min e 51,44 mm³/min.

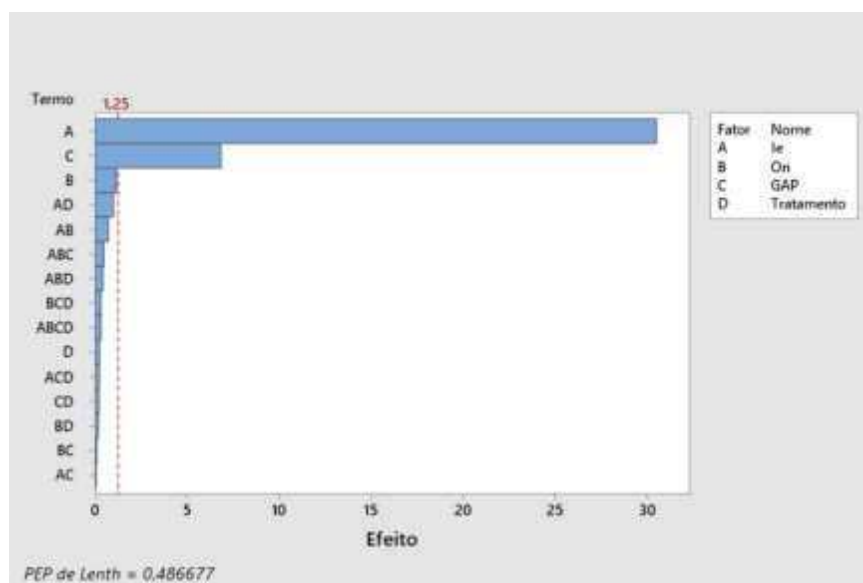
Tabela 4.2: TRM aço AISI 420A.

Amostra	TRM (mm ³ /min)
1	51,44
2	15,24
3	49,62
4	42,40
5	50,81
6	21,65
7	43,50
8	20,27
9	12,32
10	19,39
11	12,22
12	44,32
13	51,06
14	19,46
15	13,87
16	45,05

Fonte: Próprio autor

A Figura 4.3 mostra o gráfico de Pareto dos efeitos padronizados dos fatores avaliados na TRM do AISI 420A, que indica a *Ie* e o GAP tiveram efeitos estatisticamente significativos sobre a TRM.

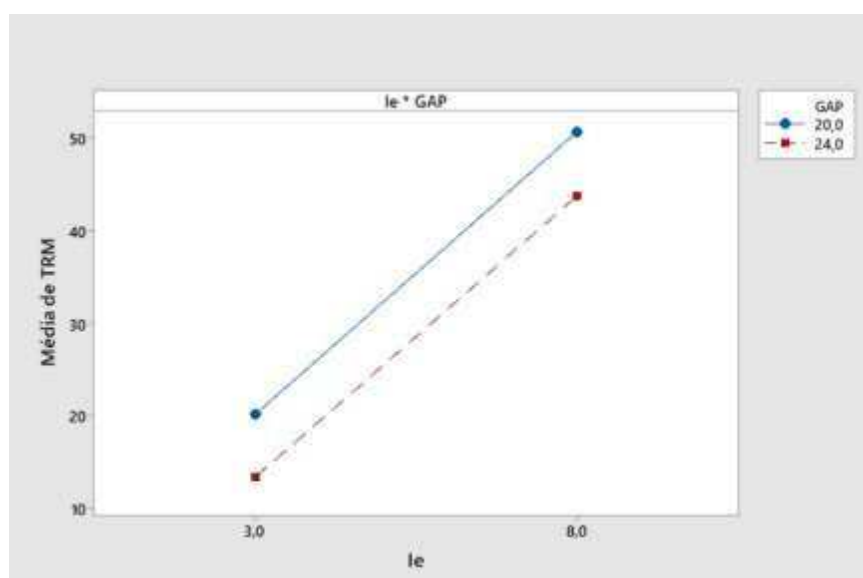
Figura 4.3: Gráfico de Pareto dos Efeitos na TRM do AISI 420A.



Fonte: Próprio autor

A Figura 4.4 mostra o efeito das interações entre os parâmetros Ie*GAP a taxa de remoção nos ensaios com o aço AISI 420A, pode-se perceber que, como aconteceu no AISI 410D, com a adoção da Ie de 8 em conjunto com um GAP de 20 fornece os melhores valores.

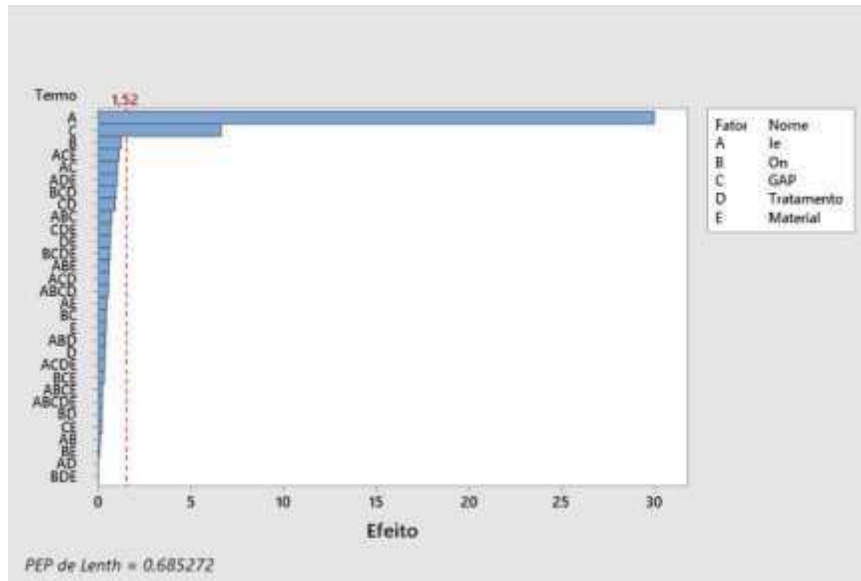
Figura 4.4: Gráfico da Interação Ie*GAP para a TRM (mm³/min) - AISI 420A.



Fonte: Próprio autor

A Figura 4.5 mostra o gráfico de Pareto dos efeitos padronizados dos fatores avaliados na TRM do AISI 410D x 420A, onde demonstra que o tipo de material não influencia estatisticamente na TRM.

Figura 4.5: Gráfico de Pareto dos Efeitos na TRM do AISI 410D x 420A.



Fonte: Próprio autor

Segundo Roy, et al., (2015), não existe padrão definido da quantidade de material removido da peça. Diversos parâmetros operacionais podem influenciar a TRM, destacando-se a intensidade de corrente, tamanho da fenda de trabalho, o que dificulta o estabelecimento de padrões para comparação.

Carlini (2018) explica o fenômeno da maior remoção das condições em CuW foi o aumento da corrente e é o fator de maior significância para o aumento do volume removido.

Como no estudo de Ferreira (2017), Santos (2007) e Rosseto (2022) o efeito da corrente na usinagem EDM foi o fator que mais afetou a taxa de remoção de material já que a intensidade da corrente é diretamente proporcional a quantidade de energia na fenda de trabalho, ocasionando uma maior temperatura e um maior material fundido da peça na região usinada, com isso o Ie foi o fator que mais influenciou a TRM na usinagem dos aços AISI 410D e 420A.

Bragança, et al., (2014) mostra a necessidade de um controle muito otimizado do gap na usinagem onde se produzem descargas normais sem alterar a morfologia e o volume de remoção de material. O GAP irá determinar a distância entre o eletrodo e a peça, sendo que maior GAP colaboram com o processo de lavagem e estabilidade da energia na fenda de trabalho (ROSSETO, 2022), o que explica a influência do GAP na maior quantidade de material retirado.

A Tabela 4.3 exibe os valores do DE obtidos como resultado para cada ensaio dos experimentos com o aço AISI 410D, que apresenta valores, onde não houve desgaste até 9,04 mm³/min.

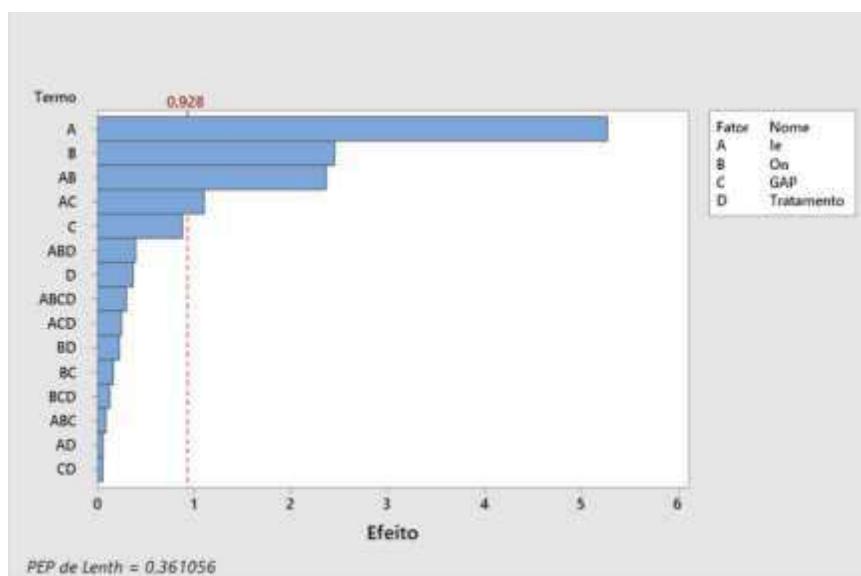
Tabela 4.3: DE aço AISI 410D.

Amostra	DE (mm ³ /min)
1	7,33
2	0,00
3	2,67
4	9,04
5	1,38
6	0,96
7	4,49
8	0,00
9	0,17
10	0,00
11	0,17
12	3,68
13	6,50
14	0,28
15	0,00
16	8,61

Fonte: Próprio autor

A Figura 4.6 mostra o gráfico de Pareto dos efeitos padronizados dos fatores avaliados na DE do AISI 410D, onde indica que a *Ie* e *On* e as interações *Ie*On* e *Ie*GAP* tiveram efeitos estatisticamente significativos sobre a DE. Porém o fator mais relevante é a *Ie*.

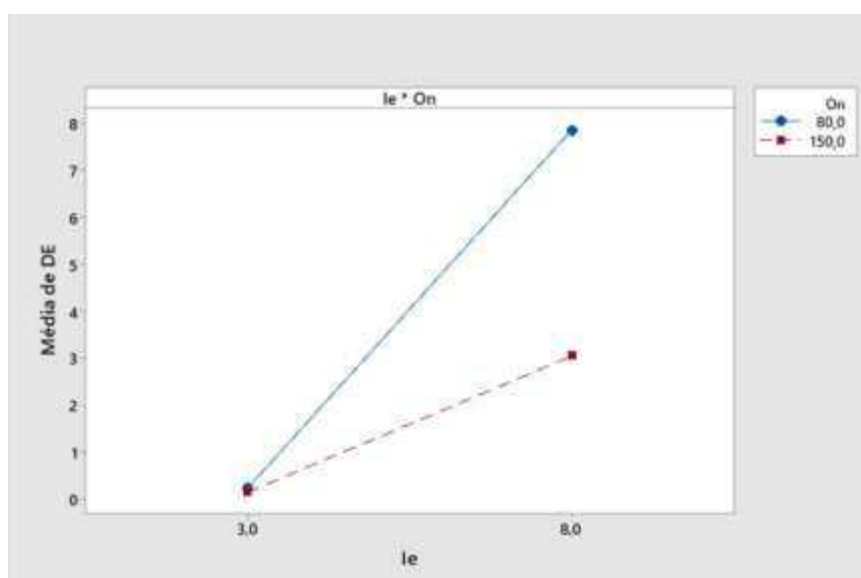
Figura 4.6: Gráfico de Pareto dos Efeitos na DE do AISI 410D.



Fonte: Próprio autor

A Figura 4.7 mostra o efeito das interações entre os parâmetros Ie*On o DE nos ensaios com o aço AISI 410D, percebe-se que com a adoção da Ie de 3 com qualquer um dos GAP utilizados obteve os melhores resultados em relação à DE, para que seu valor seja minorado.

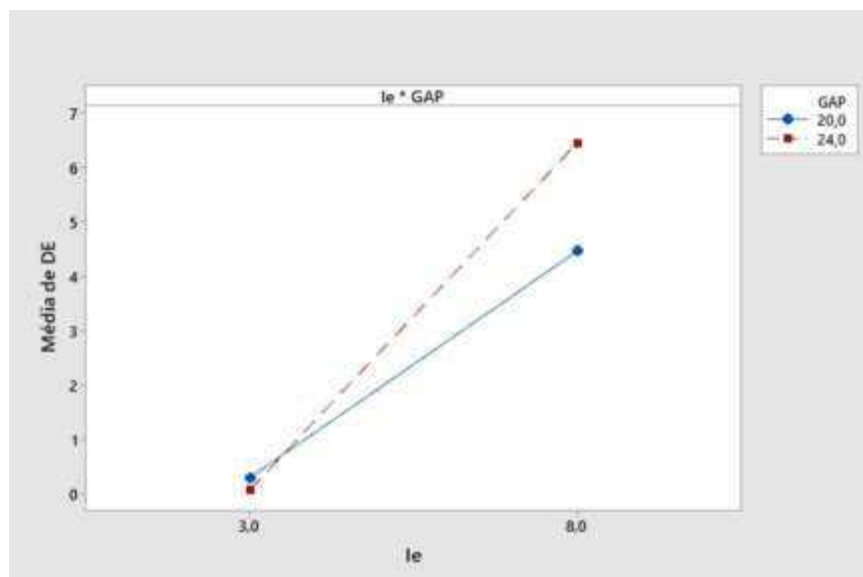
Figura 4.7: Gráfico da Interação Ie*On para a DE (mm^3/min) - AISI 410D.



Fonte: Próprio autor

A Figura 4.8 mostra o efeito das interações entre os parâmetros Ie*GAP o DE nos ensaios com o aço AISI 410D, perceber-se que com a adoção da Ie de 3 com o GAP de 24 obteve-se os melhores resultados em relação à DE.

Figura 4.8: Gráfico da Interação $I_e \times GAP$ para a DE (mm^3/min) - AISI 410D.

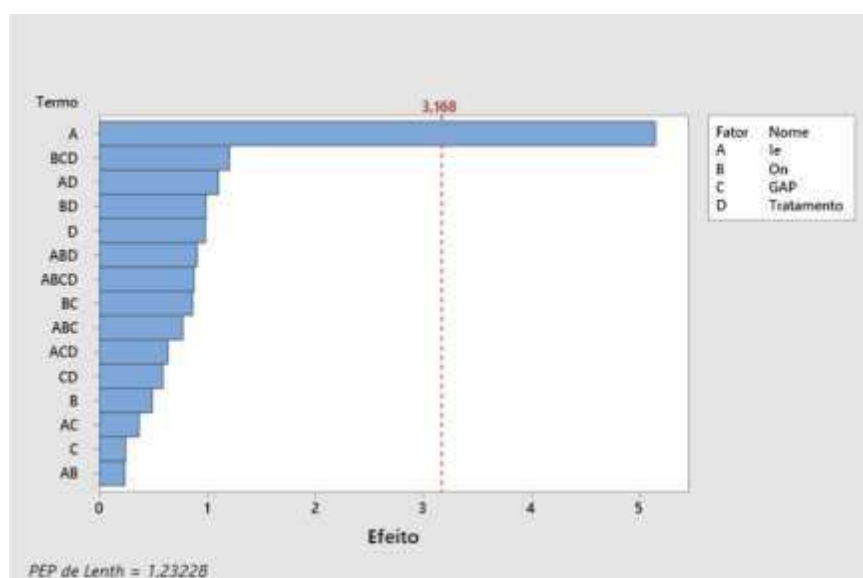


Fonte: Próprio autor

A Tabela 4.4 exibe os valores do DE obtidos como resultado para cada ensaio dos experimentos com o aço AISI 420A, que apresenta valores, onde não houve desgaste até $9,82 \text{ mm}^3/\text{min}$.

A Figura 4.9 mostra o gráfico de Pareto dos efeitos padronizados dos fatores avaliados na DE do AISI 420A. O gráfico de Pareto indica que somente a I_e teve efeito estatisticamente significativo sobre a DE.

Figura 4.9: Gráfico de Pareto dos Efeitos na DE do AISI 420A.



Fonte: Próprio autor

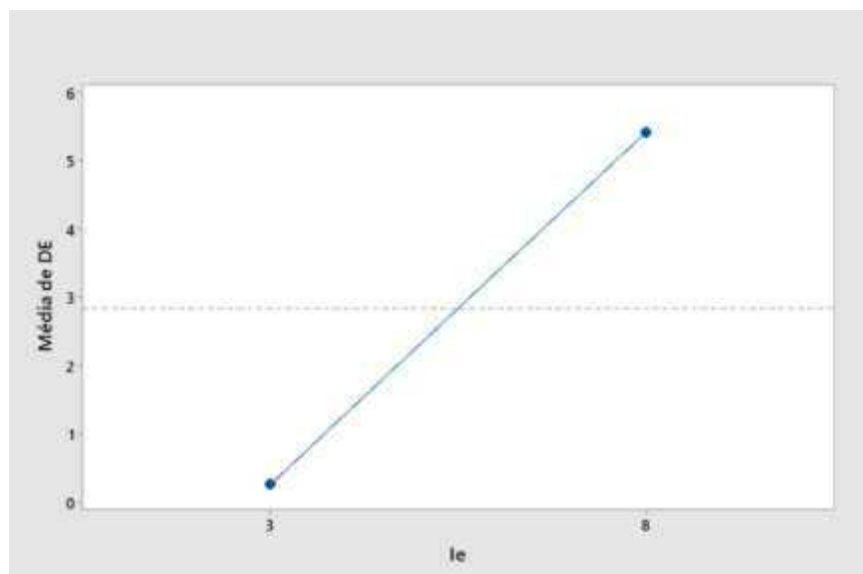
Tabela 4.4: DE aço AISI 420A.

Amostra	DE (mm ³ /min)
1	4,93
2	0,42
3	2,52
4	5,77
5	9,82
6	0,57
7	3,57
8	0,00
9	0,31
10	0,24
11	0,00
12	4,25
13	5,59
14	0,0
15	0,59
16	6,81

Fonte: Próprio autor

A Figura 4.10 mostra o efeito do parâmetro I_e no DE nos ensaios com o aço AISI 420A, perceber-se que I_e de 3 fornece os melhores resultados em relação à DE.

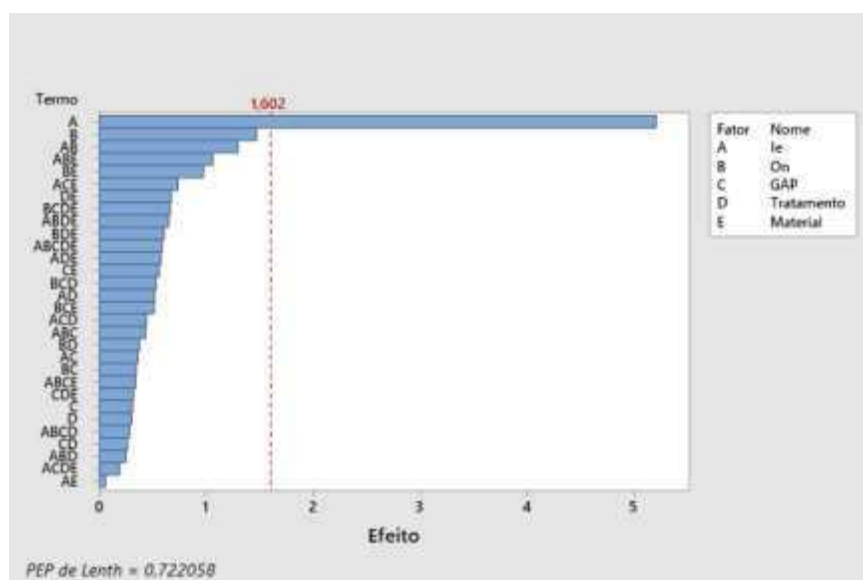
Figura 4.10: Gráfico de efeitos principais da I_e para a DE (mm^3/min) - AISI 420A.



Fonte: Próprio autor

A Figura 4.11 mostra o gráfico de Pareto dos efeitos padronizados dos fatores avaliados no DE do AISI 410D x 420A, onde demonstra que o material não teve influência estatística no DE.

Figura 4.11: Gráfico de Pareto dos Efeitos na DE do AISI 410D x 420A.



Fonte: Próprio autor

Pode-se concluir que o aumento na corrente provocou um aumento do DE como esperado. Isto está de acordo com Golapalakannan e Senthilelan (2014) que discutem a taxa de desgaste relativo do eletrodo, pode ser verificado que aumentando a corrente ouve um aumento

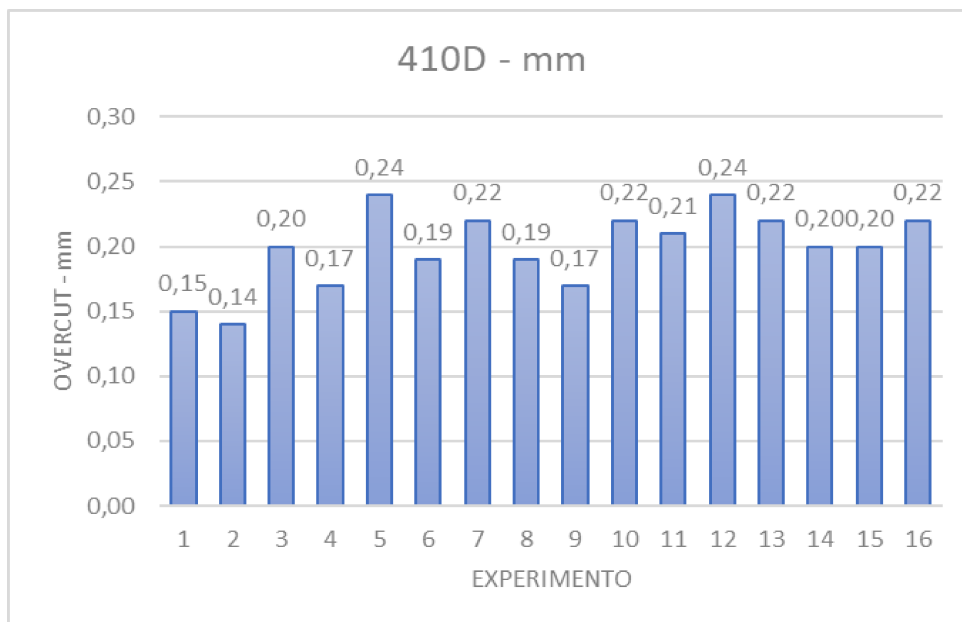
no desgaste do eletrodo, graças a maior energia empregada nas descargas elétricas e, portanto, maior quantidade de material fundido na região da fenda.

Kubade, et al. (2012) e Kumar, et al. (2020) observaram que o fator de corrente de pico e o tempo de pulso teve maior contribuição na taxa de desgaste do eletrodo na usinagem do aço de alto carbono e cromo (AISI D3), como a quantidade de cromo é semelhante, dos aços trabalhados, indica como a I_e e o O_n afetaram o desgaste do eletrodo.

4.2 Overcut

A Figura 4.12 exibe os valores do *overcut* obtidos como resultado para cada ensaio dos experimentos com o aço AISI 410D, que apresenta valores médios entre 0,14 mm e 0,24 mm.

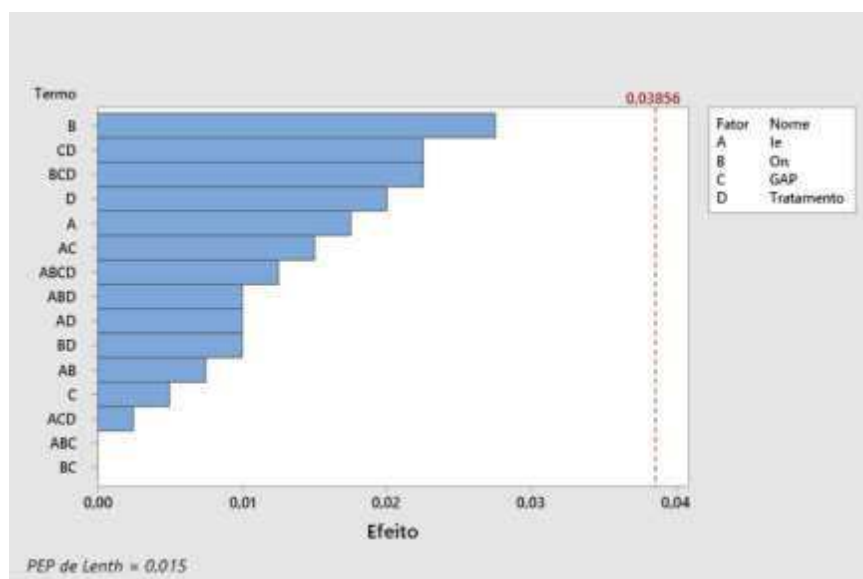
Figura 4.12: Valores *Overcut* AISI 410D.



Fonte: Próprio autor

A Figura 4.13 mostra o gráfico de Pareto dos efeitos padronizados dos fatores avaliados no *overcut* do AISI 410D, onde indica que não houve nenhum fator que teve efeito estatisticamente significativo sobre o *overcut*, para que seu valor seja minorado.

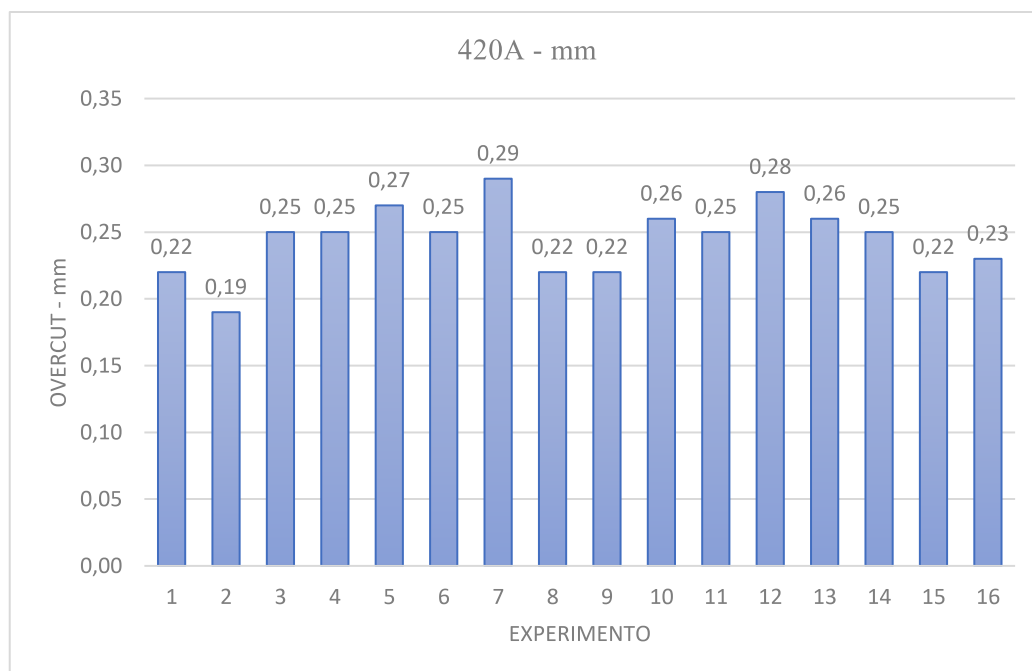
Figura 4.13: Gráfico de Pareto dos Efeitos no *overcut* do AISI 410D.



Fonte: Próprio autor

A Figura 4.14 exibe os valores do *overcut* obtidos como resultado para cada ensaio dos experimentos com o aço AISI 420A, que apresenta valores médios entre 0,19 mm e 0,29 mm.

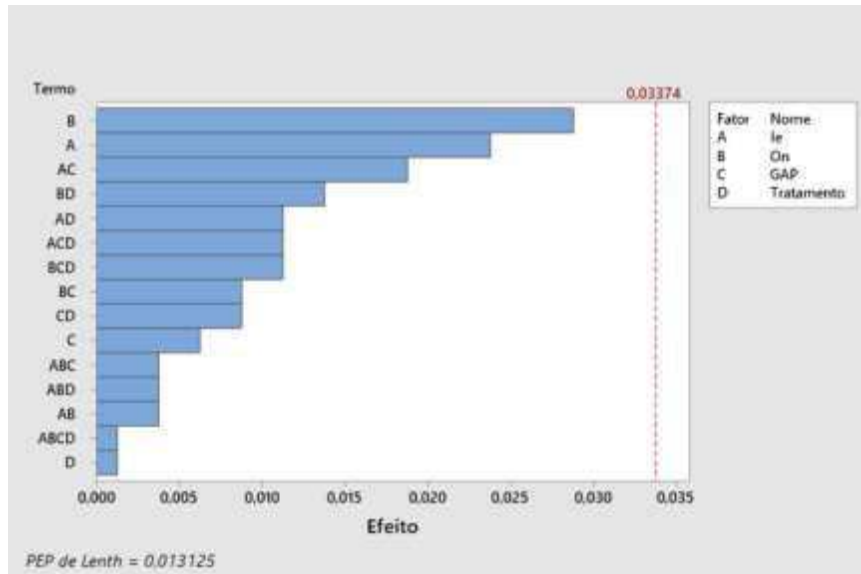
Figura 4.14: Valores *Overcut* AISI 420A.



Fonte: Próprio autor

A Figura 4.15 mostra o gráfico de Pareto dos efeitos padronizados dos fatores avaliados no *overcut* do AISI 420A, como aconteceu no AISI 40D, não houve nenhum fator que teve efeito estatisticamente significativo sobre o *overcut*.

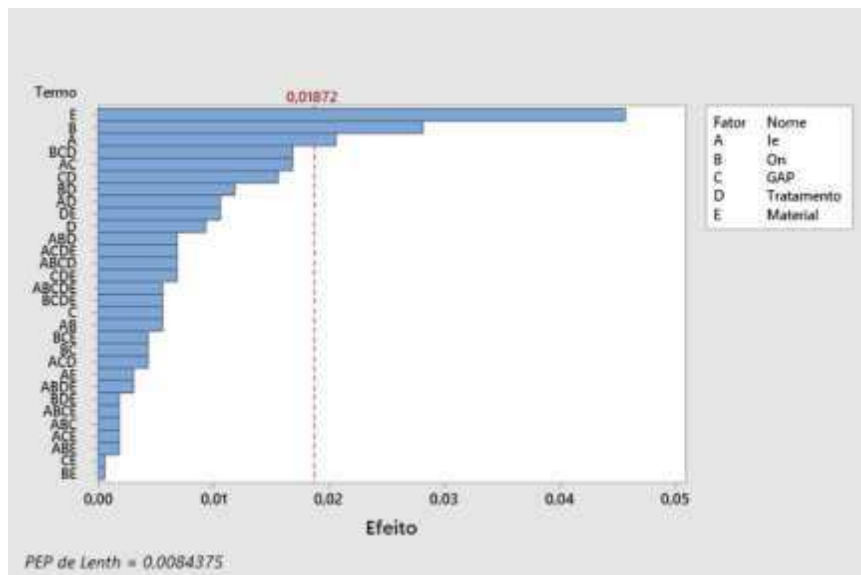
Figura 4.15: Gráfico de Pareto dos Efeitos no *overcut* do AISI 420A.



Fonte: Próprio autor

A Figura 4.16 mostra o gráfico de Pareto dos efeitos padronizados dos fatores avaliados no *overcut* do AISI 410D x 420A, o que demonstra que o material tem influência estatisticamente no *overcut*.

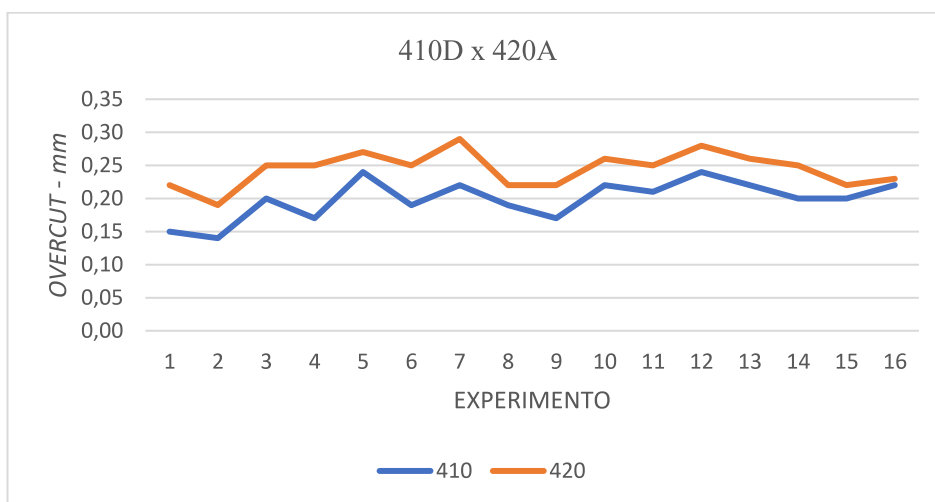
Figura 4.16: Gráfico de Pareto dos Efeitos na *overcut* do AISI 410D x 420A.



Fonte: Próprio autor

A Figura 4.17 mostra o gráfico de comparação para *overcut*. A diferenciação do material teve grande influência, no que vai de acordo com o trabalho de Santos (2007), sobre a influência do tipo de material e do tratamento térmico da peça, a composição química e a quantidade de carbono e cromo influenciaram na quantidade de material retirado na usinagem.

Figura 4.17: Comparação do *overcut* do AISI 410D x 420A.



Fonte: Próprio autor

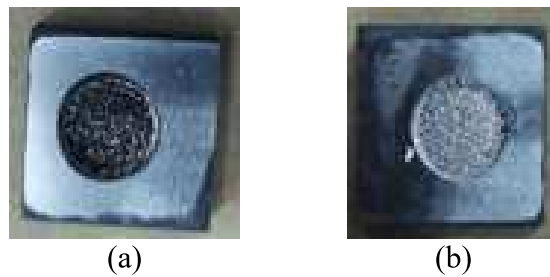
Segundo Teimouri (2012), onde foi estudado o desgaste e o *overcut* no processo EDM com ferramenta rotativa e ficou constatado que, com o aumento da energia de descarga, o *overcut* aumenta devido ao alto valor da transferência de energia térmica para a zona de usinagem. Este fenômeno leva à fusão e vaporização de mais material da superfície da peça de trabalho aumentando o diâmetro da área usinada e quando aumenta o tempo do período de um ciclo ocasiona uma quantidade grande de energia ocasionando o aumento da fenda erodida, o que explica que o I_e e o O_n têm efeito no *overcut* (AMORIM, 2002).

Apesar de esses dois materiais serem da mesma família de aços inoxidáveis, eles possuem elementos de liga em quantidades diferentes. Essa diferença nas composições químicas irá influenciar de forma decisiva nos fatores que interferem na eletroerosão como: calor específico, condutibilidade térmica e temperatura de ebulição, além da resistência de evaporação e fusão dos materiais, desgaste do eletrodo e na rugosidade (SANTOS, 2007), porém nos ensaios destes dois materiais a influência foi maior, estatisticamente, no *overcut*.

4.3 Rugosidade superficial

Após a usinagem a superfície gerada apresentou uma certa quantidade de resíduo do processo de erosão, para eliminar parcialmente esse resíduo, foi utilizada uma solução de álcool isopropílico e jato de ar comprimido. A Figura 4.18, fazendo uso de uma amostra de aço inoxidável 420A, exemplifica da amostra usinada após o processo de limpeza, (a) amostra com o resíduo e (b) amostra sem o resíduo.

Figura 4.18: Amostra usinadas.

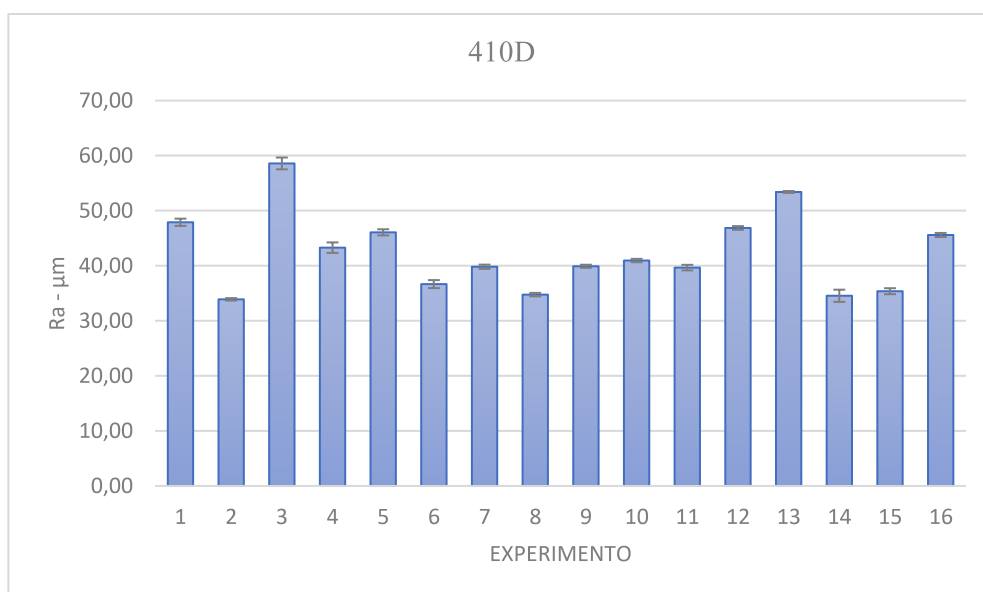


Fonte: Próprio autor

4.3.1 Rugosidade média aritmética Ra

A Figura 4.19 exibe a médias dos valores da Ra obtidos como resultado para cada ensaio dos experimentos com o aço AISI 410D, que apresenta valores médios entre $5,93 \pm 0,31 \mu\text{m}$ e $10,01 \pm 1,07 \mu\text{m}$.

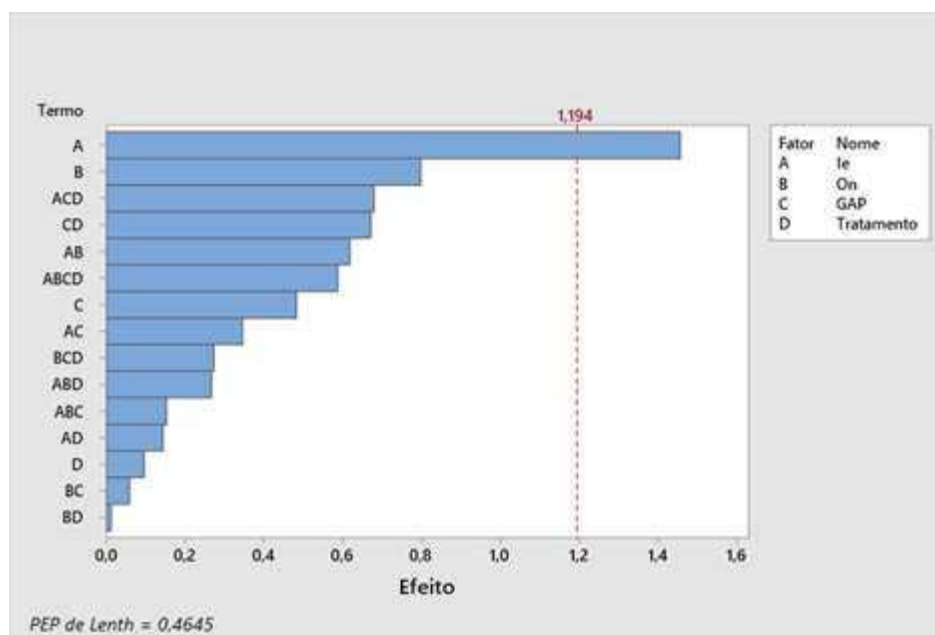
Figura 4.19: Valores Ra AISI 410D.



Fonte: Próprio autor

A Figura 4.20 mostra o gráfico de Pareto dos efeitos padronizados dos fatores avaliados para Ra do AISI 410D, demonstra que somente *Ie* teve efeito estatisticamente significativo sobre a Ra, para que seu valor seja minorado.

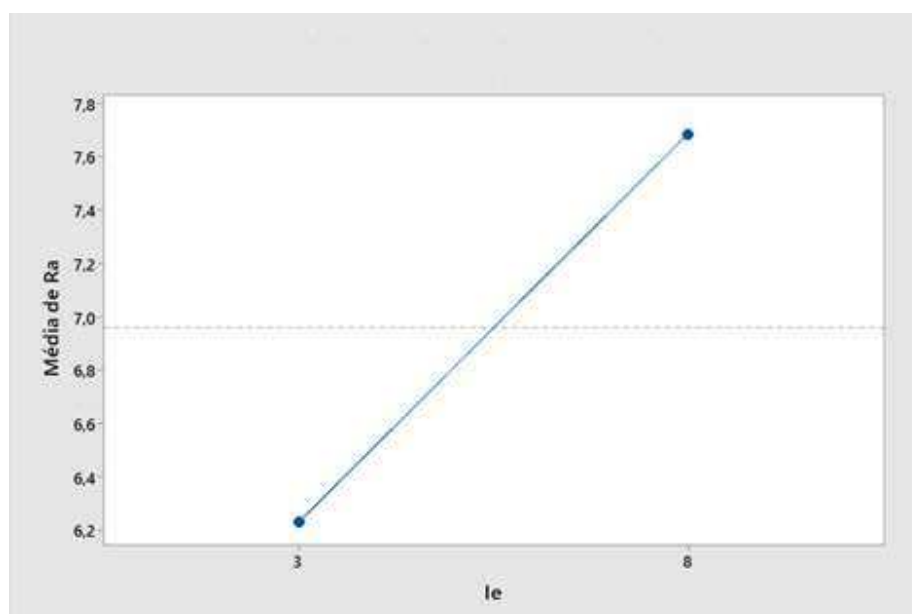
Figura 4.20: Gráfico de Pareto dos Efeitos na Ra do AISI 410D.



Fonte: Próprio autor

A Figura 4.21 mostra o efeito do parâmetro le na Ra nos ensaios com o aço AISI 410D. Pode-se perceber que le de 3 fornece os melhores resultados em relação à Ra, pois promoveu uma menor valor de Ra.

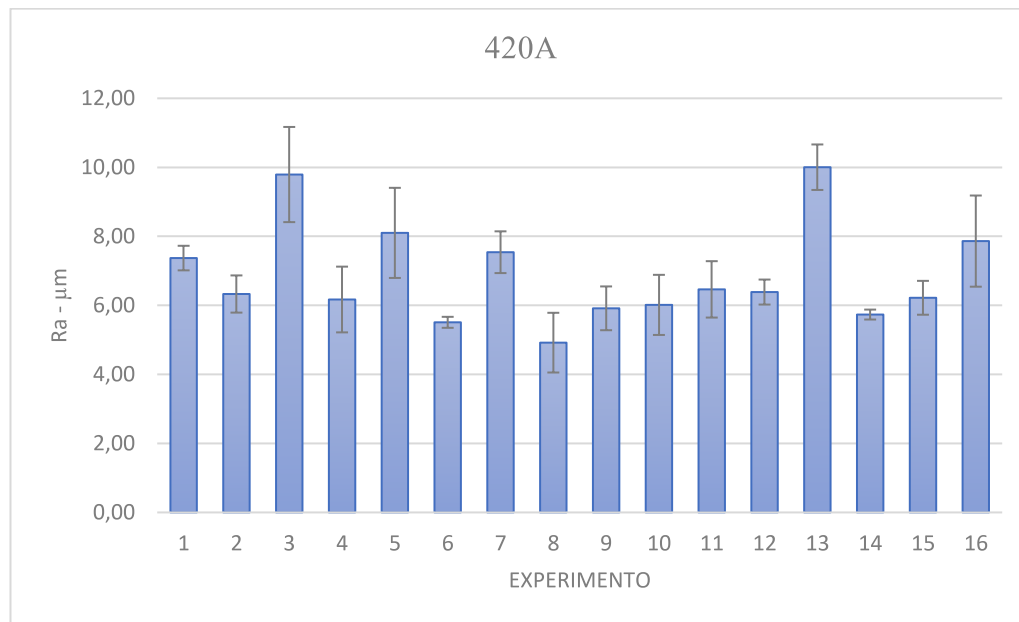
Figura 4.21: Gráfico da Interação le para a Ra (μm) - AISI 410D.



Fonte: Próprio autor

A Figura 4.22 exibe a médias dos valores da Ra obtidos como resultado para cada ensaio dos experimentos com o aço AISI 420A, que apresenta valores médios entre $4,92 \pm 0,86 \mu\text{m}$ e $10,00 \pm 0,65 \mu\text{m}$.

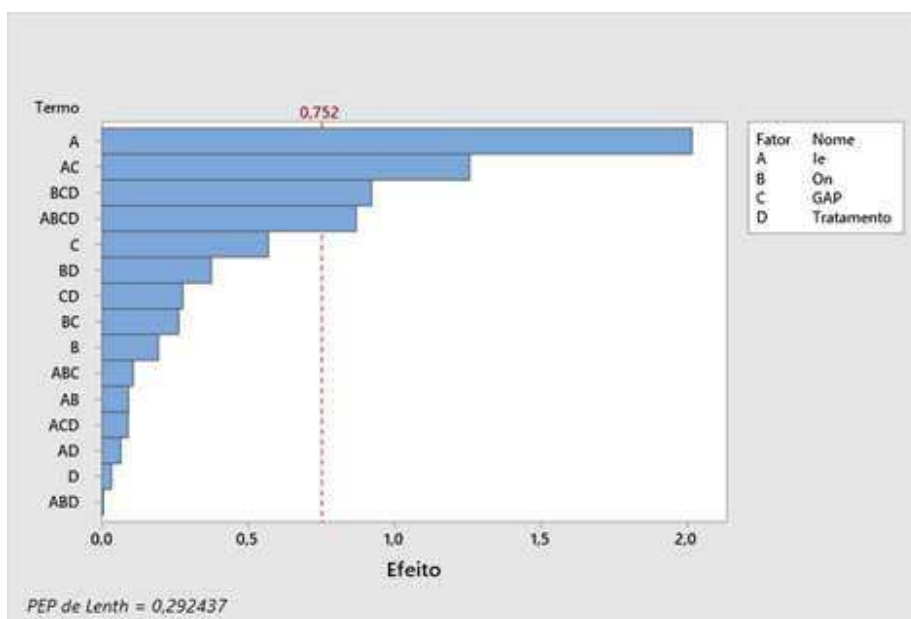
Figura 4.22: Valores Ra AISI 420A.



Fonte: Próprio autor

A Figura 4.23 mostra o gráfico de Pareto dos efeitos padronizados dos fatores avaliados para Ra do AISI 420A, onde indica que o I_e teve maior efeito estatisticamente significativo sobre a Ra, e que a interação, até segundo nível, $I_e \cdot GAP$ também teve influência estatisticamente na Ra.

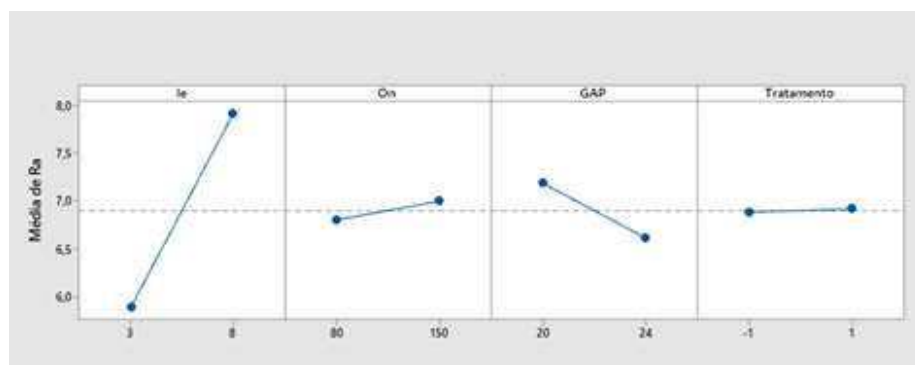
Figura 4.23: Gráfico de Pareto dos Efeitos na Ra do AISI 420A.



Fonte: Próprio autor

A Figura 4.24 mostra os efeitos dos parâmetros na Ra nos ensaios com o aço AISI 420A, perceber-se que além da I_e , o GAP também tem influência nos resultados em relação a Ra, motivo pelo qual a relação I_e *GAP tem efeito estatisticamente significativo no resultado da Ra.

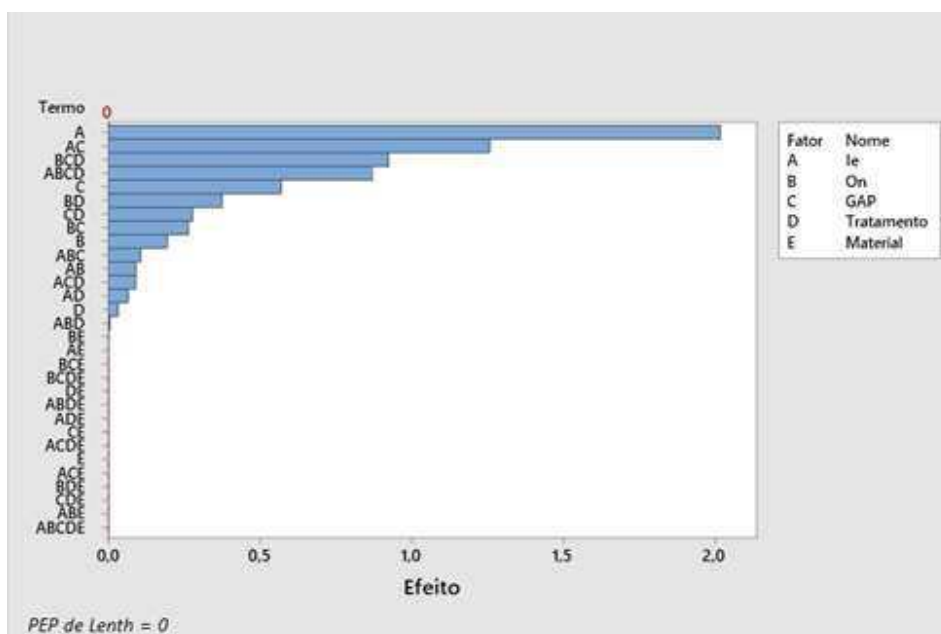
Figura 4.24: Gráfico da Interação I_e para a Ra (μm) - AISI 420D.



Fonte: Próprio autor

A Figura 4.25 mostra o gráfico de Pareto dos efeitos padronizados dos fatores avaliados na Ra do AISI 410D x 420A. O gráfico de Pareto demonstra que o material não influenciou estatisticamente na Ra.

Figura 4.25: Gráfico de Pareto dos Efeitos na Ra do AISI 410D x 420A.



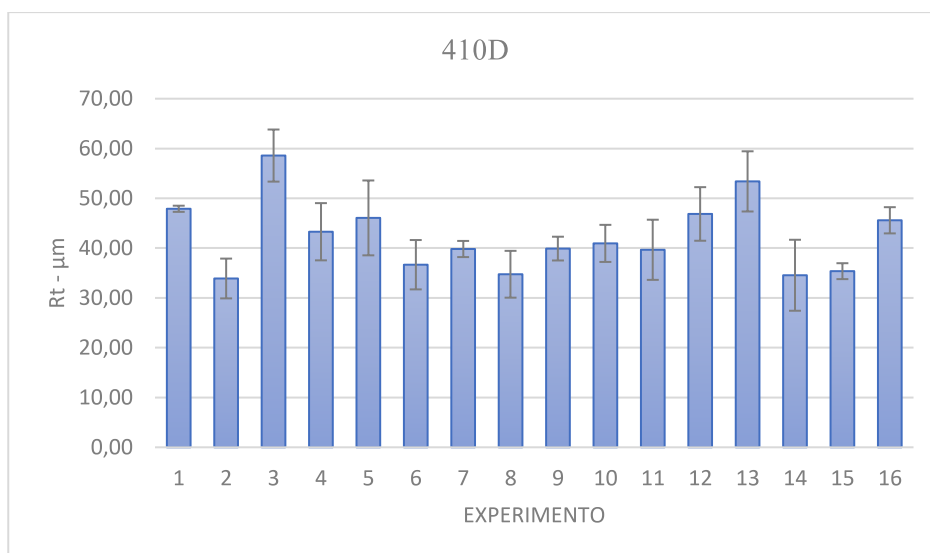
Fonte: Próprio autor

O parâmetro I_e foi o que mais influenciou o parâmetro de rugosidade Ra, isto está de acordo com o estudo realizado por Gostimirovic, et. al. (2011), onde conclui-se que aumento da energia das descargas elétricas produz regiões de maiores crateras na superfície usinada, e portanto, maior rugosidade superficial.

4.3.2 Rugosidade média aritmética Rt

A Figura 4.26 exibe a médias dos valores de Rt obtidos como resultado para cada ensaio dos experimentos com o aço AISI 410D, que apresenta valores médios entre $33,89 \pm 3,99 \mu\text{m}$ e $58,58 \pm 5,23 \mu\text{m}$.

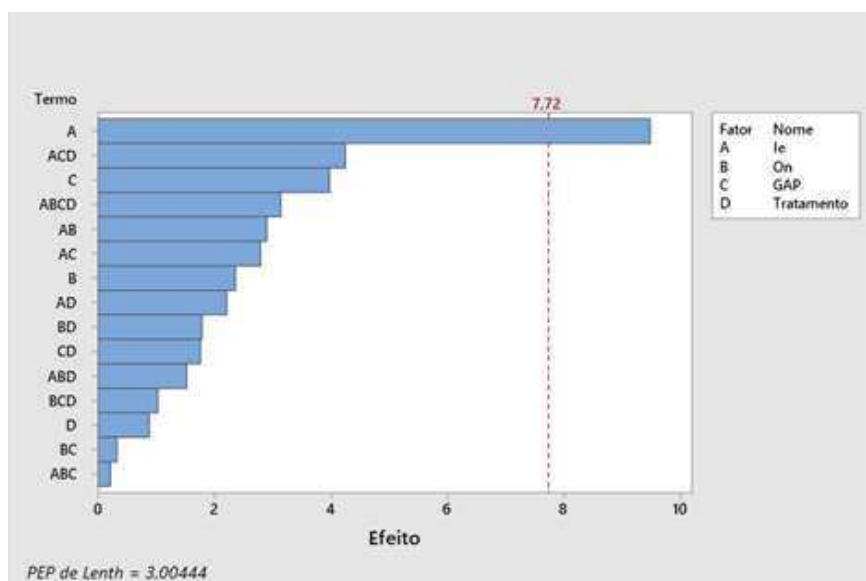
Figura 4.26: Valores Rt AISI 410D.



Fonte: Próprio autor

A Figura 4.27 mostra o gráfico de Pareto dos efeitos padronizados dos fatores avaliados na Rt do AISI 410D, demonstra que somente Ie teve efeito estatisticamente significativo sobre a Rt.

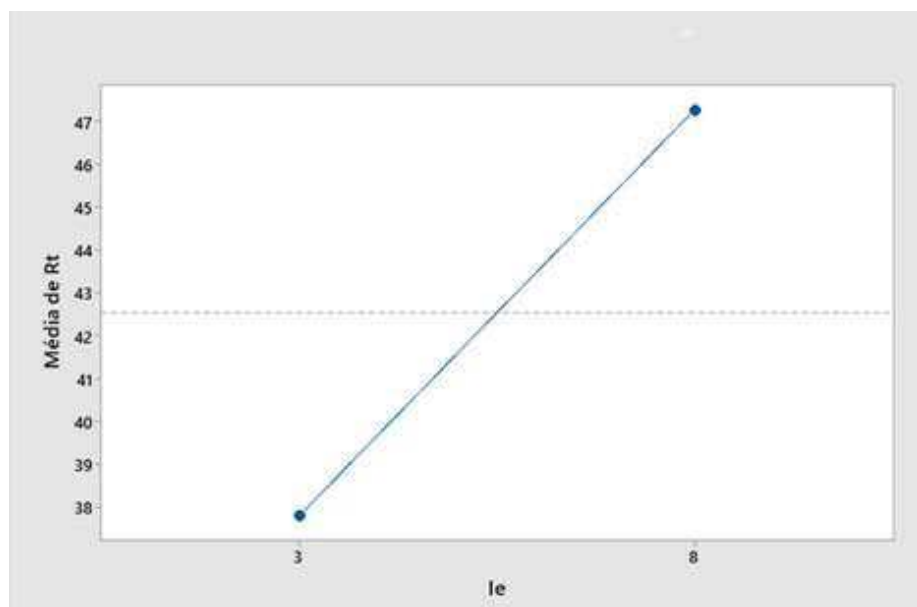
Figura 4.27: Gráfico de Pareto dos Efeitos no parâmetro de rugosidade Rt do AISI 410D.



Fonte: Próprio autor

A Figura 4.28 mostra o efeito do parâmetro I_e em R_t nos ensaios com o aço AISI 410D, pode-se perceber que I_e de 3 fornece os melhores resultados em relação à R_t , pois promoveu um menor valor de R_t .

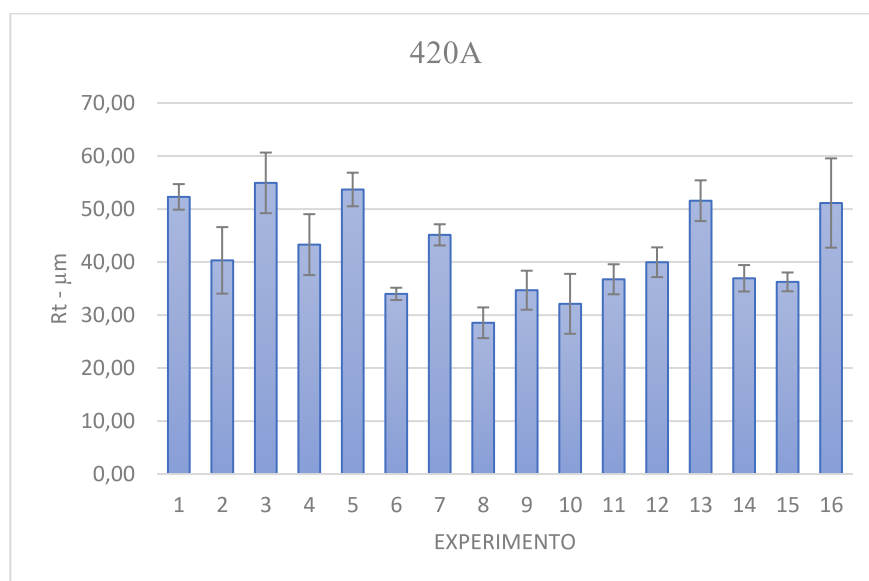
Figura 4.28: Gráfico da Interação I_e para a R_t (μm) - AISI 410D.



Fonte: Próprio autor

A Figura 4.29 exibe as médias dos valores de R_t obtidos como resultado para cada ensaio dos experimentos com o aço AISI 420A, que apresenta valores médios entre $28,53 \pm 2,89 \mu\text{m}$ e $54,93 \pm 5,71 \mu\text{m}$.

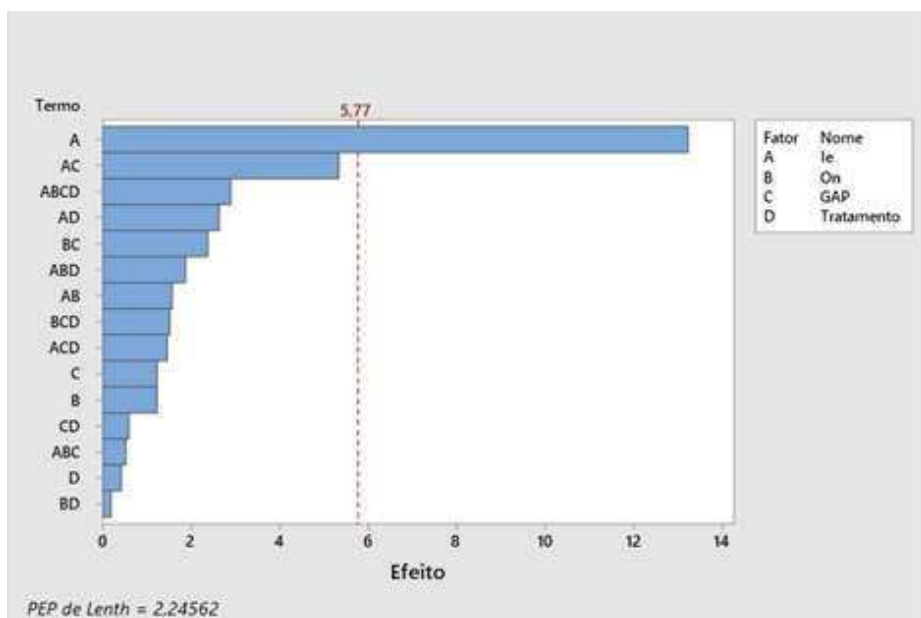
Figura 4.29: Valores R_t AISI 420A.



Fonte: Próprio autor

A Figura 4.30 mostra o gráfico de Pareto dos efeitos padronizados dos fatores avaliados na R_t do AISI 420A, apresenta que somente I_e teve efeito estatisticamente significativo sobre a R_t .

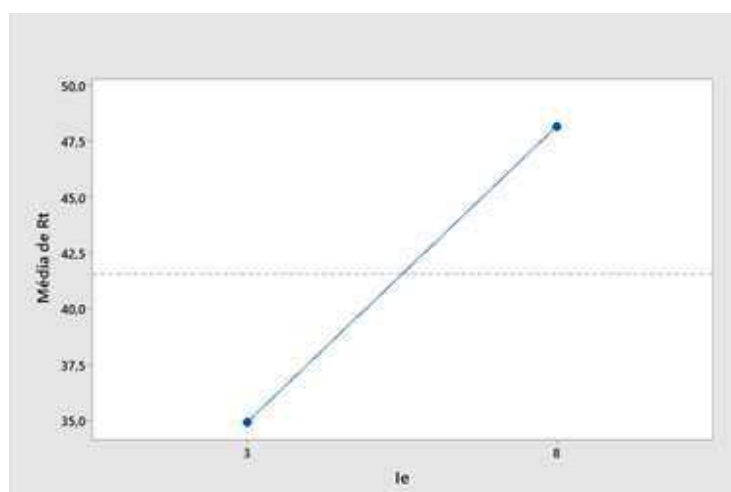
Figura 4.30: Gráfico de Pareto dos Efeitos na R_t do AISI 420A.



Fonte: Próprio autor

A Figura 4.31 mostra o efeito do parâmetro I_e para R_t nos ensaios com o aço AISI 420A, perceber-se que I_e de 3 são obtidos os melhores resultados estatisticamente em relação à R_t .

Figura 4.31: Gráfico da Interação I_e para a R_t (μm) - AISI 420A.



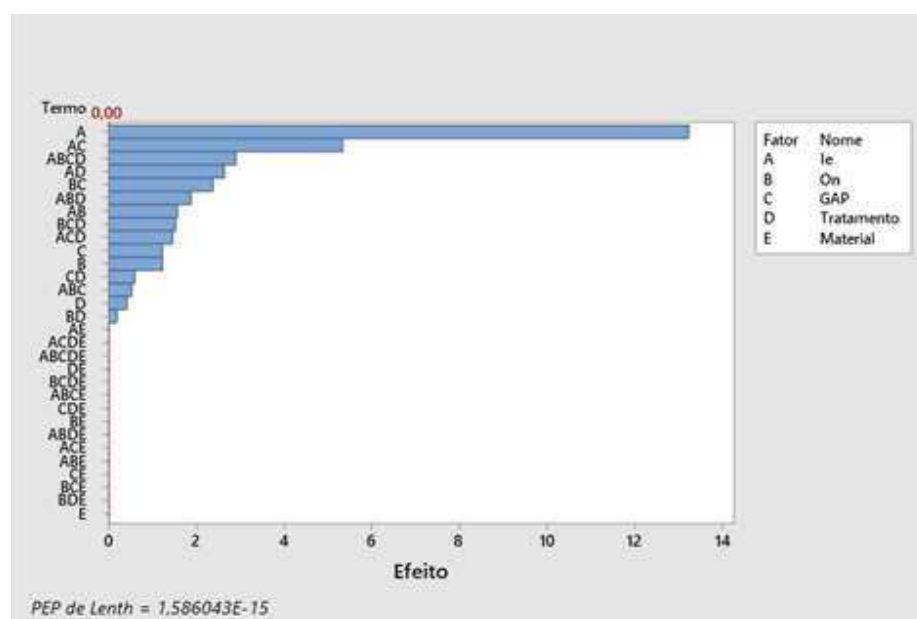
Fonte: Próprio autor

O I_e é o fator mais significativo na rugosidade R_t , que está de acordo com o estudo de Sabbo (2017), que no seu estudo foi verificado que o grau da rugosidade depende da quantidade

de energia utilizada durante a descarga elétrica, o que aumenta a profundidade e largura da cratera usinada, e a ampliação do I_e está intrinsecamente relacionado ao nível de energia fornecida ao processo.

A Figura 4.32 mostra o gráfico de Pareto dos efeitos padronizados dos fatores avaliados na R_t do AISI 410D x 420A. O gráfico de Pareto demonstra que o sobre o material não influencia a R_t .

Figura 4.32: Gráfico de Pareto dos Efeitos para R_t do AISI 410D x 420A.



Fonte: Próprio autor

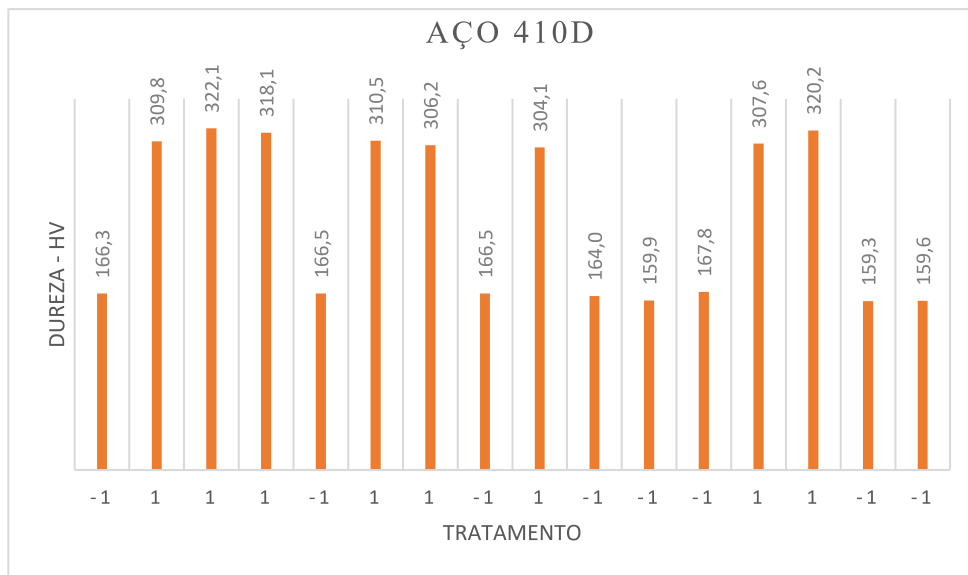
A influência do I_e na qualidade superficial também foi estudando por Santos (2007) no processo de eletroerosão nos aços AISI H13 e AISI D6, onde afirma que a corrente de descarga consumida no processo de eletroerosão é um parâmetro de extrema importância no rendimento e na qualidade da peça confeccionada, onde a corrente é a principal fator que afeta a energia durante a eletroerosão.

Também o aumento da rugosidade com o aumento de tempo de descarga era previsível. Um maior tempo de energia dissipada forma crateras com raio maior, o que reflete diretamente na rugosidade (IRAPUAN, 2010). Contudo pela análise das Figura 4.27 e Figura 4.30, percebem-se indicativos de que a rugosidade R_a e R_t cresce com o aumento do I_e , o que é coerente com a formação de crateras maiores devido à maior energia empregada, porém o On não teve influência estatisticamente nas rugosidades.

4.4 Análise da dureza superficial

A Figura 4.33 exibe a médias dos valores da dureza longitudinal à laminação obtidos como resultado nas amostras do aço AISI 410D.

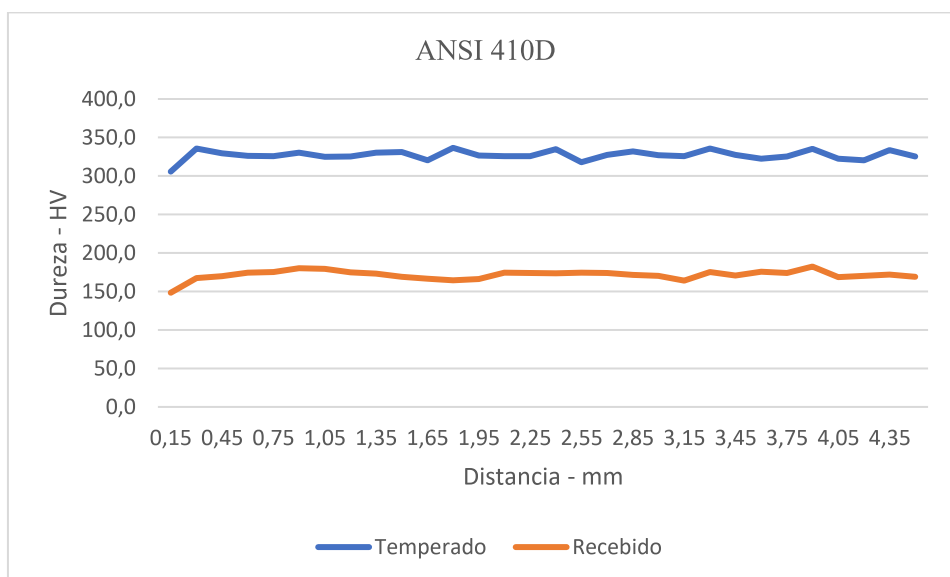
Figura 4.33: Valores Dureza AISI 410D.



Fonte: Próprio autor

A Figura 4.34 exibe a médias dos valores da dureza transversal à laminação obtidos como resultado nas amostras do aço AISI 410D retiradas fora da área erodida.

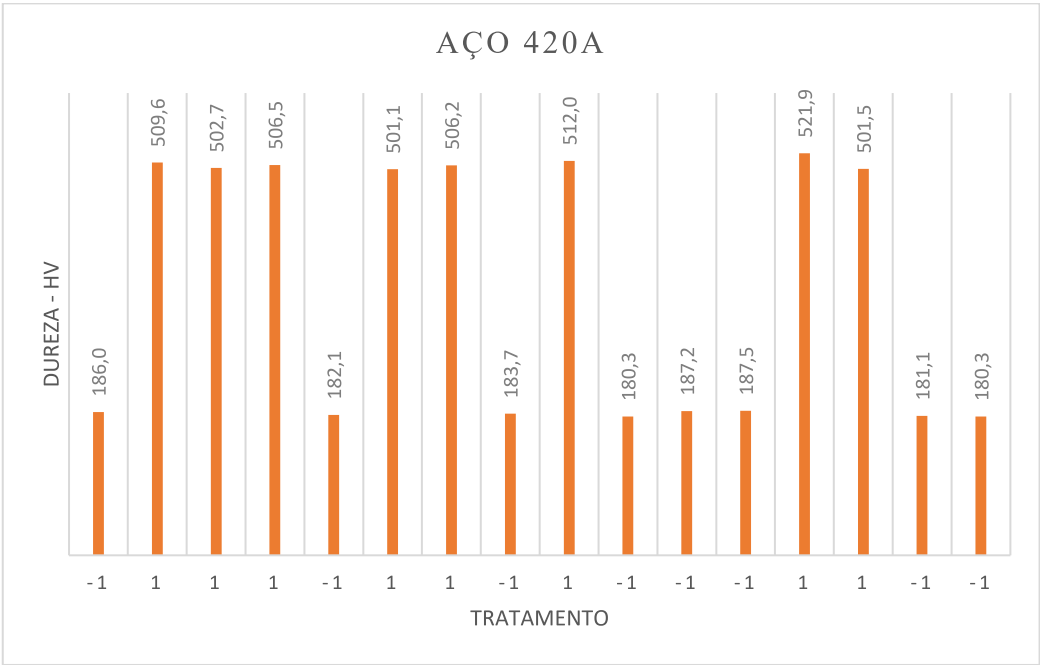
Figura 4.34: Valores Dureza AISI 410D Transversal.



Fonte: Próprio autor

A Figura 4.33 exibe a médias dos valores da dureza longitudinal à laminação obtidos como resultado para cada amostra do aço AISI 420A.

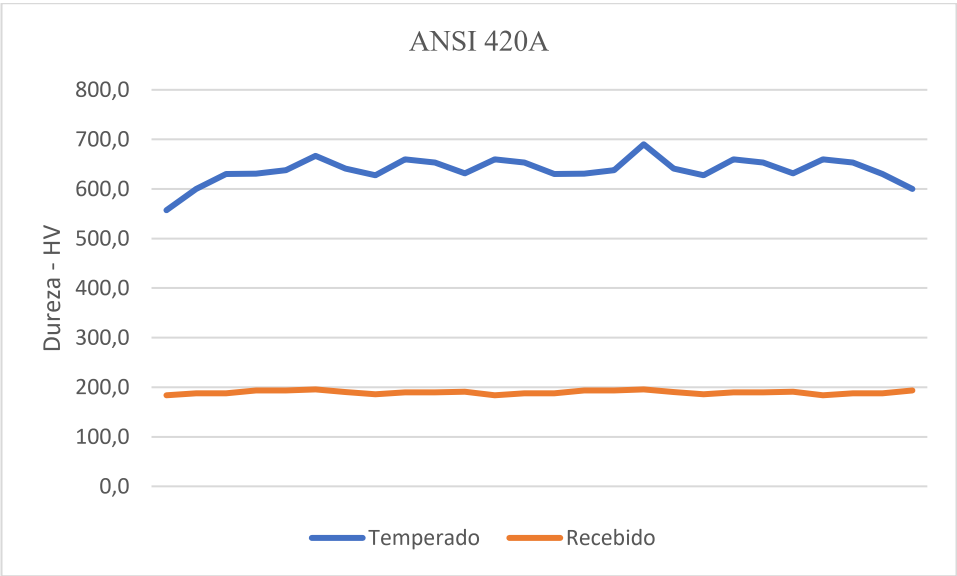
Figura 4.35: Valores Dureza AISI 420A.



Fonte: Próprio autor

A Figura 4.33 exibe a médias dos valores da dureza transversal à laminação obtidos como resultado para cada amostra do aço AISI 420A retiradas fora da área erodida.

Figura 4.36: Valores Dureza AISI 420A Transversal.



Fonte: Próprio autor

A dureza média do material AISI 410D na condição de recebido na longitudinal é de $163,7 \pm 4 \text{ HV}_5$ e na condição temperada é de $312,3 \pm 7 \text{ HV}_5$, enquanto na transversal é de $171,4 \pm 9 \text{ HV}_1$ e na condição temperada é de $327,1 \pm 18 \text{ HV}_1$. A dureza média do material AISI 420A na condição de recebido na longitudinal é de $183,5 \pm 3 \text{ HV}_5$ e na condição temperada é de $507,7 \pm 7 \text{ HV}_5$, enquanto na transversal é de $189,5 \pm 8 \text{ HV}_1$ e na condição temperada é de $638,2 \pm 31 \text{ HV}_1$. A medição da dureza foram realizadas nas superfícies retificada e transversal da amostra, com endentações em locais aleatórios, sendo o valor apresentado resultante da média das médias de 5 medições de cada amostra.

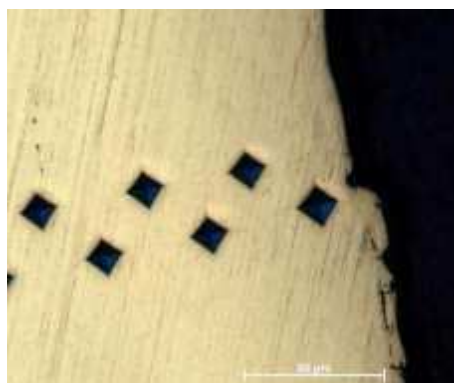
Estudos realizados por Krauss (1999) mostraram que os valores de dureza aumentam em função do teor de carbono, corroborando com os resultados obtidos neste trabalho, onde o aço AISI 420A apresenta dureza mais elevada que o aço AISI 410D de menor teor de Carbono.

A variação da dureza na estrutura transversal em relação a dureza na superfície retificada é explicada por Lin (2018) apud Ruzzi (2019), sendo que para os aços quando a temperatura na interface de corte da retificação excede 600°C , pode ocorrer queda de dureza em aços temperados pelo super-revenimento.

O aumento da dureza nas amostras temperadas em relação ao estado de entrega é justificado pela transformação martensítica na microestrutura (ARRUDA, 2019). O ganho de dureza nas amostras do aço AISI 410D foi de 90% e as do 420A foi de 176%

A Figura 4.37 exibe a forma como foi adquirida as dureza no sentido transversal à retificação, no posicionamento da cavidade erodida, sendo as distâncias entre endentações de 0,1mm na horizontal e 0,1mm na vertical, segundo a norma ABNT NBR NM ISO 6507/2019 a distância mínimas deve ser 2,5x a diagonal da endentação para evitar resultados de dureza incorretos resultantes da alteração e/ou deformação da estrutura do material.

Figura 4.37: Posicionamento retirada de dureza transversal.

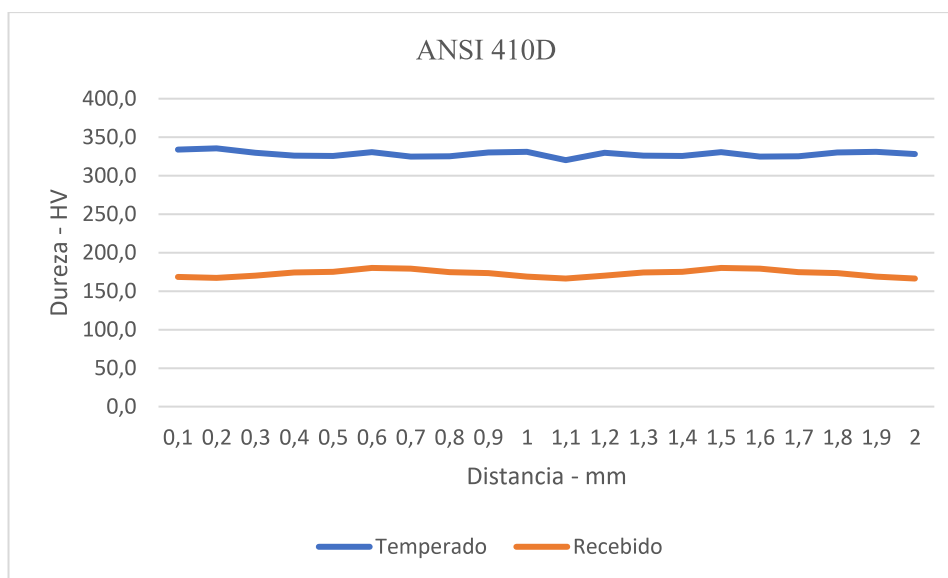


Fonte: Próprio autor

Para a análise na seção transversal das amostras como recebidas e temperadas, os parâmetros de usinagem utilizados: Ie de 8, On de 80 e GAP de 20.

A Figura 4.38 exibe a médias dos valores da dureza transversal à laminação, obtidos como resultado para cada amostra como recebido com o aço AISI 410D.

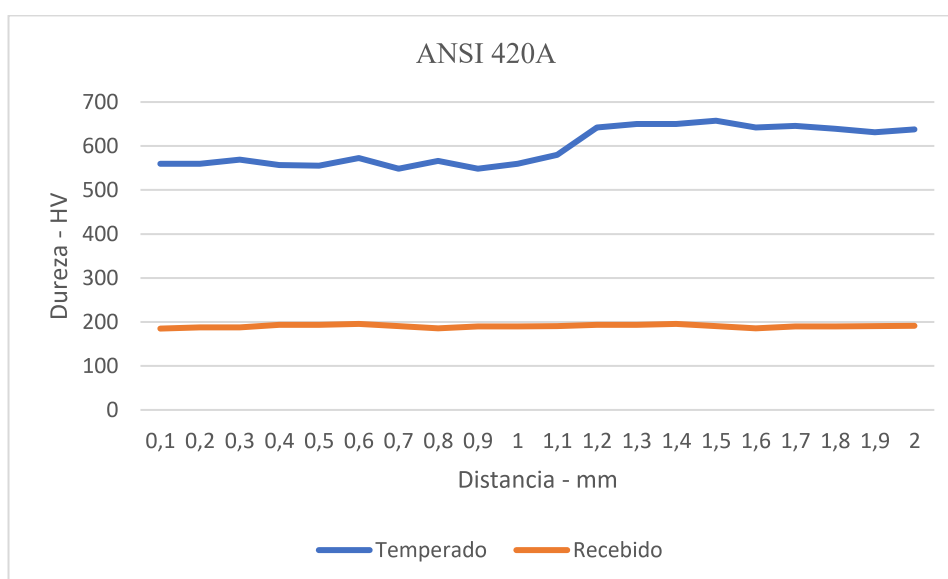
Figura 4.38: Valores Dureza Transversal AISI 410D.



Fonte: Próprio autor

A Figura 4.39 exibe a médias dos valores da dureza transversal à laminação, obtidos como resultado para cada amostra como recebido com o aço AISI 420A.

Figura 4.39: Valores Dureza Transversal AISI 420A.



Fonte: Próprio autor

Na Figura 4.39 mostra que há uma redução na dureza em relação à média da amostra, na zona termicamente afetada, onde o calor transferido promove um excesso de revenimento da microestrutura original diminuindo localmente a dureza (FERRAMENTAL, 2023).

4.5 Análise das alterações na microestrutura

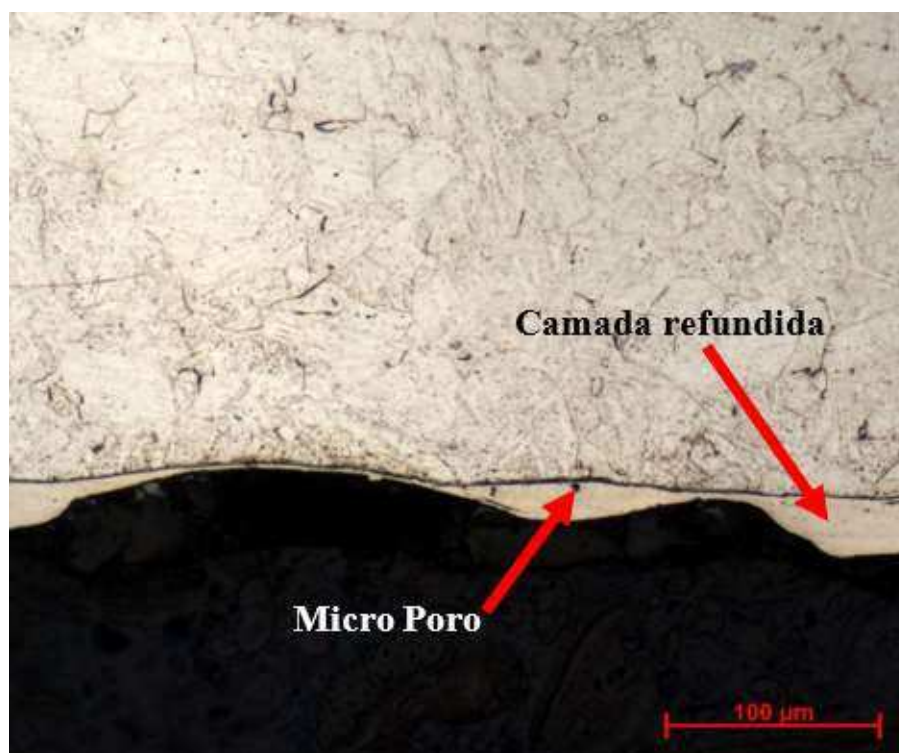
A Figura 4.40 e Figura 4.41 apresentam a região erodida onde apresenta uma pequena camada refundida que apresenta integridade deficiente e, frequentemente, vem acompanhada de formação de micro trincas e micro poros, não apresenta uma zona afetada, que é normal ao processo de usinagem por eletroerosão (SABBO, 2017).

Figura 4.40: Camada refundida aço 410D como recebido.



Fonte: Próprio autor

Figura 4.41: Camada refundida aço 410D temperado.

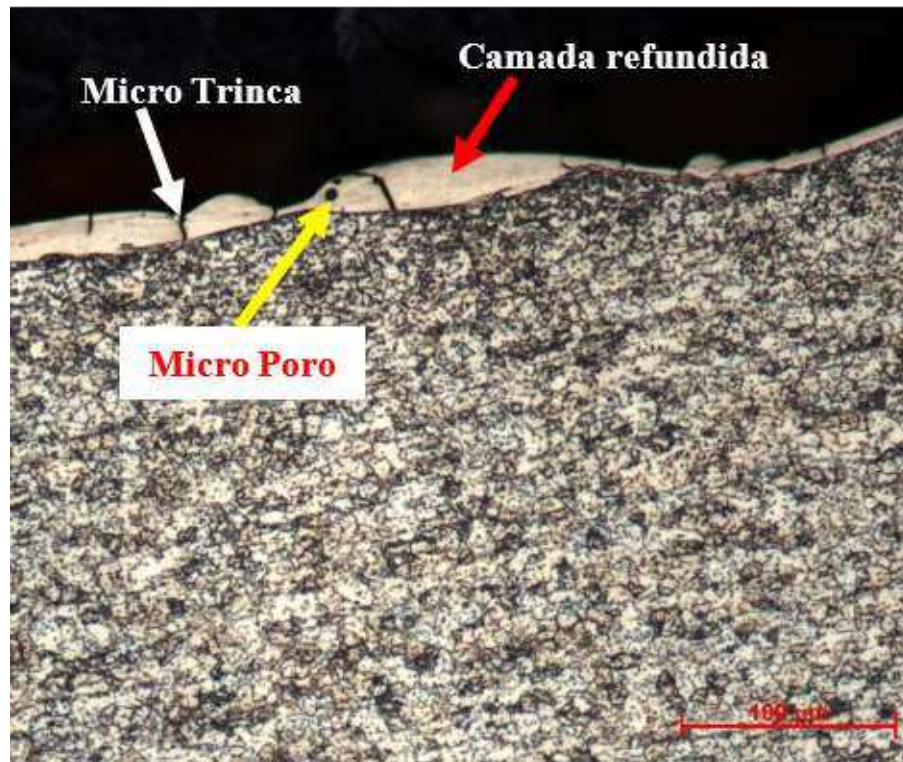


Fonte: Próprio autor

Segundo Sodré (2017) a formação da camada refundida (branca) é pela interação do carbono presente no dielétrico com o ferro e também pelo rápido resfriamento da peça, originando a formação de cementita (Fe_3C). A camada branca é muito variável, o que é uma situação comum na eletroerosão, e devida à sobreposição de faíscas na superfície (IRAPUAN, 2010).

A Figura 4.42 apresenta a região erodida onde apresenta uma pequena camada refundida com integridade deficiente, micro trincas e micro poros, não apresenta uma zona termicamente afetada.

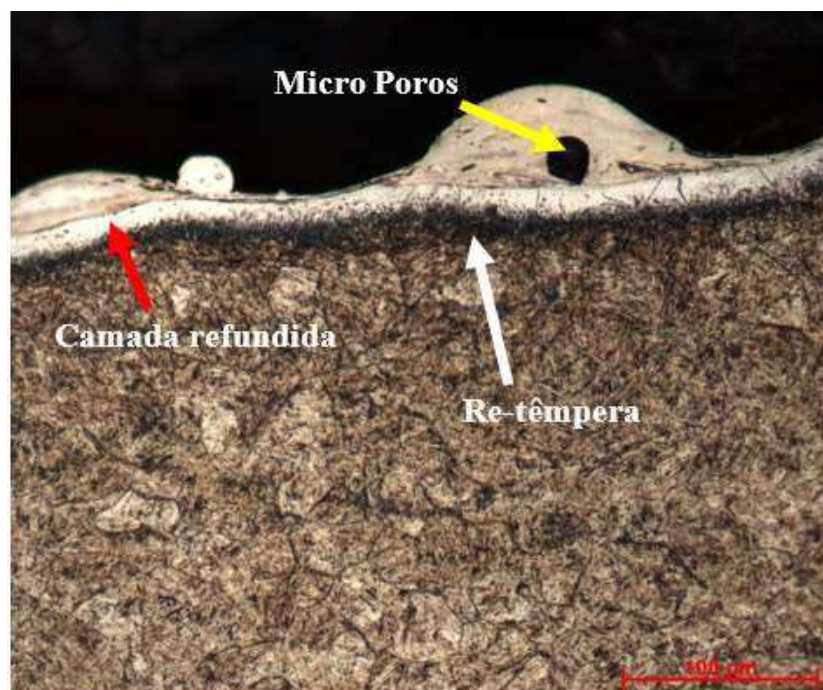
Figura 4.42: Camada refundida aço 420A como recebido.



Fonte: Próprio autor

A Figura 4.43 apresenta a região erodida onde apresenta uma pequena camada refundida com integridade deficiente, micro poros e uma pequena área retemperada.

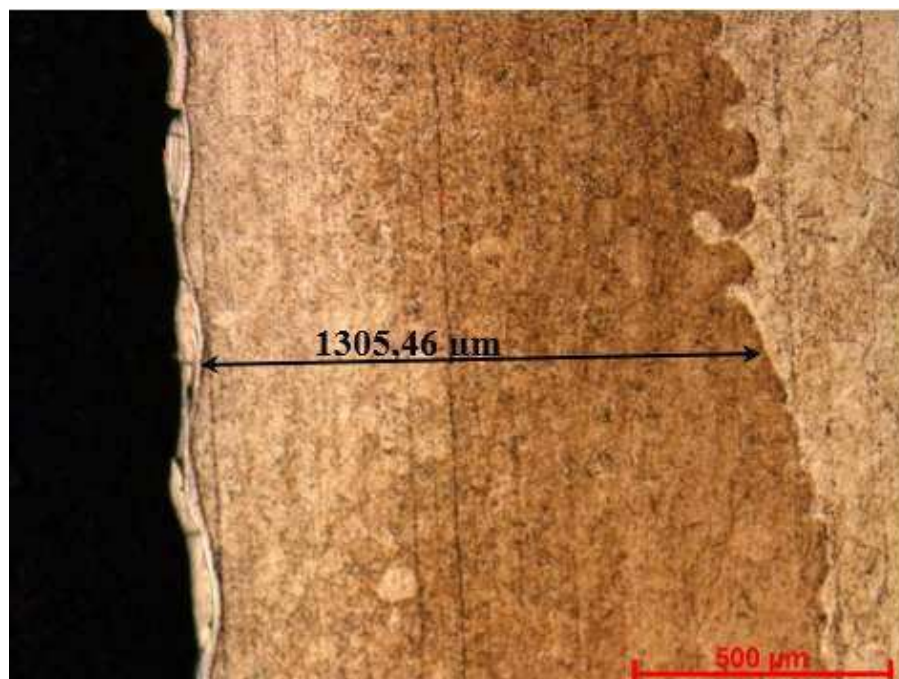
Figura 4.43: Camada refundida aço 420A temperado.



Fonte: Próprio autor

A Figura 4.44 apresenta, na região erodida, uma zona termicamente afetada com 1305,46 μm de espessura, a Figura 4.39 demonstra que nesta região teve um dureza menor que a da região de metal base.

Figura 4.44: Aço 420A temperado - Zona termicamente afetada.



Fonte: Próprio autor

Apesar de esses dois materiais serem da mesma família de aços inoxidáveis, eles possuem elementos de liga em quantidades diferentes. Essa diferença nas composições químicas irá influenciar de forma decisiva nos fatores que interferem na eletroerosão como: calor específico, condutibilidade térmica e temperatura de ebulição, além da resistência de evaporação e fusão dos materiais, desgaste do eletrodo e na rugosidade (SANTOS, 2007).

5. CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

5.1 Conclusões

A partir das evidências produzidas neste trabalho em usinagem EDM dos aços AISI 410D e 420A, segundo a análise e discussão dos resultados aqui apresentados, é possível apresentar as seguintes conclusões:

- ✓ A corrente e o GAP tiveram efeitos estatisticamente significativos sobre a taxa de remoção de material tanto para o AISI 410D quanto para o 420A. Correntes altas proporcionam uma maior quantidade de energia e um menor GAP concentra a energia no canal de plasma proporcionando uma maior remoção. As Ra
- ✓ A corrente teve efeitos estatísticos sobre o desgaste do eletrodo para AISI 420A, para AISI 410D, além da corrente, o tempo de pulso também teve efeito estatístico. Correntes baixas e On altos proporciona uma baixa energia no canal de plasma proporcionando um menor desgaste.
- ✓ Tanto a rugosidade média aritmética quanto a rugosidade total para o AISI 410D quanto para o 420A tiveram estatisticamente influência da corrente. Maior corrente aumenta a energia produzindo regiões de maiores crateras na superfície usinada.
- ✓ Analisando individualmente os aços AISI 410D quanto o 420A não houve nenhum fator que teve influência estatisticamente no *overcut*, porém comparando os dois aços simultaneamente, o AISI 420A teve um maior *overcut* em relação ao aço AISI 410D, devido a mudança da quantidade de carbono.
- ✓ A usinagem por retificação das amostras influenciou na dureza superficial devido ineficiência da lubrificação, aumentando a temperatura na interface de corte ocasionando uma redução da dureza por revenimento;
- ✓ O tratamento térmico não influenciou estatisticamente na taxa de remoção de material, desgaste do eletrodo e a rugosidade superficial na usinagem dos materiais pesquisados;

5.2 Sugestões de trabalhos futuros

A realização do estudo desenvolvido neste trabalho possuem algumas limitações e incertezas que podem ser mais bem exploradas em outras pesquisas com estes materiais. A seguir, algumas sugestões de tópicos a serem abordados em futuros trabalhos:

- ✓ A análise com mais repetições de uma menor quantidade de parâmetros e valores intermediários às faixas testadas pode resultar em maior confiabilidade da análise para estes parâmetros;
- ✓ Investigar o efeito da variação dos parâmetros na usinagem dos mesmos aços estudados neste trabalho, utilizando outro método de análise estatística;
- ✓ Analisar efeitos da variação da pressão do dielétrico e direção do fluxo para limpeza na fenda de trabalho e analisar os resultados obtidos quanto a qualidade superficial e rendimento do processo de EDM;
- ✓ Fazer uso de outros métodos para análise da camada afetada pela eletroerosão, e a composição da mesma;
- ✓ Avaliar a utilização de outros fluidos dielétricos, como água deionizada com e sem cristais de uréia diluída, para análise da Nitretação com Descargas Elétricas (NDE);

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGOSTINHO. O. L.; RODRIGUES. A. C. S.; LIRANI, J. **Tolerâncias, ajustes, desvios e análise de dimensões**, 3ª reimpressão. São Paulo: Editora Edgard Blucher, 1986.

AMORIM, F. L. **Tecnologia da eletroerosão por penetração da liga de alumínio AMP 8000 e da liga de cobre**. CuBe para ferramentas de moldagem de materiais plásticos. 2002. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica). UFSC. Florianópolis. 2002.

APERAM SOUTH AMERICA. **Aço Inox – Especificações Técnicas**. Brasil, 2022.

ARRUDA, A. A. F. **Efeito da temperatura sobre o comportamento mecânico e oxidação do aço inoxidável ferrítico UNS S41003 (410D)**. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Materiais) - Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2019.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR ISO 6507-1: Materiais metálicos — Ensaio de dureza Vickers Parte 1: Método de ensaio**. Rio de Janeiro, jun. 2019a.

BARLOW, L. D.; DU TOIT, M. **Effect of austenitizing heat treatment on the microstructure and hardness of martensitic stainless steel AISI 420**. Journal of materials engineering and performance, v. 21, n. 7, p. 1327-1336, 2012.

BARLOW, L. D.; DU TOIT, M. **Effect of austenitizing heat treatment on the microstructure and hardness of martensitic stainless steel AISI 420**. Journal of materials engineering and performance, v. 21, n. 7, p. 1327-1336, 2012.

BENEDICT, G. F. **Nontraditional Manufacturing Processes**. Edição ilustrada. Editora CRC Press, 1987.

BERI, N. et al. **Surface quality modification using powder metallurgy processed CuW electrode during electrical discharge machining of Inconel 718**. Material Science, Malásia, v. 5, p. 2629-2634, 2014

BLEYS, P.; KRUTH, J. P.; LAUWERS, B.; SCHACHT, B.; BALASUBRAMANIAN, V.; ROYEN, L.; HUMBEECK, J. V. **Surface and sub-surface quality of steel after EDM**. Advanced engineering Materials, Leuven, v.8, n. 1, p. 15-25, 2006.

BORTOLOTTI, F. C. **Análise da influência dos parâmetros do processo de eletroerosão por penetração sobre o tempo de processo e qualidade superficial da peça**. Caxias do Sul: Trabalho de Conclusão de Curso da Universidade de Caxias do Sul. 2019.

BRAGANÇA, I. M. F.; ROSA, P. A. R. C.; ALVES, L. L.; MARTINS, P. A. F. Influência do gap frontal no processo de eletroerosão. *Revista Maquinas e Metais*. Editora Aranda, n. 579, 2014.

CALLISTER, W. D. **Ciência e Engenharia dos Materiais: Uma introdução**. 5. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2002.

CARLINI, G. C. Remoção de metal duro por EDM com eletrodo de CuW. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2018.

CHIAVERINI, V. **Aços e Ferros Fundidos**. 7. ed. São Paulo: ABM, 1996.

COPPERMETAL. **Catálogo de Cobre**. Disponível em: <https://www.coppermetal.com.br/catalogos/catalogo-cobre.pdf><https://www.coppermetal.com.br/blog/tratamento-termico/>. Acesso em 01 de outubro de 22.

COPPERMETAL. **Tratamento térmico: a classificação das têmperas nas ligas de alumínio**. Disponível em: <https://www.coppermetal.com.br/blog/tratamento-termico/>. Acesso em 01 de outubro de 22.

CRAWFORD, J. D.; AL., E. **High-Strength Cast Stainless Steels with Enhanced Corrosion Resistance**. *Stainless Steel*, V. G. Behal and A. S. Melilli, *ASTM STP 756*, p. 355–368, 1982.

DANELON, M. R.; SOARES, F.; MANFRINATO, M. D.; ROSSINO, L. S. **Estudo do efeito da nitretação iônica a plasma na resistência ao desgaste do aço SAE 1020 utilizado em matriz de conformação**. *Revista Brasileira de Aplicações do Vácuo*, v. 39, p. 142–155, 2020.

DAVIS, J. R. **ASM specialty handbook: Stainless Steels**. Materials Park, Ohio: p.577. ASM International, 1994.

ELETRO. **Manual de operação, instalação e manutenção** ONC 400. 2015. Apostila.

EL-HOFY, H. **Advanced Machining Process: Nontraditional and Hybrid Machining Processes**. Estados Unidos: McGraw-Hill, 2005.

EUBANK, P. T.; PATEL, M. R.; BARRUFET, M. A.; BOZCURT, B. **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.

FARIA, G. L. de; GODEFROID, L. F.; MENEZES, V. S. **Development of a methodology for structural and mechanical characterization of extended sheets made from stainless steels**. *Materials Research*, v. 18, p. 76-82, 2015.

FERRAMENTAL. **Danos superficiais causados em aços-ferramenta pelo processo de eletroerosão.** Disponível em: <https://www.revistaferramental.com.br/artigo/danos-superficiais-causados-em-a-os-ferramenta-pelo-processo-de-eletroeros-o/>. Acesso em 15 de janeiro de 2023.

FERREIRA, J. L. L. **Efeito da densidade de corrente no desempenho do eletrodo ferramenta.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Universidade do Porto, 2017.

GILET, J. A. **Solução Ferrítica.** Disponível em: https://www.worldstainless.org/Files/issf/non-image-files/PDF/ISSF_The_Ferritic_Solution_Portuguese.pdf. Acesso em 01 de agosto de 22.

GOPALAKANNAN, S.; SENTHILVELAN, T. **Optimization of machining parameters for EDM operations based on central composite design and desirability approach.** Journal of Mechanical Science and Technology. India, v. 28, p. 1045-1053, 2014.

GOSTIMIROVIC, M.; KOVAC, P.; SEKULIC, S. SKOVIC, B. **Influence of discharge energy on machining characteristics in EDM.** Journal of Mechanical Science and Technology v. 26, pp.173–179, 2012.

HOUMAN, L. **Electrical Discharge Machining: Tooling, Methods and Applications.** Society of Manufacturing Engineers. p. 5-19, 1983.

KRAUSS, G. **Martensite in steel: strength and structure, Materials.** Science and Engineering, Elsevier, v. 273–275, p. 40-57, 1999.

KUBADE, P. R.; JADHAV, V. S. **An Experimental Investigation of Electrode Wear Rate (EWR), Material Removal Rate (MRR) and Radial Overcut (ROC) in EDM of High Carbon-High Chromium Steel (AISI D3).** International Journal of Engineering and Advanced Technology, v. 1, 2012.

KUMAR, G.; CHATURVERI, S.; RIZVI, S. A. H. **Investigation of MRR, TWR and Radial Overcut at Varying Depth of Machining during Die Sinking EDM.** International Journal for Research in Applied Science & Engineering Technology, v. 8, 2020.

LESLIE, W. C. **The Physical Metallurgy of Steels.** *McGraw-Hill series in material science and engineering*, 1981.

MARQUES, M. B. **Efeito da condutividade elétrica no desempenho do processo de Eletroerosão.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Universidade do Porto, 2020.

MASAKI, T., KAWATA, K.; MASUZAWA, T. **Micro eletro-descarga de usinagem e suas aplicações**, *IEEE Proceedings on Micro Electro Mechanical Systems, Uma Investigação de Micro Estruturas, Sensores, Atuadores, Máquinas e Robôs*. MEMSYS, p. 21-26, 1990. doi: 10.1109.1990.110240.

MASAKI, T.; KAWATA, K.; MASUZAWA, T. **Micro Electro-Discharge Machining and its Applications**. Proceeding of IEEE: MEMS. p. 21-26, 1990.

MILLS, B. **Machinability of Engineering Materials**. Slford, UK: Springer Science & Business Media, 1983.

MITUTOYO **Durômetro Vickers HV-100**. Disponível em: <https://www.mitutoyo.com.br/download/02folhetos//06%20Dureza/E17007.pdf>. Acesso em 15 de julho de 2022.

MITUTOYO, **Durômetros para Microdureza Vickers — HM-210 – 810-404A**. Disponível em: <https://www.mitutoyo.com.br/durometros-para-microdureza-vickers-hm-210-810-404a.html>. Acesso em 05 de dezembro de 2022.

MITUTOYO, **Microscópio motorizado ZEISS Axio Imager 2**. Disponível em: <https://www.directindustry.com/pt/prod/zeiss-industrial-metrology/product-5693-2232423.html>. Acesso em 05 de novembro de 2022.

MITUTOYO, **Rugosímetro Portátil Surftest SJ-210**. Disponível em: <https://www.mitutoyo.com.br/sj-210.html>. Acesso em 05 de julho de 2022.

MODENESI, P. J. **Soldabilidade dos Aços Inoxidáveis**. São Paulo. Centro Nacional de Tecnologia em Metalurgia. Osasco. S. 2001.

Nunes, I. P. **Influência de tratamentos térmicos de têmpera a partir de austenitização intercrítica no comportamento mecânico de um aço inoxidável bifásico do tipo UNS S41003**. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Materiais) - Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2020.

OLIMPUS. **Parâmetros do método de perfil**. Disponível em: <https://www.olympus-ims.com/pt/metrology/surface-roughness-measurement-portal/parameters/>. Acesso em: 15 de julho de 2022.

OLINIKI, R. **Influência da combinação entre os parâmetros de usinagem por eletroerosão na integridade superficial do aço AISI H13 temperado e revenido**. 2009. 127 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica e de Materiais) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba. 2009.

- PADILHA, A. F. e GUEDES, L.C., **Aços Inoxidáveis Austeníticos**. 1º ed. Hermus, 1994.
- PANOSSIAN, Z. **Corrosão e proteção contra corrosão em equipamentos e estruturas metálicas**. 1º ed. IPT, 1993.
- PAREDES, R. C. **Metalurgia e soldabilidade dos aços inoxidáveis**. UFPR, 1999.
- PAREDES, Ramon Cortés. **Aços Inoxidáveis Metalurgia e Soldabilidade**. UFPR, 2020.
- PINEDO, C. E. **Tratamento térmico e superficial do aço inoxidável martensítico AISI 420 destinado a moldes para injeção de polímeros – tratamento térmico**. São Paulo: 2º Encontro da Cadeia de Ferramentas, Moldes e Matrizes - ABM, 2004.
- PINEDO, C. E.; MONTEIRO, W. A. **Tratamento térmico e de nitretação sob plasma do aço inoxidável martensítico AISI 420**. Tecnologia em Metalurgia, Materiais e Mineração, v. 8, n. 2, p. 86–90, 2011.
- RAMASAWMY, H.; BLUT, L. **Effect of EDM Process Parameters on 3D surface topography**. Journal of Materials Processing Technology, n. 148, p. 155-164. 2004.
- RIBEIRO, J. L. D.; CATEN, C. S. **Projeto de Experimentos**. Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Escola de Engenharia. Programa de Pós Graduação em Engenharia de Produção, 2003.
- ROSSETTO, A.S.; HAUPT, W.; CONSALTER, L.A. **Otimização e análise dos parâmetros de usinagem por eletroerosão na rugosidade superficial do aço AISI P20**. revista Matéria, v.27, n.3, 2022.
- ROY, D.C.; MONDAL, R.; MONDAL, M. **Optimization of MRR in EDM Process with Different Job Material i.e Stainless Steel and Cast Iron by Taguchi Method**. Journal of Engineering Research and Applications, v. 5, n 5, p. 24-31, 2015.
- RUZZI, R. S. **Retificabilidade das ligas de níquel Inconel 625 e Inconel 718**. 2019. 160 f. Tese (Doutorado) – Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2019.
- SABBO J. N. B. M., **Análise do Estado Superficial de Aços no Processo de Eletroerosão**. 74 p. Dissertação de Mestrado (Mestrado em Engenharia Metalúrgica). Universidade do Porto, Porto, 2017.
- SANTOS, I. **Análise dos parâmetros de entrada na eletroerosão de penetração da liga de titânio TI-6AL-4V**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica e de Materiais) -

Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2010.

SANTOS, R. F. **Influência do material da peça e do tratamento térmico na eletroerosão dos aços AISI H13 e AISI D6**. 2007. 132 f. Dissertação (Mestrado) – Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Departamento de Engenharia Mecânica, Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2007.

SANTOS, R. F. **Nitretação por EDM do aço AISI 4140**. 2013. 109 f. Tese (Doutorado) – Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2013.

SANTOS, W. C.; NETO, J. O. P.; SILVA, R. O.; RODRIGUES, G.; MORETO, J. A.; MANFRINATO, M. D.; ROSSINO, L. S. **Desenvolvimento de dispositivo e estudo do comportamento ao microdesgaste abrasivo do aço AISI 420 temperado e revenido**. *Matéria*, v. 20, n. 2, 2015.

SILVA, E. M. **Influência dos parâmetros de usinagem na vida de ferramentas de metal duro**. *Máquinas e Metais*, São Paulo, n.489, p. 42-53, 2006.

SILVA, J. C. **Sistema Especialista Aplicado à Técnica de Usinagem por Eletroerosão**. Taubaté: UNITAU, 2004, 76 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Universidade de Taubaté, Taubaté, 2004.

SILVA, S. E. T. P. **Análise das Propriedades Mecânicas e Estruturais do Aço SAE 4140 Submetido a Tratamento Criogênico**. Dissertação (Mestrado em Engenharia e Ciência dos Materiais) - Universidade Estadual do Norte Fluminense, Campos dos Goytacazes, p. 9-22, julho, 2012.

SMITH, W. F.; HASHEMI, J. **Fundamentos de Engenharia e Ciência dos Materiais**. 5ª ed. Porto Alegre: McGraw-Hill, 2010.

SODRÉ, D. A. **Influência do tratamento térmico na usinagem em eletroerosão por penetração nos aços ABNT NM 122 GRAU D2 e ABNT NM 122 grau O1**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Universidade Santa Cecília, Santos, 2017.

STEVENS, L. **Improvement of surface quality in die-sinking EDM**. 1998. 181 f. Tese (Doutorado) – Programa de Pós-Graduação, Departamento de Engenharia Mecânica, Katholieke Universiteit Leuven, Leuven, 1998.

TEIMOURI R.; BASERI H. **Study of tool wear and overcut in EDM process with rotary tool and magnetic field**. *Advances in Tribology*, 2012.

VILELA, L. B. M.; FARIA, G. L.; ALCANTARA, C. M.; OLIVEIRA, T. S.; COTA, A. B. **Efeito da taxa de resfriamento sobre a formação de martensita em um aço inoxidável ferrítico com 11 %Cr e baixos teores de intersticiais.** Revista Matéria. v. 24. n. 01. 2019.

ZEISS, **Microscópio de luz e zoom Zeiss Stereo Discovery V8.** Disponível em: <https://www.zeiss.com/microscopy/en/products/light-microscopes/stereo-and-zoom-microscopes/stereo-discovery-v8.html>. Acesso em 05 de julho de 2022.