

Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais



Dissertação de Mestrado

João Paulo Moreira Santos Barbosa

AVALIAÇÃO DO AÇO ABNT P20 USINADO POR EDM COM SOLUÇÃO AQUOSA DE OCTABORATO DE SÓDIO TETRAHIDRATADO E BÓRAX COMO FONTE DE BORO

Belo Horizonte Fevereiro de 2023

AVALIAÇÃO DO AÇO ABNT P20 USINADO POR EDM COM SOLUÇÃO AQUOSA DE OCTABORATO DE SÓDIO TETRAHIDRATADO E BÓRAX COMO FONTE DE BORO

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Materiais do CEFET-MG, na área de concentração de Ciência e Desenvolvimento de Materiais, na Linha de Pesquisa em Seleção, Processamento e Caracterização, como parte integrante dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Engenharia de Materiais.

Orientador: Prof. Dr. Ernane Rodrigues da Silva

Belo Horizonte Fevereiro de 2023

Barbosa, João Paulo Moreira Santos.

B238a Avaliação do aço ABNT P20 usinado por EDM com solução aquosa de octaborato de sódio tetrahidratado e bórax como fonte de boro / João Paulo Moreira Santos Barbosa. – 2023. 86 f. : il.

Orientador: Ernane Rodrigues da Silva.

Dissertação (mestrado) – Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Materiais, Belo Horizonte, 2023. Bibliografia.

1. Usinagem por eletroerosão. 2. Aço. 3. Bórax. I. Silva, Ernane Rodrigues da. II. Título.

CDD: 671.35

Ficha elaborada pela Biblioteca - *campus* Nova Suíça - CEFET-MG Bibliotecária: Rosiane Maria Oliveira Gonçalves - CRB6-2660 sig.cefetmg.br/sipac/protocolo/documento/documento_visualizacao.jsf?imprimir=true&idDoc=1130847



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA DE MINAS GERAIS COORDENAÇÃO DO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE MATERIAIS - NS



ATA DE DEFESA DE DISSERTAÇÃO Nº 25 / 2023 - POSMAT (11.52.07)

Nº do Protocolo: 23062.027591/2023-38

Belo Horizonte-MG, 31 de maio de 2023.

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

AVALIAÇÃO DO AÇO ABNT P20 USINADO POR EDM COM SOLUÇÃO AQUOSA DE OCTABORATO DE SÓDIO TETRAHIDRATADO E BÓRAX COMO FONTE DE BORO

Autor: João Paulo Moreira Santos

Orientador: Prof. Dr. Ernane Rodrigues da Silva

A Banca Examinadora composta pelos membros abaixo aprovou em 28 de fevereiro de 2023 esta Dissertação:

Prof. Dr. Ernane Rodrigues da Silva (ORIENTADOR) Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais - CEFET/MG

Prof. Dr. Leonardo Neves (EXAMINADOR INTERNO) Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais - CEFET/MG

Prof. Dr. Aderci de Freitas Filho (EXAMINADOR EXTERNO) Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais ? CEFET-MG

Prof. Dr. Sinval Pedroso da Silva (EXAMINADOR EXTERNO) Instituto Federal de Minas Gerais ? IFMG

(Assinado digitalmente em 05/06/2023 10:45) ADERCI DE FREITAS FILHO PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO DEMAT (11.55.06) Matrícula: 2651232

(Assinado digitalmente em 09/06/2023 09:32) LEONARDO NEVES PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO DEMAT (11.55.06) Matrícula: 1546513 (Assinado digitalmente em 05/06/2023 09:25) ERNANE RODRIGUES DA SILVA PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO CEMAT (11.51.06) Matrícula: 392338

(Assinado digitalmente em 05/06/2023 12:20) SINVAL PEDROSO DA SILVA ASSINANTE EXTERNO CPF: 913.576.676-04

Visualize o documento original em <u>https://sig.cefetmg.br/public/documentos/index.jsp</u> informando seu número: 25, ano: 2023, tipo: ATA DE DEFESA DE DISSERTAÇÃO, data de emissão: 31/05/2023 e o código de verificação: c0ab268656

AGRADECIMENTOS

Primeiramente agradeço a Deus pela vida, por trilhar meus caminhos me dando força, saúde e sabedoria.

Dedico esse trabalho a minha família em especial a minha esposa Flor pela paciência, conselhos e compreensão, pois em alguns momentos não pude estar presente, principalmente quando nosso filho João Miguel nasceu e eu estava trabalhando fora.

Dedico aos meus pais, Hilton Santos Barbosa e Maria Ilma Moreira por me concederem a vida e trilhar meus caminhos, junto com as mãos de Deus.

A minha segunda mãe e irmã Juliana pela ajuda e conselhos.

Minha eterna gratidão ao meu grande amigo Anderson Edson da Silva pela paciência quando ocupava seu tempo para me ajudar sempre que precisava.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Ernane da Silva, que sempre esteve presente, aconselhando, instruindo e compartilhando seu conhecimento. Sem ele não poderia ter concluído este trabalho.

Ao Prof. Dr. Sinval Pedroso da Silva, Prof. Dr. Aderci de Freitas Filho e Prof. Dr. Leonardo Neves, pelas sugestões para que o trabalho fosse realizado e estruturado da melhor forma possível.

A secretaria do POSMAT, em especial a Caroline Fernandes de Paula Almeida e Júlia Demétrio Xavier pela ajuda quando precisava.

Ao amigo Jorge Wanderson Barbosa, pela ajuda com os ensaios enriquecendo o trabalho.

Aos meus amigos Anderson Junior dos Santos e Weslei Patrick Teodósio Sousa pelo companheirismo, ajuda e pela contribuição de conhecimento.

A todos os professores do curso de Mestrado em Engenharia de Materiais do CEFET, pela contribuição e ensinamentos.

Aos colegas do SENAI-CETEF de Itaúna e LAMAT pela ajuda com os ensaios.

A todos professores e colegas de trabalho que conheci no tempo que estive no DEMAT e aqueles que contribuíram de forma direta ou indireta na conclusão deste trabalho.

A Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pelos auxílios.

Com muito carinho e sinceridade...

Muito obrigado a todos!

RESUMO

O processo de Usinagem por Descargas Elétricas (EDM - Electrical Discharge Machining) é amplamente usado na fabricação de peças complexas e de difícil usinagem, que ao serem submetidas à tratamentos de endurecimento superficial como o de boretação, tem a resistência ao desgaste e fadiga melhorada. Este trabalho apresenta um estudo da usinagem do aço ABNT P20 realizado em uma máquina de Usinagem por Descargas Elétricas por Penetração (Die-Sinking-EDM) adaptada, utilizando cobre eletrolítico como eletrodo ferramenta e duas soluções eletrolíticas, fonte de boro, aplicadas separadamente. A primeira contendo octaborato de sódio tetrahidratado ($Na_2B_8O_{13}.4H_2O$) e a segunda contendo bórax ($Na_2B_4O_7.10H_2O$), ambas diluídas em água deionizada. Para verificação de alterações morfológicas, microestruturais e mensuração da espessura das camadas formadas, imagens foram obtidas utilizando microscopia óptica. A dureza das camadas foi medida via ensaio de microdureza Vickers e a presença de boretos foi verificada por meio de difração de raio-x (DRX). Com a solução eletrolítica contendo octaborato de sódio tetrahidratado, uma camada boretada (intermediária) com espessura média de 52µm e 621HV foi medida, representando um ganho de 92% no valor da dureza em relação ao material base. Com a solução contendo bórax, foi obtida uma camada boretada com espessura média de 35µm e 683HV, representando um ganho de 111% no valor da dureza em relação ao material base. Para ambas as soluções utilizadas, a fase Fe₂B foi observada nos difratogramas de raio-x.

Palavras chave: Usinagem por Descargas Elétricas; Aço ABNT P20; Octaborato de Sódio Tetrahidratado (Na₂B₈O₁₃.4H₂O); Bórax (Na₂B₄O₇.10H₂O).

ABSTRACT

The Electrical Discharge Machining (EDM) process is widely used in the manufacture of complex and difficult-to-machine parts, which, when subjected to surface hardening treatments such as boriding, have improved wear and fatigue resistance. This work presents a study of the machining of AISI P20 steel carried out in an adapted Diesinking EDM (S-EDM) machine, using electrolytic copper as tool electrode and two electrolytic solutions, source of boron, applied separately. The first containing disodium octaborate tetrahydrate (Na₂B₈O₁₃.4H₂O) and the second containing borax (Na₂B₄O₇.10H₂O), both diluted in deionized water. To verify morphological, microstructural alterations and to measure the thickness of the formed layers, images were obtained using optical microscopy. The layer hardness was measured using the Vickers microhardness test and the presence of borides was verified using X-ray diffraction (XRD). Using the electrolytic solution containing sodium octaborate tetrahydrate, a borid layer (intermediate) with an average thickness of 52µm and 621HV was measured, representing na increse of 92% in hardness value in relation to the base material. With the solution containing borax, a borid layer with an average thickness of 35µm and 683HV was obtained, representing na increase of 111% in the hardness value in relation to the base material. For both solutions used, the Fe₂B phase was observed in X-ray diffractograms.

Keywords: Die-sinking EDM; AISI P20 steel; Disodium Octaborate Tetrahydrate (Na₂B₈O₁₃.4H₂O); Borax (Na₂B₄O₇.10H₂O).

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Classificação da boretação proposta por Kulka (2019)	21
Figura 2 - Esquema de boretação eletroquímica por plasma realizado no aço AISI	
2365 utilizando uma solução eletrolítica de bórax e hidróxido de sódio	
(NaOH)	23
Figura 3 - Interação dos íons e elétrons do plasma com a superfície catódica	25
Figura 4 - Micrografias da interface do substrato com a camada boretada polifásica	
de Fe ₂ B e FeB. Em (a) para aços de baixa liga e maior teor de ferro.	
Em (b) para aço com alto teor de Cr	26
Figura 5 - Diagrama de equilíbrio de fases Ferro-Boro	27
Figura 6 - Seção transversal da camada boretada de FeB e Fe2B no aço ABNT	
P20 a 950°C por 4h, utilizando pós de Ekabor II	29
Figura 7 - Seção transversal da camada boretada no aço ABNT P20 a 900°C por	
6h, utilizando pós de Ekabor	30
Figura 8 - Etapas da Usinagem por Descargas Elétrica: (1) Ignição, (2) Geração	
do canal de Plasma (3) Fusão e evaporação dos materiais do eletrodo	
peça e do eletrodo ferramenta (4) Limpeza parcial das micropartículas	
geradas	32
Figura 9 - Tempo de descarga elétrica (Ton), tempo sem descarga elétrica (Toff) e	
retração periódica do eletrodo ferramenta na usinagem por descargas	
elétricas	35
Figura 10 - Zona refundida e Zona afetada pelo calor, gerada no processo de	
usinagem por descargas elétricas	35
Figura 11 - Eletroerosão a penetração (S-EDM – Die-sinking Electrical Discharge	
Machining), Eletroerosão por corte a fio (W-EDM – Wire Electrical	
Discharge Machining), Fresagem por eletroerosão (M-EDM – Milling	
Electrical Discharge Machining).	36
Figura 12 - Condutividade elétrica necessária do material do eletrodo ferramenta,	
na usinagem por descargas elétricas	39
Figura 13- Frequência na usinagem por descargas elétricas em razão do	
acabamento a ser obtido na peça usinada	42
Figura 14 - Métodos de circulação do fluido dielétrico no processo de usinagem	
por descargas elétricas.	44

Figura 15 - Mecanismo de implantação iônica da nitretação por descargas
elétricas proposto por Santos (2013)47
Figura 16 - Espectro da difração de raio-x do aço ABNT P20 boretado a 875°C por
8h utilizando pós de Ekabor50
Figura 17 - Fluxograma das Etapas do Procedimento Experimental53
Figura 18 - Dimensões e região de usinagem das amostras do aço ABNT P20
utilizadas nos testes de boretação por plasma eletrolítico por descargas
elétricas54
Figura 19 - Máquina de eletroerosão adaptada para realizar os testes de boretação
por plasma eletrolítico por descargas elétricas
Figura 20 - Desenho esquemático do interior da cuba auxiliar ilustrando o
posicionamento dos eletrodos ferramenta e peça com a fenda de
trabalho, em conjunto com a bomba de sucção e a mangueira do jato
de saída da solução, para realizar os testes
Figura 21 - Região da usinagem no par de amostras (eletrodo peça), junto com o
eletrodo ferramenta para realização dos testes de boretação por
descargas elétricas. Dimensões em mm58
Figura 22 - Painel de controle da máquina SERVSPARK Eletroplus 540
Figura 23 - Amostra embutida após ser preparada com técnicas metalográficas
que foi submetida ao teste de boretação por plasma eletrolítico por
descargas elétricas61
Figura 24 - Condutividade elétrica da solução de octaborato de sódio
tetrahidratado (Na ₂ B ₈ O ₁₃ .4H ₂ O) em água deionizada na concentração
16,67g.L ⁻¹ medido a 23°C63
Figura 25 - Imagem de microscopia óptica da seção transversal da amostra
boretada por plasma eletrolítico por eletroerosão do aço ABNT P20,
utilizando solução eletrolítica de octaborato de sódio tetrahidratado em
água deionizada65
Figura 26 - Imagem de microscopia óptica da seção transversal da amostra
boretada por plasma eletrolítico por eletroerosão do aço ABNT P20,
utilizando solução eletrolítica de bórax em água deionizada66

Figura 28 - Imagem da seção transversal ilustrando as indentações produzidas por microdureza Vickers nas camadas do aço ABNT P20 boretado por

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Dureza, tratamento térmico e estado de fornecimento do aço ABNT P20	
comercialmente fornecido.	.18
Tabela 2 - Composição química (% em peso) do aço ABNT P20 conforme	
fornecido	. 19
Tabela 3 - Propriedades mecânicas do aço ABNT P20 fornecido com dureza de	
300HV e na forma temperado e revenido com 578HV	. 19
Tabela 4 - Algumas propriedades químicas e físicas dos boretos de ferro	.28
Tabela 5 - Boretos capazes de serem formados com elementos químicos de ferro	
e molibdênio	.29
Tabela 6 - Propriedades físicas do cobre eletrolítico e da grafita relevantes ao	
processo de usinagem por descargas elétricas.	. 39
Tabela 7 - Parâmetros operacionais e principais dados, utilizados nos testes de	
boretação por descargas elétricas.	.60
Tabela 8 - Parâmetros utilizados no ensaio de difração de raio-x	.62
Tabela 9 - Valores médios de microdureza Vickers das camadas da amostra	
boretada por plasma eletrolítico por eletroerosão do aço ABNT P20,	
utilizando solução eletrolítica de octaborato de sódio tetrahidratado	
em água deionizada	.67
Tabela 10 - Valores de microdureza Vickers das camadas da amostra boretada	
por plasma eletrolítico por eletroerosão do aço ABNT P20, utilizando	
solução eletrolítica de bórax em água deionizada	.68

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	: Associação Brasileira de Normas Técnicas
AISI	: (Instituto Americano do Ferro e Aço) American Iron and Steel Institute
CEFET	: Centro Federal de Educação e Tecnologia de Minas Gerais
CV	: Cavalo Vapor
DEMAT	: Departamento de Engenharia de Materiais
DRX	: Difração de raio-x
EDM	: (Usinagem por Descargas Elétricas) <i>Electrical Discharge</i> Machining
KVA	: Quilovoltampere
HV	: (Dureza Vickers) Hardness Vickers
m.c.a	: Metro de Coluna D'água
M-EDM	: (Usinagem por Descargas Elétricas de Fresagem) Milling Electrical Discharge Machining
MEV	: Microscópio Eletrônico de Varredura
МО	: Microscopia Óptica
NDE	: Nitretação por Descargas Elétricas
Rpm	: Rotação por Minuto
S-EDM	: (Usinagem por Descargas Elétricas por Penetração) Die- Sinking Electrical Discharge Machining
W-EDM	: (Usinagem por Descargas Elétricas a Fio) Wire Electrical Discharge Machining

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO 1	3
າ. ວ		6
2.		-
3.	OBJETIVOS	1
3.1.	Objetivo geral1	7
3.2.	Objetivos Específicos1	7
4.	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA1	8
4.1.	Aço ABNT P201	8
4.2.	Generalidades da Boretação1	9
4.2.1.	Boretação do Aço ABNT P202	8
4.3.	Princípios Básicos e Fundamentos da Usinagem por Descargas Elétricas3	0
4.3.1.	Principais Processos de Usinagem por Descargas Elétricas	6
4.3.2.	Eletrodo Ferramenta na Usinagem por Descargas Elétricas	7
4.3.3.	Parâmetros da Usinagem por Descargas Elétricas4	0
4.3.4.	Generalidades do Fluido Dielétrico4	2
4.4.	Boretação na Usinagem por Descargas Elétricas4	4
4.5.	Octaborato de Sódio Tetrahidratado (Na ₂ B ₈ O ₁₃ .4H ₂ O)4	8
4.6.	Bórax (Na ₂ B ₄ O ₇ .10H ₂ O)4	9
4.7.	Caracterização de Boretos no Aço ABNT P20 pela Difração de raio-x5	0
5.	PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL	2
5.1.	Eletrodo Ferramenta e Amostras5	4
5.2.	Soluções eletrolíticas de octaborato de sódio tetrahidratado (Na ₂ B ₈ O ₁₃ .4H ₂ O) e bórax (Na ₂ B ₄ O ₇ .10H ₂ O)	4
5.3.	Máquina de Usinagem por Descargas Elétricas adaptada5	5
5.4.	Microscopia Óptica6	0
5.5.	Microdureza Vickers	1
5.6.	Difração de raio-x6	1

6.	RESULTADOS E DISCUSSÃO	.63
6.1.	Microscopia Óptica	.64
6.2.	Microdureza Vickers	.67
6.3.	Difratograma de Raio-x	.71
7.	CONCLUSÃO	.75
8.	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	.77
REF	ERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	.78

1. INTRODUÇÃO

O surgimento da EDM, segundo Kumar *et al.* (2009), teve origem por volta de 1770 quando o inglês Joseph Priestly descobriu a erosão provocada pelas descargas elétricas nos materiais metálicos. Porém, segundo El-hofy (2005), somente a partir de 1930 e meados da década de 1940, em consequência da segunda guerra mundial, o processo teve um avanço tecnológico. Pesquisadores designados pelo governo soviético estudaram o fenômeno das faíscas geradas por descargas elétricas em eletrodos submersos em óleo, que eram mais uniformes do que no ar.

Na década de 1950 iniciou-se a fabricação de máquinas EDM em larga escala, porém o desempenho delas era limitado devido à má qualidade dos componentes existentes na época. Já na década seguinte, pesquisas direcionadas a solução de problemas relacionados a modelamento matemático e servo controladores promoveram significativas melhorias. Posteriormente, na década de 1970 surge a tecnologia da EDM por corte a fio e o aprimoramento contínuo dos geradores elétricos e controladores empregados no processo (ABBAS *et al.*, 2007).

Durante o processo de usinagem por descargas elétricas a alta energia promove a erosão do material. Dentro do canal de plasma podem conter partículas de material da peça, do eletrodo ferramenta e do fluido dielétrico. Todos esses elementos presentes durante o processo, aliado a alta energia pode modificar a superfície da peça gerando camadas com diferentes propriedades químicas e físicas. Trabalhos realizados por Sahu *et al.* (2018) indicam que a pirólise do fluído dielétrico também pode contribuir para o enriquecimento na superfície usinada.

Pesquisadores têm se apropriado da técnica de usinagem por descargas elétricas para modificar a superfície dos materiais utilizando diferentes soluções em substituição ao fluido dielétrico convencional, aplicados tanto em materiais ferrosos e não ferrosos, como em ligas de alumínio silício. (FERNANDES, 2020). Camargo *et al.* (2008) e Santos *et al.* (2019) obtiveram sucesso ao utilizar a ureia como fonte de nitrogênio para aplicar o processo de nitretação por descargas elétricas, denominado por eles como NDE, ao usinar a liga de titânio Ti₆Al₄V. De forma similar, Santos (2013) também demonstra ter obtido sucesso na nitretação por descargas elétricas do aço

ABNT 4140. Já se tratando da boretação, Nascimento *et al.* (2022) relatam êxito ao boretar o aço ABNT 8620, utilizando a usinagem por descargas elétricas em conjunto com uma solução de octaborato de sódio tetrahidratado (Na₂B₈O₁₃.4H₂O) diluído em água deionizada. Embora cada pesquisa tenha sua peculiaridade, trabalhos de nitretação e boretação por descargas elétricas em diferentes materiais ferrosos, são citados no texto, devido à similaridade existente entre o mecanismo de implantação iônica do elemento nitrogênio e do elemento boro na superfície do material.

Cementação, nitretação, carbonitretação e boretação são classificados como processos de tratamentos termoquímicos capazes de formar camada endurecida no material. De forma generalizada os processos termoquímicos favorecerem ao aumento da resistência ao desgaste, a fadiga e a corrosão, aumentando a vida útil do componente. Segundo Krukovich, Prusakov e Sizov (2016) a boretação pode ser realizada alternativamente, por meio da mistura de pós, que podem ser fluidizados e utilizados como fonte de boro na boretação por descargas elétricas.

O aço ABNT P20, é muito utilizado para confecção de moldes de injeção e sopro de polímeros, por apresentar boa resistência ao trabalho a quente. Possui usinabilidade favorável, mesmo na condição beneficiado, como é comercialmente encontrado com dureza entre 280 a 310HB. Moldes de injeção e sopro de polímeros, comumente necessitam de boa resistência a deformações, mantendo suas dimensões e propriedades mecânicas, mesmo no trabalho a quente. Para que estas características sejam obtidas, na maioria das vezes, o material deve ser endurecido por algum tipo de tratamento térmico ou termoquímico. Dependendo da dureza, a usinabilidade fica comprometida, e métodos convencionais como o de torneamento, fresamento e furação são inviáveis. Sendo assim, processos como, retificação e usinagem por descargas elétricas, são recomendados.

Este trabalho apresenta um estudo da boretação por plasma eletrolítico do aço ABNT P20, em simultaneidade a usinagem por descargas elétricas. Em substituição do fluido dielétrico convencional, duas soluções eletrolíticas, fontes de boro, foram utilizadas separadamente. Uma solução contendo octaborato de sódio tetrahidratado (Na₂B₈O₁₃.4H₂O) e outra contendo bórax (Na₂B₄O₇.10H₂O). Ambas soluções eletrolíticas foram preparadas com água deionizada. No experimento são realizados

ensaios de microdureza Vickers, microscopia óptica, e difração de raio-x, para caracterização das camadas formadas. Contudo, a boretação por descargas elétricas, com adequações para a produtividade e demanda industrial, pode promover redução de custos operacionais e de tempo, quando comparado à tratamentos de boretação convencionais.

2. JUSTIFICATIVA

O aço ABNT P20 tem grande utilização, principalmente na indústria de ferramentaria, na fabricação de moldes de injeção e sopro de polímeros. Muitas das vezes, este seguimento industrial, tem grande demanda na fabricação de peças pelo processo de EDM. Adicionalmente, grande parte desses componentes, necessitam de algum tratamento de endurecimento superficial, como a exemplo, a boretação (DOSSETT e TOTTEN, 2014).

Os tratamentos térmicos e termoquímicos, ocasionam deformações geométricas em componentes acabados ou semiacabados. Muitas vezes, para eliminar estas deformações, retrabalhos de usinagem são necessários. A retificação e a EDM, são indispensáveis nestes casos, quando os materiais a serem usinados apresentam elevada dureza (SALEH e BAHAR, 2017).

O tratamento termoquímico de boretação, como os métodos de implantação iônica de boro e de alta energia, exigem alta tecnologia para serem utilizados, no entanto, têm baixa aplicabilidade e alto custo, quando comparado aos outros meios de boretação (NOVAKOVA *et al.*, 2004; KULKA, 2019). Contudo, o presente trabalho sugere como alternativa, um processo que possibilita realizar a usinagem de peças por descargas elétricas, em simultaneidade ao endurecimento superficial da peça, por meio da formação de uma camada boretada. Esse processo com adequações para a produtividade e demanda industrial, pode levar a redução de custos operacionais e de tempo, em comparação aos tratamentos de boretação convencionais.

Mais estudos são necessários relacionados a boretação por plasma eletrolítico utilizando a EDM, mas mesmo assim, esse trabalho complementa-se por meio de estudos da boretação tradicional, realizados no aço ABNT P20 e a trabalhos de boretação na EDM, embora alguns deles, sejam aplicados a outros materiais ferrosos.

3. OBJETIVOS

3.1. Objetivo geral

Este trabalho visa avaliar a formação de uma camada boretada a partir da usinagem por descargas elétricas em amostras de aço ABNT P20 utilizando soluções aquosas contendo octaborato de sódio tetrahidratado e bórax diluído água deionizada como fonte de boro

3.2. Objetivo Específico

- Realizar a usinagem por descargas elétricas do grupo de amostras com a solução de octaborato de sódio tetrahidratado (Na₂B₈O₁₃.4H₂O) em água deionizada e depois de outro grupo com bórax (Na₂B₄O₇.10H₂O) também em água deionizada, utilizando eletrodos ferramenta de cobre eletrolítico distintos para cada teste.
- Identificar alterações morfológicas e microestruturais na superfície das amostras dos aços, avaliando e medindo a espessura das camadas obtidas por meio de microscopia óptica.
- Mensurar a dureza das camadas formadas nos aços por meio de ensaios de microdureza Vickers.
- Caracterizar os boretos formados nas amostras pelo ensaio de difração de raiox.

4. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Nesta revisão bibliográfica, são abordados assuntos referentes a boretação tradicional empregada nos materiais ferrosos, com especial atenção naquelas realizadas no aço ABNT P20. Em sequência são revisados, conceitos sobre a EDM, juntamente com seus principais aspectos, eletrodos ferramenta, parâmetros e fluidos dielétricos utilizados. A revisão apresenta estudos sobre a boretação na EDM e também sobre características do octaborato de sódio tetrahidratado (Na₂B₈O₁₃.4H₂O) e bórax (Na₂B₄O₇.10H₂O). Ao término são revisadas generalidades da difração de raio-x, aplicada ao aço ABNT P20.

4.1. Aço ABNT P20

Segundo Soares (2009), o aço ABNT P20 conhecido como aço para moldes é encontrado pré-tratado com dureza Vickers de aproximadamente 315HV, apresenta boa resistência ao trabalho a quente, elevada tenacidade, boa aptidão para a eletroerosão, polimento e texturização. Dentro da indústria de moldes, tem a particularidade de ser aplicado principalmente nas ferramentas de grandes dimensões, com espessura superior a 400mm, ou em casos onde não necessita de tratamento térmico posterior de beneficiamento, ou dispensa a utilização de materiais de maior custo com propriedades superiores.

A Tabela 1 apresenta o estado comum de fornecimento do aço ABNT P20 com sua respectiva dureza. A dureza comumente fornecida do aço ABNT P20 melhora seu desempenho na aplicação de moldes de injeção e sopro de polímeros, não comprometendo significativamente a sua usinabilidade.

Tabela 1 - Dureza, tratamento térmico e estado de fornecimento do aço ABNT P20)
comercialmente fornecido.	

MATERIAL	TRATAMENTO	ESTADO DE	DUREZA
	TÉRMICO	FORNECIMENTO	(HV)
ABNT P20 Beneficiamento (têmpera+revenimento)		Laminado, forjado e/ou usinado	294 a 326

Fonte: Adaptado de Gerdau, 2003.

De acordo com Costa (2010), diferentes classes podem ser encontradas para o aço ABNT P20, no entanto a principal variante é com adição de cerca de 1% de níquel o (ABNT P20+Ni ou P20 mod) que aumenta a resistência ao impacto, a resistência à corrosão e a polibilidade. Se o Níquel for adicionado em maiores concentrações pode obter-se uma liga com coeficiente de expansão térmica próximo de zero.

Na Tabela 2 é apresentada a composição química (% em peso) do aço ABNT P20.

Tabela 2 - Composição química (% em peso) do aço ABNT P20 conforme fornecido.

ELEMENTO	С	Mn	Р	S	Si	Cr	Мо	Fe
%min-	0,28-	0,60-	máx	máx	0,20-	1,40-	0,30-	balanço
máx	0,40	1,00	0,03	0,03	0,80	2,00	0,55	

Fonte: Adaptado de Gerdau, 2003.

Harvey (1982) relata que na condição pré-tratado com dureza próxima de 300HV, como é comercialmente fornecido, o aço para moldes ABNT P20 pode ter suas cavidades acabadas por processos de usinagem convencionais como torneamento, fresagem e furação, sendo colocado diretamente em serviço nas mais diversas aplicações, onde não demandam maior dureza e resistência mecânica. Na Tabela 3 são apresentadas propriedades mecânicas do aço ABNT P20 na dureza de fornecimento de 300HV e na forma temperado e revenido com 578HV.

Tabela 3 - Propriedades mecânicas do aço ABNT P20 fornecido com dureza de 300
HV e na forma temperado e revenido com 578HV.

Dureza (HV)	Limite de Limite de eza (HV) resistência escoamento (MPa) (MPa)		Alongamento (%)	Redução de área (%)
300	995	895	17,5	59,3
578	1960	1360	11	35

Fonte: Adaptado de Harvey, 1982.

4.2. Generalidades da Boretação

Mischler e Munoz (2013) e Türkmen *et al.* (2019) apontam que uma das alternativas comumente utilizadas para aumentar a resistência ao desgaste superficial dos

materiais, em conjunto com uma boa tenacidade do núcleo, é submetendo o material a tratamentos termoquímicos como os de nitretação, cementação, boretação e carbonitretação.

Segundo Gunes et al. (2013); Keddam e Taktak (2017) e Chen, Foo e Tsang (2021), elementos químicos como o átomo de nitrogênio com raio atômico de 65pm, carbono com 70pm e o de boro com 85pm, são relativamente pequenos quando comparados a outros elementos. Nitrogênio, carbono ou boro podem difundir intersticialmente no substrato reagindo com alguns elementos do material а ser tratado termoquimicamente. No caso da boretação, formando compostos intermetálicos denominados boretos.

Silva *et al.* (2018) descrevem a boretação como sendo um processo termoquímico realizado a elevadas temperaturas onde ocorre a difusão de átomos de boro dentro dos interstícios do material. De acordo com Şeşen *et al.* (2017) e Silva *et al.* (2017) o elemento boro provindo de uma fonte boretante, reage com o material base, formando uma camada rica de boretos, que promovem melhoria das propriedades físicas e químicas do material. O aumento dessas propriedades está relacionado principalmente à microestrutura da camada formada, do agente boretante e do material base. De acordo com Tabur *et al.* (2009) a boretação aumenta consideravelmente as propriedades tribológicas do material.

Dentre as diversas classificações na literatura para os processos de boretação, Krukovich, Prusakov e Sizov (2016) propõem uma complexa divisão mais detalhada aplicada a materiais ferrosos. Já a proposta por Przybyłowicz (2000) é baseada apenas nos aspectos tecnológicos empregados na boretação. Kulka (2019) e García-León, Martínez-Trinidad e Campos-Silva (2021) apresentam vários meios de realizar a boretação em ligas ferrosas e não ferrosas, sendo divididas em técnicas químicas e físicas. As técnicas físicas são subdivididas, em implantação iônica de boro e método de alta energia. Por outro lado, as técnicas químicas de boretação podem ser realizadas em meio sólido, líquido ou gasoso. Portanto, diante de diversas classificações, de modo generalizado Kulka (2019) propõe uma classificação atualizada para boretação, realizada em materiais ferrosos e não ferrosos, apresentado na Figura 1.



Figura 1 - Classificação da boretação proposta por Kulka (2019)

Na boretação química sólida, podem ser utilizados pós ou pastas, porém dependendo da substância adicionada a pasta, essa mistura pode se apresentar em estado líquido, como por exemplo ao utilizar a criolita (Na₃AIF₆). Na boretação química sólida, as peças são colocadas em uma caixa, e cobertas com substâncias ou misturas boretantes, em conjunto com ativadores, que têm a função de acelerar os mecanismos de difusão. Depois, as peças são aquecidas entre 850 a 1000°C, por intervalos de tempo recomendados, que variam entre 1 a 10 horas. As substâncias boretantes utilizadas podem ser: Boro cristalino ou amorfo, carbeto de boro (B₄C), óxido de boro (B₂O₃), misturas comerciais de ekabor, polibor ou durborid. Como ativadores podem ser utilizados: fluoreto de sódio (NaF), fluoreto de potássio (KF), fluoreto de alumínio (AIF₃), cloreto de sódio (NaCI), tetrafluorborato de potássio (KBF₄), hidrogenoftalato de potássio (KHF), borato de sódio ou tetraborato de sódio também conhecido como bórax (Na₂B₄O₇.10H₂O). A boretação sólida é um processo comumente utilizado por apresentar menor toxibilidade, tendendo a ser mais econômico tecnologicamente, devido a simplicidade dos equipamentos necessários (KULKA, 2019).

Fonte: Adaptado de Kulka, 2019.

Segundo Kulka (2019) e Keddam *et al.* (2020), na boretação química líquida, o tratamento pode ser realizado em banhos de sal fundido de cloreto, flúor ou carbonato usando redutores com boro, como carbeto de boro (B₄C), ferro-boro (Fe-B) e níquelboro (Ni-B). Podem ser utilizados também, banhos de boratos fundido em bórax, com ou sem redutores de boro. Outros meios quase líquidos contendo o elemento boro como eletrólitos hidratados, também podem ser utilizados.

Taktak (2007) realizou a boretação eletroquímica do aço AISI H13, por meio da eletrólise por plasma. Este tratamento consiste na aplicação de potencial elétrico entre dois eletrodos imersos em solução eletrolítica. As temperaturas e tempo envolvidas dependem do banho utilizado, mas em geral se assemelham a boretação em meio sólido. Tendo como principal vantagem da boretação de eletrólise por plasma, a alta produtividade. Necessitando em geral somente da imersão das peças no banho. Porém em muitos casos, a boretação líquida é inviável, por ser ecologicamente agressiva (KEDDAM *et al.*, 2020).

Segundo Gupta et al. (2007) e Akyüz e Tek (2015) na eletrólise por plasma, a corrente elétrica aplicada, gera um campo elétrico entre os dois eletrodos e em meio ao eletrólito. Quando o canal de plasma que foi gerado é estabilizado, ocorre uma concentração de íons positivos próximo ao cátodo, permitindo a passagem de corrente elétrica. De acordo com Jiang, Bao e Wang (2017) interações termoquímicas acontecem entre os átomos de boro que estão presentes no eletrólito, com substrato metálico, formando uma camada com boretos metálicos sobre a superfície do material. A principal diferença entre a eletrólise tradicional e a eletrólise por plasma, é que na eletrólise por plasma, o potencial elétrico e a temperatura atingida no processo é consideravelmente maior (MELETIS et al., 2002) e (GALEDARI e KHOEI, 2013). A Figura 2 mostra o esquema de boretação eletroquímica por plasma, realizado por Akyüz e Tek (2015) no aço AISI 2365. Como eletrólito foi utilizado uma solução eletrolítica de bórax (Na₂B₄O₇.10H₂O) e hidróxido de sódio (NaOH). Durante o processo foi aplicada uma tensão pulsada de 1050 volts na frequência de 35 pulsos por minuto, gerando uma temperatura máxima de 50°C medida no eletrólito. A amostra do aço AISI 2365 foi posicionada como cátodo e como ânodo foi utilizado um eletrodo de aço inoxidável.

Figura 2 - Esquema de boretação eletroquímica por plasma realizado no aço AISI 2365 utilizando uma solução eletrolítica de bórax e hidróxido de sódio (NaOH).



Fonte: Akyüz e Tek, 2015.

De acordo com Jumbad *et al.* (2020) a combinação de plasma e eletrólise propicia o tratamento superficial de diversos metais. O calor aplicado ao eletrólito muda o estado, de líquido para gasoso, gás este que aquecido libera elétrons e íons positivos ao separar as partículas contidas no mesmo. O aquecimento promovido pelo deslocamento dos elétrons e íons é utilizado em tratamentos. A pesquisa foi aplicada observando-se uma nova técnica de boretação, baseada em uma abordagem eletroquímica, semelhante ao trabalho experimental de Kaouka, Allaoui e Keddam (2013).

A boretação química gasosa pode ser realizada utilizando principalmente gases de haletos e boranos. Como exemplo de haletos, o tricloreto de boro (BCl₃) utilizado geralmente em conjunto com gás de hidrogênio como fonte de transporte de boro. Como boranos, utilizam-se o diborano (B₂H₆) e trimetilborano (CH₃)₃B. O processo é realizado em atmosfera de baixa pressão, geralmente, no vácuo com adição de hidrogênio ou argônio como proteção. Uma fonte de energia promove a ionização e o aquecimento dos gases, entre 850 a 1000°C. Nesta faixa de temperatura o boro é absorvido e difundido no material, formando camadas endurecidas. Devido a toxibilidade de alguns dos gases empregados e da dificuldade tecnológica em obter

os equipamentos necessários, a tecnologia de boretação química gasosa é pouco utilizada (SINHA, 1981; KULKA, 2019).

Na boretação física por implantação de boro, elementos sólidos de boro são acelerados em direção a superfície do material a ser boretado, utilizando um canhão implantador de boro ou canhões de plasma. Geralmente, a boretação física por implantação de boro é utilizada na fabricação de componentes eletrônicos semicondutores e células solares. Nos métodos de alta energia tem-se principalmente a boretação por feixe de elétrons. De acordo com a tecnologia empregada, pode ser utilizado também o laser ou plasma, que boreta a superfície do material por refusão de boro. Os processos de refusão de boro por laser ou plasma, formam boretos refundidos ou difundidos no material com elevada dureza (NOVAKOVA *et al.*, 2004; KULKA, 2019).

Segundo Pfender *et al.* (1987), o plasma contém espécies neutras e eletricamente carregadas de elétrons, íons positivos, íons negativos, fótons, átomos e moléculas. De acordo com Nascimento Neto (2006) por ser uma tecnologia limpa, o plasma tem sido empregado como tratamento de superfícies metálicas, em substituição aos processos tradicionais, químicos ou mecânicos.

Fauchais, Boulos e Pfender (1987) relatam que a colisão dos íons com o meio boretante nos processos por plasma, ocasionam o transporte do elemento boro a ser implantado para a superfície. De acordo com Frank-Kamenetskii (2012), dentro do sistema estão envolvidas energias termoelétricas, radiantes e eletromagnéticas das mais diversas frequências, produzindo reações termo-físicas e termo-químicas de alta complexidade. De acordo com Zagonel (2006), as moléculas ionizadas ao atingirem a superfície se dissociam, e os átomos resultantes são implantados a uma determinada profundidade.

A Figura 3 ilustra esquematicamente as prováveis reações físico químicas que ocorrem na superfície do substrato e na interface plasma metal.



Figura 3 - Interação dos íons e elétrons do plasma com a superfície catódica

Fonte: Chapman, 1980.

Mehrer (2007) afirma que tanto o mecanismo da boretação por implantação iônica de boro quanto o de alta energia a plasma, exigem processos sofisticados de elevado custo quando comparado aos demais métodos. No entanto, em meio a tantos mecanismos de boretação possíveis, Porter (2009) afirma que o mecanismo de difusão está diretamente relacionado entre o tamanho dos átomos da solução boretante, com o tamanho dos interstícios e dos átomos majoritários da matriz.

A camada boretada apresenta elevada dureza, com boa resistência ao desgaste e baixo coeficiente de atrito, tendo também uma boa resistência a corrosão e oxidação. Boretos de ferro (como FeB e Fe₂B) são muito comuns de serem formados no tratamento de materiais ferrosos. A boretação geralmente produz camadas com uma resistência tribológica superior aos tratamentos de superfície convencionais, como nitretação, cementação e carbonitretação. Dependendo da liga ferrosa submetida ao processo, podem ser obtidas durezas próximas ou até superiores a 2000 Vickers (AN *et al.*, 2012; GÖK *et al.*, 2017; SKRÓCIE, 2021).

Geralmente boretos do tipo Fe₂B são desejáveis visto que apresentam maior resistência a fratura, altas tensões compressivas na superfície da matriz. Abaixo das camadas de boretos pode ocorrer a presença de uma camada rica em carbono, pois o mesmo é forçado a difundir na superfície da peça. Nas interfaces entre camada e substrato, geralmente ocorre a formação de dentes, quando são realizados tratamentos em materiais de baixa liga e de baixo teor de carbono. Esta característica

está relacionada com a quantidade de ferro presente no material, conforme é mostrado na Figura 4. Para aços de alta liga esta interface, se torna plana, pois elementos de liga diminuem a difusão de boro no material, produzindo camadas de menor espessura (CAMPOS-SILVA *et al.*, 2010).

Figura 4 - Micrografias da interface do substrato com a camada boretada polifásica de Fe₂B e FeB. Em (a) para aços de baixa liga e maior teor de ferro. Em (b) para aço com alto teor de Cr



Fonte: Martini, Palombarini e Carbucicchio, 2004.

Brakman, Gommers e Mittemeijer (1989) relatam que inicialmente na boretação dos materiais ferrosos, ocorre a formação dos boretos Fe₂B na superfície do material. À medida que a quantidade desses boretos aumenta, forças de cristais adjacentes fazem com que cresçam dentro do material. Em sequência boretos do tipo FeB se desenvolvem sobre a camada dos boretos de Fe₂B. Camadas monofásicas de Fe₂B ou polifásicas de Fe₂B e FeB podem ser formadas dependendo do tempo, temperatura, agente boretante e material a ser boretado. A Figura 5 ilustra o diagrama de equilíbrio Ferro-Boro, a difusão do boro na rede cristalina do ferro leva à formação dos boretos.



Figura 5 - Diagrama de equilíbrio de fases Ferro-Boro

Fonte: Adaptado de Allaoui, Bouaouadja e Saindernan, 2006.

Na boretação pode existir uma camada fina externa de boretos, que quando submetidos a ensaios de desgaste, inicialmente apresenta um alto coeficiente de desgaste, devido a presença de cristais desordenados de maior fragilidade. Portanto, esse valor diminui recuperando a resistência ao desgaste ao atingir FeB. Depois esse coeficiente de desgaste volta a aumentar em direção ao boreto Fe₂B e ao substrato. Em geral camadas boretadas, apresentam excelentes propriedades tribológicas e anticorrosivas, com espessuras variando de 21 a 380µm (SEN, 2005).

Na Tabela 4 são apresentadas algumas propriedades dos boretos de ferro formado pelo processo de boretação.

	FeB	Fe ₂ B	
Teor de boro (% em massa)	16,23	8,83	
Estrutura	ortorrômbica	tetragonal de corpo centrado	
Parâmetro de rede (Å)	a = 4,053 b = 5,495 c = 2,946	a = 5,078 c = 4,249	
Densidade (g/cm ³)	6,75	7,43	
Coeficiente de expansão térmica, entre 200 e 600°C (10 ⁻⁶ °C ⁻¹)	23	7,65	
Módulo de elasticidade (GPa)	590	285-295	

Tabela 4 - Algumas propriedades químicas e físicas dos boretos de ferro.

Fonte: Heck, 2010.

4.2.1. Boretação do Aço ABNT P20

Segundo Harvey (1982), o aço ABNT P20 é ligado ao cromo e molibdênio, sendo equivalente ao AISI P20, UNS T51620, ASTM A681 e DIN 1.2330. Hudok (1990) afirma que o aço AISI P20 geralmente é encontrado pré-tratado termicamente, com uma dureza que lhe confere um desempenho satisfatório em moldes de injeção de polímeros, sem comprometer a sua usinabilidade. Devido a essa condição de pré-tratamento, geralmente não são necessários outros tratamentos de endurecimento, evitando deformações no material. Porém, de acordo com Dossett e Totten (2014), quando é requerido uma maior resistência ao desgaste, deformação e oxidação dos moldes, tratamentos posteriores como o de cementação, nitretação ou boretação são necessários. Na Tabela 5 são mostradas fases de boretos capazes de serem formados com elementos químicos ferro, que estão presentes no aço ABNT P20 e foram tabulados por Dossett e Totten (2014).

ELEMENTO	BORETO	MICRODUREZA (HV)	PONTO DE FUSÃO (°C)
Fe	FeB	1900-2100	1390
	Fe ₂ B	1800-2000	-

Tabela 5 - Boretos capazes de serem formados com elementos químicos de ferro e molibdênio.

Fonte: Adaptado de Dossett e Totten, 2014.

Kayali (2015) realizou a boretação do aço AISI P20 em caixa, utilizando como fonte de boro pós de Ekabor II. Após decorrer o tempo da boretação, a amostra foi retirada do forno e resfriada ao ar livre. Uma camada polifásica com espessura variando de 26 a 143µm foi obtida. Os testes foram realizados com temperaturas variando de 850 a 950°C. O tempo de tratamento foi de 2 a 6h, sem utilização de atmosfera com gás inerte. A dureza Vickers de 1489 a 1897HV foi obtida na camada boretada. Na Figura 6 é apresentada a microestrutura do material obtida na boretação realizada a 950°C por 4h.





Fonte: Kayali, 2015.

Outro trabalho realizado no aço ABNT P20 foi de Uslu *et al.* (2007), onde relataram terem encontrado boretos do tipo FeB, Fe₂B, CrB inclusive MnB. Camadas boretadas entre 18 a 180µm de espessura com dureza próxima de 1650HV foram medidas. O

tratamento foi realizado com temperatura variando de 800 a 950°C, e tempo de 2 a 8h. Pós de Ekabor foi utilizado como fonte de boro. A Figura 7 mostra a camada boretada no aço ABNT P20 para um tratamento realizado a 900°C por 6h.



Figura 7 - Seção transversal da camada boretada no aço ABNT P20 a 900°C por 6h, utilizando pós de Ekabor.

Fonte: Uslu et al., 2007.

4.3. Princípios Básicos e Fundamentos da Usinagem por Descargas Elétricas

De forma generalizada, segundo Mcgeough (1988); Fuller (1989) e Mohanty, Mahapatra e Singh (2017), o processo de EDM tem as seguintes características:

- É definido como sendo um processo de usinagem não convencional, aplicado na fabricação de peças condutoras de eletricidade;
- Utiliza um fio na usinagem por descargas elétricas a fio (W-EDM Wire Electrical Discharge Machining) ou um eletrodo ferramenta na usinagem por descargas elétricas a penetração (S-EDM – Die-sinking Electrical Discharge Machining). O eletrodo ferramenta ou fio devem ter boa condutividade elétrica, térmica e elevado ponto de fusão. Na S-EDM o eletrodo ferramenta deve ser previamente moldado de acordo com a forma a ser obtida da cavidade no eletrodo peça;

- O eletrodo ferramenta ou fio são controlados por servo mecanismo que o aproxima do eletrodo peça, a uma distância de trabalho (*gap*) de 5 a 100µm, dependendo dos parâmetros elétricos utilizados. Durante a usinagem esta aproximação é feita sem que ocorra contato ou esforço mecânico com a peça;
- Na aproximação do eletrodo ferramenta ou fio ao eletrodo peça, uma série de pulsos elétricos e faíscamento são gerados por uma fonte altamente controlável;
- A alta energia termoelétrica gerada pelo canal de plasma, levam a fusão e vaporização de parte do material, preferencialmente em maior quantidade do eletrodo peça, e em menor quantidade do eletrodo ferramenta. Com isso a réplica da geometria do eletrodo ferramenta é transferida para a superfície trabalhada do eletrodo peça, acrescido do sobrecorte gerado pela fenda de trabalho. Se tratando da W-EDM, o corte é realizado pelo diâmetro do fio também acrescido da fenda de trabalho;
- Geralmente durante o processo de EDM é empregado um fluido dielétrico que atua principalmente no resfriamento da interface do eletrodo peça-ferramenta ou do fio-peça na W-EDM. O fluido dielétrico também ajuda na eliminação de parte das micropartículas do material erodido pelo canal de plasma e na sua estabilização.

O processo de usinagem por descargas elétricas, também conhecido como eletroerosão, é muito utilizado principalmente na indústria de ferramentaria, para fabricação de moldes de injeção de polímeros ou alumínio, e também, em moldes de fundição de ligas não ferrosas. É empregado na usinagem de materiais metálicos sem esforço de corte, mesmo que tenham elevada dureza (AMORIM *et al.*, 2002; ARANTES *et al.*, 2003; HO e NEWMAN, 2003; EL-HOFY, 2005; PANDEY, SINGH, 2010). Geometrias complexas são obtidas com elevada exatidão dimensional, como por exemplo: em cavidades estreitas e profundas de moldes, ressaltos de pequena espessura que deformariam na usinagem convencional, cantos retos internos de cavidades que geralmente produzem raios quando usinado por exemplo por

fresamento. As geometrias são obtidas praticamente isentas de rebarba (FREDRIKSSON e HOGMARK, 1995; LEE, HSU e TAI, 2004; SANTOS, 2007).

Segundo Ekönig e Klocke (1996); Stevens (1998); Amorim *et al.* (2002); Santos (2013), o princípio da EDM se baseiam em quatro etapas mostradas na Figura 8.





Fonte: Ekönig e Klocke, 1996.

As quatro etapas são:

(1) Ignição: com o sistema energizado a ignição acontece com o eletrodo ferramenta aproximado a uma distância de 0,05 a 1mm, aproximadamente, do eletrodo peça. Essa distância depende principalmente dos parâmetros de corrente e tensão regulados na máquina. Com essa aproximação ocorre um aumento do campo elétrico entre o eletrodo peça (ânodo), e eletrodo ferramenta (cátodo), quando considerado a polarização positiva no eletrodo ferramenta. Nessa polarização usual, elétrons do eletrodo ferramenta (cátodo) são acelerados em direção ao eletrodo peça (ânodo), promovendo uma ionização por impacto com o fluido dielétrico ou atmosfera circundante. Essa movimentação provoca liberação de íons positivos do fluido dielétrico que estava eletricamente estável. Variações de corrente, tensão e consequentemente condutividade elétricas são constantemente monitorados pelo sistema de controle, para adequada aproximação pelos servos mecanismos e geração de pulso de corrente elétrica, durante todas as etapas.

(2) Geração do canal de plasma: a geração do canal de plasma é a continuação das reações da etapa anterior. Nesta etapa, íons positivos liberados anteriormente do fluido dielétrico ou do meio circundante, são agora acelerados contra o eletrodo ferramenta (cátodo). O impacto desses íons positivos com o eletrodo ferramenta (cátodo) gera liberação de mais elétrons de alta energia que são acelerados novamente contra o eletrodo peça (ânodo) colidindo novamente contra o fluido dielétrico. Essas reações em cadeia de alta velocidade e energia termoelétrica gera um aquecimento e diminuição da resistividade elétrica do fluido dielétrico, formando bolhas de gás no mesmo. O gás formado ionizado de elevada pressão gera a formação de um canal de plasma que é estabilizado pelo sistema de controle, gerador de pulsos e servomecanismo.

(3) Fusão e evaporação dos materiais do eletrodo peça e do eletrodo ferramenta: nessa terceira etapa devida a alta temperatura e pressão alcançada pelo canal de plasma, ocorre a fusão de parte do material das superfícies. O desejável é que esta fusão concentre em maior volume no eletrodo peça, mais é inevitável que aconteça também o desgaste do eletrodo ferramenta. Segundo Cruz *et al.* (1999); Amorim *et al.* (2002) estima-se alcançar temperaturas superiores a 8000K na região do plasma. Com a interrupção da corrente elétrica na fração de milissegundos gerada pela frequência estabelecida no processo, o canal de plasma é extinto aumentando ainda mais a energia cinética dos íons. Essa aceleração e colisão dos íons se dá em maior parte na direção do eletrodo peça, por isso a fusão é acelerada nessa superfície. Também com a extinção do canal de plasma acontece uma redução na pressão e temperatura do local o que leva a formação de micropartículas solidificadas e evaporadas, formando assim, uma camada refundida de grande concentração na

superfície do eletrodo peça, enquanto outras dessas partículas são resfriadas e eliminadas na última parte do processo.

(4) Limpeza parcial das micropartículas geradas: a limpeza parcial das micropartículas geradas é a última parte do processo. O principal objetivo nessa etapa é a remoção do material fundido e evaporado dos materiais que encontram-se em suspensão e foram gerados nas etapas anteriores. A presença dessas micropartículas na fenda de trabalho geralmente promove a sua deposição nas superfícies trabalhadas, e interferem nos mecanismos citados nas etapas anteriores. Sendo assim de forma mais genérica, a maior eliminação dessas micropartículas pelo fluido dielétrico, favorece no aumento da taxa de remoção de material do eletrodo peça. Na extinção do canal de plasma no instante, Toff, de microssegundos em que a corrente elétrica é cessada, o fluido dielétrico carrega parte dessas micropartículas para fora da fenda de trabalho, porém parte desse material ainda encontra preso nessa fenda. Com a repetição cíclica das etapas desde, Ton, na ignição (1), até a limpeza (4) no instante, Toff, ocorre um aumento significativo da temperatura e da quantidade das micropartículas dos materiais envolvidos na fenda de trabalho. Sendo assim, segundo Silva (2012), o eletrodo ferramenta pode ser configurado a afastar-se em uma maior distância do eletrodo peça, para promover maior eficiência na eliminação das micropartículas geradas e no resfriamento dos materiais envolvidos pelo fluido dielétrico conforme Figura 9. Essa configuração é aplicada na usinagem por descargas elétricas a penetração, podendo resultar na redução do desgaste provocado pelo processo no eletrodo ferramenta e até mesmo no aumento da taxa de remoção de material no eletrodo peça.
Figura 9 - Tempo de descarga elétrica (Ton), tempo sem descarga elétrica (Toff) e retração periódica do eletrodo ferramenta na usinagem por descargas elétricas.



Fonte: Silva, 2012.

A rápida dissipação de calor que flui pelo eletrodo peça, eletrodo ferramenta e fluido dielétrico pode provocar o aparecimento de poros, micro trincas na zona refundida e zona afetada pelo calor. Na Figura 10 são mostradas as diferentes camadas geradas no material usinado por descargas elétricas. A zona refundida geralmente apresenta alterações microestruturais e químicas, em consequência da temperatura e interações energéticas de partículas provindas do eletrodo ferramenta e fluído dielétrico, portanto, essa região tem propriedades físicas e químicas distintas do substrato do material (KUMAR *et al.*, 2009; RASLAN, 2015)

Figura 10 - Zona refundida e Zona afetada pelo calor, gerada no processo de usinagem por descargas elétricas.



Fonte: Kumar et al., 2009.

4.3.1. Principais Processos de Usinagem por Descargas Elétricas

A Figura 11 de Bleys *et al.* (2006) em conjunto com estudos de Jahan (2015) apresentam um descritivo de características e aplicabilidade dos principais processos de usinagem por descargas elétricas.

Figura 11 - Eletroerosão a penetração (S-EDM – Die-sinking Electrical Discharge Machining), Eletroerosão por corte a fio (W-EDM – Wire Electrical Discharge Machining), Fresagem por eletroerosão (M-EDM – Milling Electrical Discharge Machining).



Fonte: Bleys et al., 2006.

Eletroerosão a penetração (S-EDM – *Die-sinking Electrical Discharge Machining*): Utiliza um eletrodo ferramenta geralmente de cobre eletrolítico ou grafita, com geometria pré-usinada similar a aquela a ser copiada na peça. O eletrodo ferramenta é fixado em um suporte regulável, que permite ajustar a perpendicularidade com a mesa de trabalho ou a peça. Um servomecanismo é incorporado ao eixo vertical Z do eletrodo ferramenta, que em conjunto com a fonte geradora e controladora de pulsos, promove a penetração e controle das descargas elétricas em direção a peça, fixada em uma mesa de trabalho. A movimentação para posicionamento da região a ser erodida na peça é feita por meio de fusos e manivelas. Um fluido dielétrico é utilizado nesse e em todos os processos descritos

Eletroerosão por corte a fio (W-EDM – *Wire Electrical Discharge Machining*): A eletroerosão a fio utiliza principalmente fios de latão ionizados geralmente descartados após o uso, que são movimentados continuamente de uma roldana guia até a outra, por mecanismos de circulação. Os diâmetros dos fios geralmente variam de 0,1 a 0,25mm. Algumas máquinas podem utilizar fios de aço de alta resistência a tração, principalmente aqueles ligados ao cromo, níquel e molibdênio que são rebobináveis e reutilizados durante o processo de eletroerosão a fio. O fio tensionado

e guiado pelas roldanas passa em frente a peça a uma distância de trabalho, enquanto servomecanismos dispostos no eixo horizontal X, e transversal Y, em conjunto com a fonte geradora e controladora de pulsos, controlam as descargas nas interfaces fiopeça. De forma contínua o fio é transladado pelos servomecanismos com base no contorno programado via comando numérico computadorizado (CNC - *Computer Numeric Control*). Em simultaneidade as descargas elétricas vão promovendo o corte passante da peça. Servomecanismos de inclinação do fio também podem ser equipados na máquina para produzir conicidades, ou hetero morfismo entre a superfície superior e inferior dos cortes.

Eletroerosão por fresagem (M-EDM – Milling Electrical Discharge Machining): Utiliza o eletrodo de forma similar a eletroerosão a penetração, porém o cabeçote ou suporte de fixação pode ter movimento de rotação em torno de um eixo geralmente vertical Z. O processo de fresagem por eletroerosão emprega no mínimo dois eixos equipados com servomecanismos controlados por CNC, que em conjunto com a fonte geradora e controladora de pulsos promove a eletroerosão da peça e controle das descargas em diferentes planos, enquanto realiza a usinagem. Com o controle dos movimentos automatizados por CNC no M-EDM é possível a usinagem de peças com similaridade ao fresamento CNC, porém com algumas particularidades dos processos de EDM. Como particularidades vantajosas do M-EDM: a possibilidade de usinagem de materiais ultraduros, perfis esbeltos, profundos e complexos mesmo que sejam utilizados eletrodos ferramentas fragmentados, ou que não tenham a mesma geometria replicada da peça, pois com a M-EDM o eletrodo pode varrer a superfície através dos eixos comandados enquanto faz a usinagem. Como tarefa comum da indústria, através do processo M-EDM, é possível a usinagem por interpolação de roscas internas em materiais ultraduros, onde o emprego de machos de roscar é limitado. Como desvantagem: a baixa taxa de remoção de material da M-EDM e a rugosidade característica gerada pelas descargas elétricas.

4.3.2. Eletrodo Ferramenta na Usinagem por Descargas Elétricas

Os principais materiais empregados na EDM são: a grafita e o cobre eletrolítico. Alternativamente podem ser utilizadas ligas metálicas de carbonetos de tungstênio, latão, ligas de prata e cobre, cobre-tungstênio (BENEDICT, 1987; FULLER, 1989). Mendonça *et al.* (2006) avaliaram o uso de eletrodos alternativos de latão e bronze na usinagem do aço ABNT P20, obtendo uma taxa de remoção cerca de 1/3 da realizada com cobre eletrolítico. Os autores relatam terem conseguido uma rugosidade menor da superfície erodida com emprego destes materiais alternativos. Dessa forma considerando o custo do material e a excelente usinabilidade do bronze e latão o autor sugere a aplicação destes materiais alternativos como sendo uma opção razoavelmente viável para operações de eletroerosão de acabamento, onde o valor da taxa de remoção não é a principal necessidade.

Müller *et al.* (2015) sugerem para a usinagem por EDM de peças metálicas de baixo ponto de fusão como, o alumínio e suas ligas, o uso de eletrodos de ligas de cobre ou cobre eletrolítico. Já para usinar peças metálicas de maior ponto de fusão como aços e suas ligas, o eletrodo de grafita é desejável. Geralmente, o emprego de eletrodos de cobre eletrolítico produz um melhor acabamento superficial (MCGEOUGH, 1988).

A escolha do material empregado na fabricação dos eletrodos ferramenta, é influenciada pelo material a ser usinado, parâmetros elétricos e até mesmo pelo fluido dielétrico empregado. Além destas variáveis, é necessário levar em conta o custo do material dos eletrodos ferramenta, seu tamanho, desgaste, reaproveitamento e usinabilidade. Adicionalmente também é importante atentar a taxa de remoção desejada no processo, a precisão dimensional e rugosidade superficial desejada na peça (DORF e KUSIAK, 1994; PANDEY e SINGH, 2010; JHA, RAM e RAO, 2011).

Na Tabela 6 são relacionadas algumas propriedades físicas do cobre eletrolítico e da grafita que são relevantes ao processo de usinagem por descargas elétricas.

Material	Condutividade elétrica [S.cm ⁻¹] a 20 °C	Condutividade térmica [W.(m.K) ⁻¹]	Ponto de Fusão [°C]	Referência
Cobre eletrolítico	5,8.10 ⁵	388	1085	ASM International (1992)
*Grafita	*4,3.10 ² - 1,1.10 ³	*45 - 160	3650	Klocke et al. (2013)

Tabela 6 - Propriedades físicas do cobre eletrolítico e da grafita relevantes ao processo de usinagem por descargas elétricas.

* Valores descritos conforme grafitas de diferentes densidades, com tamanho de grão médio variando de 3 a 20µm.

Fonte: ASM.	1992 e Klocke	et al., 2013.
1 01100.7 (010),		or an, 2010.

É citado por Drozda (1983) que o material do eletrodo ferramenta, é responsável por transportar a corrente elétrica para a peça de trabalho. Portanto, qualquer material a ser usado como eletrodo ferramenta, necessita ter uma condutividade elétrica compatível com o processo de usinagem por descargas elétricas. Segundo König (1991), condutores e semicondutores com condutividade elétrica de no mínimo 10⁻²S.cm⁻¹ podem ser empregados como material para fabricação dos eletrodos ferramenta na usinagem por descargas elétricas, conforme mostrado na Figura 12.

Figura 12 - Condutividade elétrica necessária do material do eletrodo ferramenta, na usinagem por descargas elétricas.



Amorim e Weingaertner (2007) conduziram um estudo avaliando o comportamento de eletrodos ferramenta de grafita e cobre eletrolítico, na usinagem por descargas elétricas do aço ABNT P20 na condição de acabamento, com uma corrente elétrica de 3 a 8 amperes. Foi utilizado fluido dielétrico universal para EDM a base de hidrocarbonetos. As maiores taxas de remoção de material, foram alcançadas na EDM, utilizando eletrodos ferramenta de grafita, ligados na polarização negativa (cátodo). As taxas de remoção de material foram semelhantes na polarização positiva, para ambos os eletrodos ferramenta, de grafita e de cobre eletrolítico. Os menores níveis de desgaste volumétrico, foram alcançados na EDM com polarização positiva, para ambos os eletrodos ferramenta de grafita e cobre eletrolítico. A menor rugosidade superficial foi obtida utilizando eletrodos de cobre eletrolítico, na polarização negativa.

4.3.3. Parâmetros da Usinagem por Descargas Elétricas

Uma correta parametrização do equipamento para a EDM propicia uma boa taxa de remoção de material, com aceitável rugosidade superficial da peça usinada, menor desgaste do eletrodo e maior exatidão das medidas (KUMAR *et al.*, 2009). O processo EDM comumente opera na frequência de trabalho entre 50 e 500kHz, tensão entre 50 a 380V e corrente elétrica de 0,1 a 500A. O volume estimado de remoção de material por cada descarga elétrica é da ordem de 10⁻⁶ a 10⁻⁴mm³. Dessa forma a taxa de remoção de material típica de 300mm³/min são obtidas (KALPAKJIAN e SCHMID, 2009).

Polaridade dos eletrodos: Segundo Guitrau (1997) e Jameson (2001) a polaridade elétrica do eletrodo e da peça determina a direção do fluxo de elétrons e íons positivos. Na usinagem por EDM a penetração, a polaridade mais comum para o eletrodo ferramenta é positiva, ou seja, os elétrons são atraídos por ele e os íons positivos são acelerados contra a peça. A polaridade negativa ou o uso de corrente alternada, geralmente produz um maior desgaste do eletrodo ferramenta. Por apresentarem maior massa relativa os íons positivos são os que potencializam a remoção de material da peça (MCGEOUGH, 1988).

Tensão: Kumar *et al.* (2009) destacam que a tensão na EDM está relacionada com a intensidade da faísca e a resistência a ruptura do dielétrico. A tensão em aberto

inicialmente é alta, até que ocorra a ionização através do dielétrico. Com a formação das descargas elétricas, a corrente começa a fluir e em consequência ocorre uma diminuição da tensão.

Corrente e tempo de pulso: a corrente elétrica é um dos parâmetros que tem maior influência sobre o desempenho da EDM. Durante o pulso elétrico a corrente de pico é atingida. Para obter maior taxa de remoção principalmente com os eletrodos de desbaste, uma corrente elétrica de maior intensidade é utilizada. Correntes altas empregadas na EDM pioram o acabamento superficial da peça trabalhada e também aumenta consideravelmente o desgaste do eletrodo, reduzindo a precisão dimensional da peça. Outro fator importante é que eletrodos ferramenta de grande área de contato superficial de usinagem necessitam de um emprego de maiores correntes elétricas. Essa área superficial máxima está muitas das vezes limitada pela potência elétrica máxima da máquina de EDM. Em conjunto com a corrente elétrica um tempo de pulso muito alto pode provocar maior aquecimento e maior dificuldade da limpeza da interface eletrodo ferramenta e peça, aumentando a taxa de remoção da peça, porém acelerando o desgaste, ou até mesmo ocasionando a adesão de material fundido no eletrodo ferramenta (KUMAR *et al.*, 2009).

Frequência: determina a velocidade e quantidade de vezes com que os pulsos gerados na EDM são aplicados. Para desbaste, utiliza-se maior tempo de pulso aplicado em menores quantidades de vezes por segundo, ou seja, uma baixa frequência é utilizada. O tempo estendido do pulso promove uma maior concentração de energia, consequentemente uma maior quantidade de íons e de calor na interface eletrodo ferramenta e peça. Um aumento da taxa de remoção de material na peça trabalhada é obtido, porém como consequência com maior desgaste do eletrodo. O aporte de calor é geralmente estendido para alta remoção de material, e como há menos ciclos por segundo esse é um ajuste de baixa frequência. Na Figura 13 é mostrada a frequência na EDM em razão do acabamento a ser obtido na peça usinada. Operações de acabamento, exigem pulsos curtos e com maior quantidade por segundo, ou seja, alta frequência (GUITRAU, 1997). A frequência é composta de tempo de pulso ligado, T_{on}, e tempo de pulso desligado, T_{off}. Variando T_{on}, é alterado o tempo em µs que um pulso é gerado ocorrendo a descarga elétrica. Variando T_{off}, é

alterado o tempo em µs que o pulso elétrico fica desligado. Quanto maior a duração do pulso maior a quantidade de material fundido e/ou vaporizado (CRUZ JR, 2015).





Fonte: Adaptado de Guitrau, 1997.

4.3.4. Generalidades do Fluido Dielétrico

Segundo Mcgeough (1988), para que um fluido dielétrico desempenhe satisfatoriamente seu papel na EDM ele deve possuir alta rigidez elétrica, boa capacidade para refrigerar, baixa viscosidade, e obter uma rápida deionização. No processo de EDM os principais fluidos dielétricos são: óleos sintéticos e minerais, óleos vegetais, querosene, água deionizada e soluções à base de água, contendo ou não pós abrasivos (FULLER, 1989; ARANTES, 2001; LIMA e RASLAN, 2009).

O fluido dielétrico auxilia na remoção das micropartículas fundidas e evaporadas geradas no processo de EDM, além de promover o resfriamento do eletrodo ferramenta, da peça e dessas partículas do sistema. A limpeza eficiente da interface eletrodo ferramenta e peça é fundamental para obter aumento da taxa de remoção, com menor desgaste do eletrodo ferramenta, um melhor acabamento superficial da peça e evitar que micropartículas suspensas voltem a se refundirem de forma excessiva na superfície da peça e eletrodo ferramenta (ARANTES *et al.*, 2003).

Arantes (2001), apresenta na Figura 14 as diferentes formas de utilização do fluido dielétrico no processo de EDM a penetração. O uso e seleção da técnica mais recomendada parte principalmente da avaliação da geometria da peça a ser usinada, fazendo uma previsão do engajamento do eletrodo ferramenta à medida que acontece o aprofundamento do mesmo nas cavidades ou regiões usinadas da peça. Uma eficiente circulação e arrastamento das partículas em geral é possível onde haja uma entrada e saída do fluido dielétrico. Furos e cavidades profundas não passantes geralmente reduzem consideravelmente a taxa de remoção de material da peça trabalhada, pois o fluido dielétrico entra na interface eletrodo ferramenta e peça, mas as micropartículas não saem e vão acumulando dentro das regiões usinadas. Nesse caso a retração periódica frequente é extremamente necessária (WONG *et al.*, 1995).





Fonte: Arantes, 2001.

Wong *et al.* (1995) acrescentam que a velocidade e pressão dos jatos em direção a peça pode contribuir para expulsão das micropartículas retidas nas cavidades ou furos. A correta seleção do método de aplicação do dielétrico deve ser avaliada para cada situação. Em geral o melhor método para circulação do fluido dielétrico e limpeza correta da fenda de trabalho é o recomendado. Ainda em alguns casos, a EDM submersa ao dielétrico pode ser recomendada ao invés do uso por jateamento.

4.4. Boretação na Usinagem por Descargas Elétricas

Segundo Nicesio *et al.* (2016), com o uso de diferentes fluidos dielétricos em conjunto com a usinagem por descargas elétricas tem sido possível realizar diferentes tipos de tratamento superficial como os de nitretação e boretação. Singh e Banwait (2016) relatam que essas modificações superficiais no material ocorrem porque elementos

como nitrogênio e boro, são decompostos na solução utilizada e depositados intersticialmente sobre a superfície do material trabalhado. Ao mesmo tempo que ocorre a usinagem, é promovida melhorias nas propriedades físicas e químicas do material. Sendo assim os processos de nitretação e boretação por descargas elétricas têm sido vistos de forma promissora e atrativa em diversas pesquisas do meio acadêmico.

Embora seja escasso na literatura estudos da Boretação por EDM na presente data deste trabalho, Özerkan (2018) relata ter tratado a superfície do aço AISI 1040 com uso da EDM utilizando pós de óxido de boro B₂O₃ misturado em querosene em diferentes concentrações, variando de 0 a 15g.L⁻¹, utilizando eletrodo de cobre eletrolítico. Camadas boretadas endurecidas de aproximadamente 20µm foram obtidas. A dureza superficial no ponto mais externo da camada foi de 941HV. E na região mais próxima do substrato 413HV. Ainda segundo Özerkan (2018), pós eletricamente condutores misturados no dielétrico no processo de EDM, podem formar camadas de liga altamente homogêneas. Apesar do elemento boro isoladamente não ser condutor, a utilização de óxido de boro B₂O₃ misturado em querosene em diferentes concentrações na boretação pela EDM, demonstra ter obtido uma camada com alta resistência à abrasão e à corrosão.

Lima *et al.* (2022), relata ter boretado a superfície do aço ABNT 4140 usinada por eletroerosão a penetração em uma máquina de EDM adaptada. Foi empregado no processo o cobre eletrolítico como eletrodo ferramenta. A dureza na camada boretada intermediária foi próxima de 713HV com 51µm de espessura, representando um ganho de aproximadamente 146,8% de dureza na camada modificada, quando comparado a matriz do aço ABNT 4140.

Embora os mecanismos da nitretação e boretação pela EDM sejam diferentes dos métodos convencionais termoquímicos, estudos de SILVA *et al.* (2015) e SILVA *et al.* (2020b) de nitretação por EDM são citados neste trabalho. Nos processos convencionais de nitretação, é utilizado uma atmosfera rica em nitrogênio para promover a difusão do elemento na superfície do material, já na boretação, a atmosfera rica em boro é utilizada.

Segundo Silva et al. (2015), durante a nitretação pela EDM, íons presentes no fluido dielétrico são incorporados à superfície da peça usinada, atingindo certa profundidade. Isso ocorre devido a existência de uma diferença de potencial entre os eletrodos, que promove a formação do canal de plasma e acelera os íons em direção a superfície a ser tratada. Para Raslan, Silva e Santos (2012), a alta energia gerada no processo de nitretação por descargas elétricas é capaz de promover a inserção de íons na superfície da peça, por meio de um mecanismo por ele proposto de nitretação por descargas elétricas por implantação iônica. No processo de implantação iônica na EDM, ions são acelerados e bombardeados em direção a superfície da peça. Esse bombardeamento de alta energia libera átomos da superfície que reagem com espécies do plasma e formam compostos com o nitrogênio do tipo Fe-N (SANTOS, 2013). A Figura 15 apresenta a teoria da implantação iônica do nitrogênio na usinagem por descargas elétricas em um estudo feito por Santos (2013), aplicadas ao aço ABNT 4140 utilizando como eletrodo ferramenta o cobre eletrolítico. Em substituição do dielétrico convencional foi utilizada uma solução de água deionizada com ureia na concentração de 10g.L⁻¹.



Figura 15 - Mecanismo de implantação iônica da nitretação por descargas elétricas proposto por Santos (2013).

Fonte: Santos, 2013.

A ruptura por impacto gerado no dielétrico gera amoníaco gasoso (NH₃) que se decompõe em N₂ e H₂, conforme as equações:

$$(NH_2)_2CO + 2 H_2O \rightarrow NH_4OH + NH_3 + CO_2$$
(1)

$$\mathbf{2} \, \mathbf{N} \mathbf{H}_3 \rightarrow \mathbf{N}_2 + \mathbf{3} \, \mathbf{H}_2 \tag{2}$$

O N₂ e H₂ irão se difundir no canal de plasma na forma de íons, como N₂⁺, N⁺ e H₂⁺ conforme indicado nas equações (1) e (2). Por serem positivos, eles serão impulsionados para a superfície do eletrodo peça (cátodo) e, pela alta energia cinética

que adquirem, implantam-se no interior da mesma. Íons oriundos do eletrodo ferramenta (ânodo), cobre e carbono, também podem ser formados (SANTOS, 2013).

4.5. Octaborato de Sódio Tetrahidratado (Na₂B₈O₁₃.4H₂O)

Comumente utilizado como fertilizante na agricultura o octaborato de sódio tetrahidratado também pode ser chamado de octaborato dissôdico tetrahidratado, ou de forma resumida, de octaborato de sódio ou octaborato dissôdico (Na₂B₈O₁₃ 4H₂O). É encontrado disposto na forma de liquido claro ou mais comum, na forma de pó levemente amarelado, é inodoro, não inflamável e de baixa toxibilidade. Quando dissolvido em água o octaborato dissôdico tetrahidratado (Na₂B₈O₁₃.4H₂O), resulta em Tetrahidroxiborato mais ácido bórico conforme equação abaixo

$$Na_2B_8O_{13}.4H_2O + 9H_2O \longrightarrow 2NaB(OH)_4 + 6B(OH)_3$$
(3)

Nas concentrações de boro (B < 0,025M) acontece equilíbrio químico onde o ácido bórico se liga às hidroxilas provenientes da auto-ionização das moléculas de água.

$$B(OH)_3 + 2H_2O \iff B(OH_4)^- + H_3O^+$$
(4)

Já para boro (B > 0,025M) o equilíbrio se estabelece entre o ácido bórico e ânions polinucleares mais complexos, como $B_3O_3(OH)_4$ - $B_4O_5(OH)_4^2$ -, $B_3O_3(OH)_5^2$ -, $B_5O_6(OH)_4$ - e B(OH)_4-. Resumidamente:

 $B(OH)_3 \iff \hat{a}nions \ polinucleares \iff B(OH)_4^-$ (5)

Íons metálicos como o Mg²⁺, Na+, Ca²⁺ e outros, promovem a formação dos pares cátion[metálico]+ânion[boratos].

A solução de octaborato de sódio tetrahidratado (Na₂B₈O₁₃.4H₂O) diluído em água deionizada leva a presença de cátions Na+ que deslocam do equilíbrio em favor da dissociação, o que diminui a concentração de ácido bórico molecular (indissociado) e aumenta a concentração de íons de boro dissolvidos no meio aquoso. Segundo Briggs

(2000) a solubilidade do composto de octaborato de sódio tetrahidratado (Na₂B₈O₁₃.4H₂O) é de aproximadamente 95g.L⁻¹ de água a 20°C. Türkmen e Yalamaç (2021) utilizaram pós de octaborato de sódio tetrahidratado (Na₂B₈O₁₃.4H₂O) e misturas contendo ácido bórico (H₃BO₃) na boretação convencional em caixa do aço SAE 1020. O tratamento de boretação foi realizado em forno de mufla a 850°C a atmosfera ambiente por 4h. Uma camada próxima de 65µm de espessura com boretos de Fe₂B e FeB foi obtida com uma dureza mais externa da camada próxima de 1540HV.

4.6. Bórax (Na₂B₄O₇.10H₂O)

O bórax (Na₂B₄O₇.10H₂O) também pode ser chamado tetraborato de sódio decahidratado, tetraborato dissôdico decahidratado e de forma resumida, de tetraborato de dissôdico. O bórax (Na₂B₄O₇.10H₂O) é amplamente utilizado como fonte de boro nos tratamentos termoquímicos de boretação. A maior parte dos tratamentos de boretação utilizando o bórax (Na₂B₄O₇.10H₂O), que se baseia na redução em bórax fundido (Na₂B₄O₇), em conjunto com o uso de ativadores a base de ferro-silício, ferro-titânio e alumínio ou somente alumínio. Estes ativadores auxiliam na formação de camadas de alta qualidade e de maior profundidade reduzindo o tempo e consequentemente o custo do tratamento (SEN, SEM e BINDAL, 2005; LIMA e RASLAN, 2009; MARIANI, 2014).

O bórax (Na₂B₄O₇.10H₂O) possui cristais que formam pós de coloração esbranquiçada, inodoro e com solubilidade lenta de aproximadamente 32g.L⁻¹ de água a 25°C. É um mineral alcalino com ponto de fusão de 75°C provindo da mistura de um sal hidratado de sódio e ácido bórico. Pode ser utilizado também na área de cutelaria como fundente, agrícola como fertilizante e ainda na área medicinal devido às suas propriedades antissépticas e antifúngicas (HAYNES, LIDE e BRUNO, 2016).

Comercialmente podem ser obtido agentes boratizantes já preparados como Ekabor® utilizado no estudo de Çalik (2013). Em seu trabalho, chapas de aço EM H320 LA foram boretadas em caixa utilizando pós de diferentes granulometrias (Ekabor1, Ekabor2, Ekabor3, EkaborHM). O autor relata ter conseguido camadas de maior espessura e com maior dureza utilizando pós de menor granulometria de EkaborHM.

4.7. Caracterização de Boretos no Aço ABNT P20 pela Difração de raio-x

A técnica de difração de raio-x é comumente utilizada para a caracterização de materiais cristalinos como metais, cerâmicos, minerais, polímeros, plásticos ou outros compostos orgânicos ou inorgânicos, embora algumas informações possam ser obtidas em materiais sólidos amorfos e líquidos (WHAN, 1986). Uslu *et al.* (2007) em seu estudo de boretação realizado no aço ABNT P20, encontrou boretos do tipo FeB, Fe₂B, CrB inclusive MnB, utilizando a técnica de difração de raio-x conforme mostrado na Figura 16. Um difratômetro modelo Schimadzu XRD-6000 com uma fonte de radiação CuKα com comprimento de onda de 1,504A° e ângulo 2θ de varredura com intervalo de 20θ a 100θ foi empregado para análise dos boretos formados na camada do material. O tratamento de boretação convencional foi realizado em caixa a 875°C por 8h utilizando como fonte de boro pós de Ekabor.

Figura 16 - Espectro da difração de raio-x do aço ABNT P20 boretado a 875°C por 8h utilizando pós de Ekabor.



Autores como Lima *et al.* (2022) e Nascimento *et al.* (2022) utilizaram a técnica de difração de raio-x para comprovar a existência de boretos formados na camada do aço ABNT 4140 e aço ABNT 8620, respectivamente. Ambos os autores realizaram a boretação por descargas elétricas utilizando como fonte de boro o octaborato de sódio

tetrahidratado (Na₂B₈O₁₃.4H₂O) diluído em água deionizada na concentração de 16,67g.L⁻¹.

5. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Para realização dos testes de boretação por plasma eletrolítico por descargas elétricas foi utilizada uma máquina de eletroerosão por penetração convencional, Eletroplus – modelo 540/SERVSPARK, adaptada. As amostras do aço ABNT P20 e eletrodos ferramenta de cobre eletrolítico foram preparadas em torno convencional. Para realização da usinagem as soluções de octaborato de sódio tetrahidratado (Na₂B₈O₁₃.4H₂O) e bórax (Na₂B₄O₇.10H₂O) foram diluídas em diferentes recipientes com água deionizada. Um condutivímetro portátil digital, com faixa de medição de 0-9999 µS.cm⁻¹ ±2% foi utilizado para medição da condutividade elétrica da água, antes e após a deionização, e também das soluções obtidas. Após os ensaios as amostras foram submetidas a uma limpeza ultrassônica, com o objetivo de remover detritos do material aderidos na superfície. Em seguida as amostras foram preparadas utilizando técnicas metalográficas, para que as camadas formadas fossem caracterizadas. Para verificação de alterações morfológicas, microestruturais e mensuração da espessura da camada formada, imagens foram obtidas utilizando o microscópico óptico. A dureza da camada foi mensurada através do ensaio de microdureza Vickers, e a comprovação da presença de boretos na camada foi realizada por meio de testes de difração de raio-x. Testes similares foram realizados por Santos et al. (2017a); Elias et al. (2019) e Silva et al. (2020a) na nitretação por descargas elétricas. A síntese das etapas do procedimento experimental é apresentada no fluxograma da Figura 17.



Figura 17 - Fluxograma das Etapas do Procedimento Experimental.

Fonte: Próprio autor, 2022.

5.1. Eletrodo Ferramenta e Amostras

Os eletrodos ferramenta foram usinados em torno convencional com diâmetro de 22 e comprimento de 30mm a partir de barras de cobre eletrolítico, sendo utilizado um eletrodo para cada amostra. Foram preparadas três amostras (eletrodos peça) em torno convencional com diâmetro de 19mm (3/4") e espessura de 15mm a partir de barras do aço ABNT P20 trefilado conforme recebido. Posteriormente, elas foram cortadas no sentido axial utilizando um aparelho *cutoff* para a realização da usinagem por eletroerosão e análise metalográfica do par conforme a Figura 18.

Figura 18 - Dimensões e região de usinagem das amostras do aço ABNT P20 utilizadas nos testes de boretação por plasma eletrolítico por descargas elétricas.



Fonte: Próprio autor (2022).

5.2. Soluções eletrolíticas de octaborato de sódio tetrahidratado (Na₂B₈O₁₃.4H₂O) e bórax (Na₂B₄O₇.10H₂O)

Para medir a massa de octaborato de sódio tetrahidratado (Na₂B₈O₁₃.4H₂O) e bórax (Na₂B₄O₇.10H₂O), foi utilizada uma balança analítica de precisão, BEL Engineering M214Ai, com resolução 0,0001g e linearidade \pm 0,0003g. Não excedendo o limite de solubilidade de ambos os compostos, o octaborato de sódio tetrahidratado (Na₂B₈O₁₃.4H₂O) e o bórax (Na₂B₄O₇.10H₂O) foram diluídos em água deionizada na concentração de 16,67g.L⁻¹. Para obter essa dissolução foi utilizado 500g de octaborato sódio tetrahidratado (Na₂B₈O₁₃.4H₂O) colocado em um recipiente e depois 500g de bórax (Na₂B₄O₇.10H₂O) em outro recipiente. Ambos foram diluídos em 30 litros de água deionizada preparada em um deionizador portátil modelo Acqua Dellta a base de resina com capacidade de 50L.h⁻¹, ligado à rede pública de abastecimento.

A condutividade elétrica da solução obtida foi medida com condutivímetro portátil Digital Aid TDS&EC meter, com faixa de medição de 0-9990 µS.cm⁻¹ ±2%.

5.3. Máquina de Usinagem por Descargas Elétricas adaptada

Para a realização da usinagem nas amostras foi utilizada uma máquina de eletroerosão a penetração Eletroplus – 540/SERVSPARK pré adaptada conforme trabalhos de nitretação por descargas elétricas realizado por Santos *et al.* (2017b); Silva *et al.* (2020a). A máquina dispõe de 6,5KVA de potência, movimentação manual nos eixos longitudinal X e transversal Y por meio de manivelas. O eixo vertical Z é dotado de guias lineares e eixos de esferas recirculantes comandados por motor de passo que controlam o eletrodo ferramenta. O peso máximo admissível do eletrodo ferramenta montado no cabeçote é de 60kg. Todas as adaptações feitas na máquina para execução dos testes não afetam ou danificam nenhum componente original da máquina.

Uma cuba auxiliar contendo separadamente as soluções de octaborato de sódio tetrahidratado (Na₂B₈O₁₃.4H₂O) e de bórax (Na₂B₄O₇.10H₂O) em água deionizada foi posicionada no interior do reservatório original de trabalho da máquina, evitando contaminação do fluido dielétrico da própria máquina ou mesmo a corrosão de componentes. A cuba auxiliar foi fabricada com chapa de aço inoxidável austenítico AISI 304 com 1 mm de espessura e dimensões internas de 335 mm de altura, 400 mm de largura e 600 mm de comprimento, projetada para trabalhar com volume de até 80 litros.

A Figura 19 mostra a máquina de eletroerosão a penetração com a cuba auxiliar montada utilizada nos testes.





Fonte: Próprio autor, 2022.

Uma bomba ASTEN modelo CD 3002 de vazão 51 L.min⁻¹, pressão de 2 metros de coluna d'água (m.c.a), com motor de 3100Rpm de 0,16CV foi montada na lateral esquerda da cuba com sua mangueira de saída presa em um suporte colocado a direita da cuba para que ocorra a agitação e homogeneização de toda a solução durante os testes. A Figura 20 apresenta um desenho esquemático em detalhes o interior da cuba auxiliar com o posicionamento da bomba de sucção e da mangueira do jato de saída da solução. Também são mostrados, os suportes do eletrodo ferramenta e eletrodo peça e a fenda de trabalho.

Figura 20 - Desenho esquemático do interior da cuba auxiliar ilustrando o posicionamento dos eletrodos ferramenta e peça com a fenda de trabalho, em conjunto com a bomba de sucção e a mangueira do jato de saída da solução, para realizar os testes.



Fonte: Próprio autor (2022).

O par de amostra foi colocado em um suporte de fixação de aço inoxidável AISI 304, soldado no interior da cuba contendo um furo central para alojar as amostras e um parafuso lateral utilizado para fixá-las. O eletrodo ferramenta é fixado por um porta eletrodo alongado, dotado do mesmo sistema de fixação por parafuso lateral, o que facilita sua troca rápida e permite que o cabeçote da máquina não tenha contato com a solução. A Figura 21 mostra em mais detalhes a região da usinagem no par de amostras (eletrodo peça), junto com o eletrodo ferramenta para realização dos testes de boretação por plasma eletrolítico por descargas elétricas.

Figura 21 - Região da usinagem no par de amostras (eletrodo peça), junto com o eletrodo ferramenta para realização dos testes de boretação por descargas elétricas. Dimensões em mm.



Fonte: Próprio autor (2022).

Os parâmetros possíveis de regulagem no painel de controle da máquina de eletroerosão a penetração utilizada são mostrados na Figura 22 com suas respectivas funções.



Figura 22 - Painel de controle da máquina SERVSPARK Eletroplus 540.

Fonte: Próprio autor, 2022.

Devido à alta condutividade elétrica apresentada pela solução eletrolítica contendo octaborato de sódio tetrahidratado (Na₂B₈O₁₃.4H₂O) e o bórax (Na₂B₄O₇.10H₂O) em água deionizada, o eletrodo deve ser mergulhado na solução aproximando manualmente da peça em cerca de 10 mm de distância, para depois ativar o gerador de pulsos. Caso contrário o eletrodo irá retrair de forma espontânea assim que atingir a superfície da solução aquosa, não atingindo a peça. Após essa aproximação manual, a bomba e os pulsos foram ativados e o par de amostras usinado durante 15 minutos. Os parâmetros operacionais para a usinagem por descargas elétricas e os principais dados utilizados nos testes estão relacionados na Tabela 7. Os parâmetros foram selecionados com base nos experimentos de Raslan, Silva e Santos (2012).

Tabela 7 - Parâmetros operacionais e principais dados, utilizados nos testes de boretação por descargas elétricas.

PARÂMETRO	ESPECIFICAÇÃO	
Eletrodo Peça	Aço ABNT P20	
Eletrodo Ferramenta	Cobre eletrolítico	
Polaridade do eletrodo	Positiva [+]	
ferramenta		
Soluções eletrolítica boretante	Octaborato de sódio tetrahidratado e bórax a	
(utilizadas separadamente)	16,67g.L ⁻¹ de água deionizada	
Volume total da solução	30L	
boretante		
Corrente nominal	40A	
Tempo de pulso ligado (Ton)	500µs	
Tempo de pulso desligado (Toff)	1,5*	
Fenda de trabalho (Gap)	1,0*	
Tempo de afastamento periódico	5,0*	
Velocidade do servo	5,0*	
Tempo de erosão	5,0*	
Tempo total do teste usinando	15min	

*Posição selecionada diretamente conforme gravação no painel da máquina. Estes parâmetros não possuem unidade relacionada.

Fonte: Próprio autor, 2022.

5.4. Microscopia Óptica

Após a usinagem, as amostras foram submetidas a uma limpeza ultrassônica com o objetivo de remover detritos desprendidos da superfície. Os pares submetidos a EDM foram embutidos juntos, tendo as suas faces erodidas viradas uma de frente para outra. Resina epóxi termo endurecível foi utilizada para o embutimento das amostras. As amostras foram lixadas utilizando lixas 180, 220, 360, 400, 500, 600, 1200, 1500 e 2000 mesh. Posteriormente elas foram polidas com pasta diamantada, de 3 e 1µm em politrizes manuais. Para a visualização da camada foi feito o ataque químico utilizando o reagente Nital 3% (3ml de ácido nítrico – NHO₃ – e 98ml de álcool etílico) durante o período necessário para revelação da estrutura do material. A Figura 23 ilustra a amostra submetida aos testes de boretação por descargas elétricas após a

preparação com técnicas metalográficas e embutimento. As imagens das camadas foram obtidas por microscópio óptico Fortel por meio de câmera digital acoplada.



Figura 23 - Amostra embutida após ser preparada com técnicas metalográficas que foi submetida ao teste de boretação por plasma eletrolítico por descargas elétricas.

Fonte: Próprio autor, 2022.

5.5. Microdureza Vickers

O ensaio de microdureza Vickers (HV) foi realizado utilizando um microdurômetro Shimadzu modelo HMV-2T E com capacidade de carga de 10 a 100gf. Para o ensaio foram realizadas 10 medições em trechos distintos ao longo da camada obtida. Utilizou-se carga de 25gf por 15 segundos. Medições foram realizadas na camada refundida, camada intermediária (boretada) e substrato das amostras do aço ABNT P20. Com auxílio de uma câmera digital incorporada ao microscópio óptico software Easy Test HMV-AD e ao durômetro, imagens foram obtidas.

5.6. Difração de raio-x

Para detectar a presença dos boretos de ferro, foi realizada difração de raio-x (DRX) convencional, Bragg-Brentano ou θ -2 θ . A Tabela 8 relaciona os parâmetros de varredura utilizados nessa técnica. Antes da realização das análises de DRX, as amostras foram limpas com álcool em aparelho de ultrassom por 15 minutos.

Parâmetro	Especificação
Radiação	CuKα
Tensão	40kV
Corrente	30mA
Tipo de varredura	θ-2θ
Ângulo inicial de varredura (2θ)	20°
Ângulo final de varredura (2θ)	120º
Modo de varredura	Tempo fixo
Passo de amostragem	0,04°
Tempo de varredura por ponto	1s

Tabela 8 - Parâmetros utilizados no ensaio de difração de raio-x.

Fonte: Próprio autor, 2022.

6. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Na preparação de ambas as soluções de octaborato de sódio tetrahidratado (Na₂B₈O₁₃.4H₂O) e de bórax (Na₂B₄O₇.10H₂O) em água deionizada, a condutividade elétrica da água sem tratamento, fornecida pelo sistema público de abastecimento foi de 140 µS.cm⁻¹. Após o processo de deionização, a condutividade elétrica da mesma caiu para 0 µS.cm⁻¹, o processo eliminou os íons e sais minerais contidos na água. Após preparação da solução de octaborato de sódio tetrahidratado (Na₂B₈O₁₃.4H₂O) em água deionizada a condutividade atingiu 9000µS.cm⁻¹, aproximadamente, medida a 23 °C conforme ilustrado na Figura 24. A adição de octaborato de sódio tetrahidratado (Na₂B₈O₁₃.4H₂O) aumentou a condutividade elétrica da água deionizada. De forma similar para a solução de bórax (Na₂B₄O₇.10H₂O) em água deionizada. а condutividade também aumentou, atingindo 8000µS.cm⁻¹, aproximadamente, medida a 23°C.

Figura 24 - Condutividade elétrica da solução de octaborato de sódio tetrahidratado (Na₂B₈O₁₃.4H₂O) em água deionizada na concentração 16,67g.L⁻¹ medido a 23°C.



Fonte: Próprio autor, 2022.

A diluição máxima de octaborato de sódio tetrahidratado (Na₂B₈O₁₃.4H₂O) ou bórax (Na₂B₄O₇.10H₂O) em água deionizada pode variar de acordo com as características

físicas e químicas do composto. A concentração de boro para a solução saturada também depende destas características. Briggs (2000) relata que a solubilidade máxima do octaborato de sódio tetrahidratado (Na₂B₈O₁₃.4H₂O) se assemelha ao boretante Polibor por ele utilizado, que é de aproximadamente 95g.L⁻¹ de água a 20°C. Considerando uma solução saturada, a concentração de 6,3% de óxido bórico (B₂O₃) é obtida. Para o bórax (Na₂B₄O₇.10H₂O) ainda segundo Briggs (2000), a solubilidade é lenta, de aproximadamente 26 g.L⁻¹ de água a 20°C. Considerando uma solução saturada, a concentração é de 1,7% de óxido bórico (B₂O₃). Desta forma a concentração utilizada no presente estudo, tanto para o octaborato de sódio tetrahidratado (Na₂B₆O₁₃.4H₂O) ou para o bórax (Na₂B₄O₇.10H₂O) em água deionizada não supera os limites de solubilidade máxima dos compostos. Foi observado uma solubilidade mais lenta do bórax (Na₂B₄O₇.10H₂O) em água deionizada no presento de sódio tetrahidratado (Na₂B₆O₁₃.4H₂O). Logo a informação obtida no estudo de Briggs (2000) foi confirmada.

6.1. Microscopia Óptica

A Figura 25 ilustra uma imagem de microscopia óptica da seção transversal da amostra de aço ABNT P20, boretada por plasma eletrolítico por eletroerosão a penetração. O cobre eletrolítico foi usado como eletrodo ferramenta em solução eletrolítica de octaborato de sódio tetrahidratado (Na₂B₈O₁₃.4H₂O) contido em água deionizada. A camada intermediária (boretada) apresentou uma espessura média de $52 \pm 4\mu$ m, já a camada refundida valor de espessura média de 47 $\pm 22\mu$ m. Medições foram realizadas em trechos distintos, totalizando 10 medições ao longo da camada.

Figura 25 - Imagem de microscopia óptica da seção transversal da amostra boretada por plasma eletrolítico por eletroerosão do aço ABNT P20, utilizando solução eletrolítica de octaborato de sódio tetrahidratado em água deionizada.



Fonte: Próprio autor (2022).

Na Figura 25 é possível observar a camada refundida e a camada intermediária (boretada) semelhante ao que foi citado por Santos, *et al.* (2016) quando aplicaram o mesmo procedimento na nitretação por descargas elétricas do aço ABNT 4140, e a de Lima (2022) na boretação por descargas elétricas do aço ABNT 4140. Como a camada refundida gerada pelo processo de EDM é dura e quebradiça, para a maioria das aplicações, deve ser removida (JESUS, *et al.*, 2020).

A Figura 26, ilustra imagem de microscopia óptica da seção transversal da amostra de aço ABNT P20, boretada por plasma eletrolítico por eletroerosão a penetração com eletrodo ferramenta de cobre eletrolítico, utilizando uma solução de bórax (Na₂B₄O₇.10H₂O) em água deionizada. A camada intermediária apresentou uma espessura média de $35 \pm 4\mu$ m, já a camada refundida valor de espessura média de $42 \pm 22\mu$ m. Medições foram realizadas em trechos distintos, totalizando 10 medições ao longo da camada.

Figura 26 - Imagem de microscopia óptica da seção transversal da amostra boretada por plasma eletrolítico por eletroerosão do aço ABNT P20, utilizando solução eletrolítica de bórax em água deionizada.



Fonte: Próprio autor (2022).

É possível observar que em ambos os tratamentos de boretação por descargas elétricas utilizando os compostos dissolvidos em água deionizada de octaborato de sódio tetrahidratado (Na₂B₈O₁₃.4H₂O) e de bórax (Na₂B₄O₇.10H₂O), a camada refundida não é uniforme, como foi citado por Mehmood (2016). Além disto, não possui aderência suficiente para se fixar a camada intermediária ou ao material base, conforme segmentos de desplacamento mostrados da camada refundida.

De acordo com Yadav *et al.* (2002) a ação térmica do processo de EDM afeta a integridade da superfície do componente usinado. Pramanik *et al.* (2017), descrevem que a formação da camada refundida se deve ao fato da alta temperatura do processo de EDM, que funde o metal durante a série de descargas elétricas produzidas pelo processo. Esse mecanismo seguido do resfriamento rápido gera tensões térmicas que produzem micro trincas na camada refundida. Devido a este fato, em geral, a superfície da peça deve ser polida, com objetivo de reduzir as tensões térmicas, eliminar micro trincas e consequentemente a camada refundida.

6.2. Microdureza Vickers

A Tabela 9 apresenta a média dos resultados das 10 medições de microdureza Vickers realizada na camada refundida, intermediária (boretada) e no material base, medidas na seção transversal da amostra boretada por plasma eletrolítico do aço ABNT P20 por descargas elétricas utilizando uma solução de octaborato de sódio tetrahidratado (Na₂B₈O₁₃.4H₂O) em água deionizada.

Tabela 9 - Valores médios de microdureza Vickers das camadas da amostra boretada por plasma eletrolítico por eletroerosão do aço ABNT P20, utilizando solução eletrolítica de octaborato de sódio tetrahidratado em água deionizada.

REGIÃO	DUREZA (HV)	AUMENTO NO VALOR DA DUREZA EM RELACÃO AO MATERIAL BASE
Camada refundida	686 <u>+</u> 28	~112%
Camada intermediária (boretada)	621 <u>+</u> 31	~92%
Material base (aço ABNT P20)	324 <u>+</u> 3	_

Fonte: Próprio autor (2022).

Observa-se um aumento de dureza próxima de 92% na camada intermediária (boretada), e 112% na camada refundida, em relação ao material base, utilizando a solução eletrolítica de octaborato de sódio tetrahidratado (Na₂B₈O₁₃.4H₂O) em água deionizada. Segundo Jesus, *et al.* (2020), a camada refundida gerada pelo processo de EDM é dura e quebradiça, que para maioria das aplicações, deve ser removida. A composição química desta camada refundida pode mudar em relação ao material base, uma vez que carbono ou outros elementos podem ser transferidos da decomposição do fluido dielétrico.

Na Tabela 10, utilizando uma solução de bórax (Na₂B₄O₇.10H₂O) em água deionizada, são apresentados a média dos resultados das 10 medições de microdureza Vickers realizada na camada refundida, intermediária (boretada) e material base, medidas na seção transversal da amostra boretada por plasma eletrolítico do aço ABNT P20 por descargas elétricas. Tabela 10 - Valores de microdureza Vickers das camadas da amostra boretada por plasma eletrolítico por eletroerosão do aço ABNT P20, utilizando solução eletrolítica de bórax em água deionizada.

REGIÃO	DUREZA (HV)	AUMENTO NO VALOR DA DUREZA EM RELAÇÃO AO MATERIAL BASE
Camada refundida	515±22	~59%
Camada intermediária (boretada)	683 ± 33	~111%
Material base (aço ABNT P20)	324 <u>+</u> 3	_

Fonte: Próprio autor (2022).

Observa-se um aumento de dureza de 111% da camada intermediária (boretada) e 59% da camada refundida, em relação ao material base. Nesta pesquisa utilizando a solução eletrolítica de bórax (Na₂B₄O₇.10H₂O) em água deionizada ocorreu um fato que divergiu dos resultados encontrados na usinagem por EDM. A camada refundida apresentou um aumento de 59%, apenas.

Este resultado é corroborado com os dados Özerkan (2018) na boretação por EDM do aço AISI 1040, mediu uma dureza superficial de 941HV na camada refundida e 413HV na camada intermediária, utilizando pós de óxido de boro B₂O₃ misturado em querosene, em substituição ao dielétrico convencional.

Segundo Ghanem, *et al.* (2002) as mudanças metalúrgicas provocadas pelo aquecimento, seguido do resfriamento brusco promovido pelo fluido dielétrico, proporciona o aumento de dureza na camada refundida. Já o aumento de dureza na camada intermediária foi possível pela difusão do boro, por implantação iônica a plasma, decomposto do ácido bórico formado depois da diluição do octaborato de sódio tetrahidratado (Na₂B₈O₁₃.4H₂O) e do bórax (Na₂B₄O₇.10H₂O) em água deionizada.

A Figura 27 ilustra as indentações produzidas pelo ensaio de microdureza Vickers, realizado na seção transversal das camadas refundida, intermediária (boretada) e material base da amostra boretada por plasma eletrolítico do aço ABNT P20 por descargas elétricas utilizando a solução de octaborato de sódio tetrahidratado

(Na₂B₈O₁₃.4H₂O) em água deionizada, semelhante ao que foi observado por Santos, *et al.* (2016), no processo de nitretação por descargas elétricas.

Figura 27 - Imagem da seção transversal ilustrando as indentações produzidas por microdureza Vickers nas camadas do aço ABNT P20 boretado por plasma eletrolítico por eletroerosão utilizando solução de octaborato de sódio tetrahidratado em água deionizada.



Fonte: Próprio autor (2022).

De acordo com Uslu, *et al.* (2007), o aumento de dureza na camada intermediária (boretada) em relação ao material base, pode ser atribuído as fases FeB e Fe₂B, que se formam durante o processo de boretação.

Mehmood *et al.* (2018) afirmam que ao final da descarga elétrica o fluido dielétrico, no caso desta pesquisa a solução eletrolítica, é responsável por remover o material fundido na forma de detritos e formar a camada refundida. E ainda, a camada intermediária, também absorve elementos químicos oriundos do fluido dielétrico (solução eletrolítica).

Na Figura 28 são mostradas as indentações produzidas pelo ensaio de microdureza Vickers, realizado na seção transversal das camadas refundida, intermediária (boretada) e material base da amostra boretada por plasma eletrolítico do aço ABNT P20 por descargas elétricas utilizando a solução eletrolítica de bórax (Na₂B₄O₇.10H₂O) em água deionizada.

Figura 28 - Imagem da seção transversal ilustrando as indentações produzidas por microdureza Vickers nas camadas do aço ABNT P20 boretado por plasma eletrolítico por eletroerosão utilizando solução de bórax em água deionizada.



Fonte: Próprio autor (2022).

Nota-se o maior tamanho da indentação produzida na camada refundida em relação à camada intermediária (boretada). Uma provável explicação para este fato, pode estar relacionado com a reação do cobre usado como material do eletrodo ferramenta com o bórax contido na solução eletrolítica. A reação facilita a decomposição do cobre e sua posterior implantação pelo canal de plasma. Segundo Alp, Savrik e Balkose (2014) o boro decomposto do bórax combina com o cobre e forma borato de cobre, e neste caso, o borato de cobre forma a camada refundida junto com o material base do aço AISI P20.
6.3. Difratograma de Raio-x

A Figura 29 apresenta o difratograma de raio-x da amostra boretada por plasma eletrolítico do aço ABNT P20 por descargas elétricas, utilizando eletrodo ferramenta de cobre eletrolítico e solução eletrolítica de octaborato de sódio tetrahidratado (Na₂B₈O₁₃.4H₂O) em água deionizada, comparando com espectro de difração de raiox do aço conforme recebido (referência).

Figura 29 - Difratograma de raio-x da amostra boretada por plasma eletrolítico por eletroerosão do aço ABNT P20, utilizando eletrodo de cobre e solução eletrolítica de octaborato de sódio tetrahidratado em água deionizada, em comparação com aço recebido (referência).



Fonte: Próprio autor (2022).

No difratograma da amostra boretada é possível perceber os picos de boreto de ferro Fe₂B formados. De acordo com as cartas retiradas dos padrões de difração do banco de dados ICSD: θ =44,68° (76-0092), θ =74,35° (75-1062), θ =89,68° e θ =94,62° (36-1392).

De forma similar, porém utilizando uma solução de bórax (Na₂B₄O₇.10H₂O) em água deionizada, a Figura 30 apresenta o difratograma de raio-x da amostra boretada por plasma eletrolítico do aço ABNT P20 por descargas elétricas com eletrodo ferramenta

de cobre eletrolítico utilizando solução eletrolítica de bórax (Na₂B₄O₇.10H₂O) em água deionizada em comparação com aço conforme recebido (referência).

Figura 30 - Difratograma de raio-x da amostra boretada por plasma eletrolítico por eletroerosão do aço ABNT P20, utilizando eletrodo de cobre e solução eletrolítica de bórax em água deionizada, em comparação com aço recebido (referência).



Fonte: Próprio autor (2022).

A presença de boreto de ferro formados no aço ABNT P20 foi confirmada, para ambas as soluções contendo octaborato de sódio tetrahidratado (Na₂B₈O₁₃.4H₂O) e contendo bórax (Na₂B₄O₇.10H₂O) em água deionizada, por meio da difração de raio-x, semelhante ao observado por Uslu, *et al.* (2007) no difratograma de raio-x da Figura 16. De acordo com as cartas retiradas dos padrões de difração do banco de dados ICSD é possível observar os picos de boreto de ferro Fe₂B formados em: θ =44,68° (76-0092), θ =74,35° (75-1062), θ =89,68° e θ =94,62° (36-1392).

Segundo Kayali (2015) as camadas de boreto consistem principalmente das fases FeB e Fe₂B como resultado da difusão de átomos de boro para a rede metálica. A hipótese de haver boro nas camadas refundida e intermediária é pertinente, já que existe uma fonte do mesmo provinda do ácido bórico da solução formada pelo octaborato de sódio tetrahidratado (Na₂B₈O₁₃.4H₂O) e de bórax (Na₂B₄O₇.10H₂O) em água deionizada. A energia produzida pelo mecanismo de colisões causa ruptura do dielétrico e decompõe os constituintes presentes na mistura.

Observando os resultados é possível prever a formação de uma camada monofásica de Fe₂B adjacente a camada refundida conforme foi confirmado na difração de raio-x. Brakman, Gommers e Mittemeijer (1989) relatam que, camadas monofásicas de Fe₂B ou polifásicas de Fe₂B e FeB podem ser formadas dependendo do tempo, temperatura, agente boretante e material a ser boretado.

A modificação superficial do aço ABNT P20 por meio da usinagem por descargas elétricas foi possível devido à reação termoquímica ocorrida entre o elemento boro presentes em ambas soluções, de octaborato de sódio tetrahidratado (Na₂B₈O₁₃.4H₂O) em água deionizada e de bórax (Na₂B₄O₇.10H₂O) em água

O canal de plasma gerado durante a usinagem por descargas elétricas promoveu a implantação de boro na matriz metálica das amostras do aço ABNT P20, semelhante ao observado por Yan. *et al.* (2005), quando aplicou o processo de nitretação por descargas elétricas utilizando ureia decomposta em água deionizada em substituição ao dielétrico convencional. A modificação superficial por EDM foi possível devido à presença do elemento químico presente no fluido dielétrico, semelhante a pesquisa de Silva, *et al.* (2020a), neste caso as soluções eletrolíticas formadas por octaborato de sódio tetrahidratado ou bórax, fontes de boro, diluídos em água deionizada. Devido à alta energia cinética que adquirem, os íons de boro implantam-se no interior do aço ABNT P20, como pode ser observado, no modelo proposto na Figura 31.

Figura 31 - Modelo proposto para o canal de plasma no processo de boretação por plasma eletrolítico por eletroerosão.



Fonte: Próprio autor (2022).

7. CONCLUSÃO

- A metodologia apresentada neste trabalho se mostrou eficaz na boretação por plasma eletrolítico da superfície do aço ABNT P20, utilizando máquina de eletroerosão a penetração adaptada, em conjunto com ambas as soluções, de octaborato de sódio tetrahidratado e de bórax em água deionizada.
- Uma espessura média maior, com 52µm, foi obtida na camada intermediária (boretada) utilizando a solução eletrolítica contendo octaborato de sódio tetrahidratado. Já para a solução de bórax em água deionizada, a espessura média foi de 35µm.
- A camada refundida apresentou desplacamento da superfície em algumas regiões para ambas as amostras usinadas com solução de octaborato de sódio tetrahidratado e de bórax em água deionizada
- Ocorreu um aumento no valor médio da microdureza Vickers de 92% na camada intermediária (boretada) e 112% na camada refundida, em relação ao material base utilizando a solução eletrolítica contendo octaborato de sódio tetrahidratado.
- Utilizando a solução eletrolítica contendo bórax, foi obtido um aumento no valor médio da microdureza Vickers de 111% na camada intermediária (boretada) e 59% na camada refundida, em relação ao material base.
- O valor médio de microdureza Vickers da camada intermediária (boretada) utilizando a solução eletrolítica contendo octaborato de sódio tetrahidratado foi de 621HV e na camada refundida foi de 686HV. Já para a solução eletrolítica contendo bórax, um valor médio maior de 683HV foi obtido na camada intermediária (boretada), porém na camada refundida, o valor médio foi menor com 515HV.
- A fases Fe₂B formadas, indicadas pelos picos surgidos no difratograma de raios X, justificam o aumento de dureza, indicando que ocorreu a boretação no aço ABNT

P20 usinado por eletroerosão com máquina S-EDM adaptada, e com o emprego de ambas as soluções aquosa eletrolíticas contendo octaborato de sódio tetrahidratado e bórax, fonte de boro, que incorporou ao canal de plasma e na camada superficial do aço ABNT P20.

8. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- Analisar a influência da concentração da solução fonte boro utilizada, de Octaborato de Sódio Tetrahidratado (Na₂B₈O₁₃.4H₂O) e de Bórax (Na₂B₄O₇.10H₂O) na camada formada.
- Analisar a influência dos parâmetros da EDM como corrente, *gap*, polaridade para verificação de alterações morfológicas e microestruturais da camada formada.
- Investigar o desempenho do aço ABNT P20 boretado pela EDM utilizando diferentes sistemas tribológicos como, pino sobre disco e roda de borracha.
- Avaliar a resistência a fadiga do aço ABNT P20 boretado por plasma eletrolítico pela EDM.
- Realizar o estudo utilizando outros materiais para o eletrodo ferramenta como o de grafita.
- Realizar o estudo utilizando eletrodo peça a partir de outros materiais metálicos.
- Realizar o estudo buscando utilizar outras fontes de boro com maior pureza, com uso de ativadores ou aditivos, para avaliar a condutividade elétrica da solução a taxa de remoção de material (TRM) da usinagem, rugosidade e camada formada.
- Realizar um comparativo entre as propriedades mecânicas e tribológicas do aço ABNT P20 boretado pela EDM e pela boretação convencional.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABBAS, N. M.; SOLOMON, D. G.; BAHARI, M. F. A review on current research trends in electrical discharge machining (EDM). **International Journal of machine tools and Manufacture**, v. 47, n. 7-8, p. 1214-1228, 2007.

AKYÜZ, O.; TEK, Z. Mechanical properties of boronized 2365 steel by pulsed plasmaelectrolysis technique. **Mater Sci Eng B**, v. 5, n. 1-2, p. 50-7, 2015.

ALLAOUI, O.; BOUAOUADJA, N.; SAINDERNAN, G. Characterization of boronized layers on a XC38 steel. Surface and Coatings Technology, v. 201, n. 6, p. 3475-3482, 2006.

ALP, B.; SAVRIK, S. A.; BALKOSE, D. Preparation and Characterization of Copper Borates as Lubricant Additives. **Journal of Materials Science and Engineering**, v. 4, p. 95-108. 2014.

AMORIM, F. L. *et al.* **Tecnologia de Eletroerosão por Penetração da Liga de Alumínio AMP 8000 e da Liga de Cobre CuBe para Ferramentas de Moldagem de Materiais plásticos**. 2002. 155f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) - UFSC, Florianópolis, 2002.

AMORIM, F. L.; WEINGAERTNER, W. L. The behavior of graphite and copper electrodes on the finish die-sinking electrical discharge machining (EDM) of AISI P20 tool steel. Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering, v. 29, p. 366-371, 2007.

AN, J.; LI, C.; WEN, Z.; YANG Y.L.; SUN S.J. A study of boronizing of steel AISI 8620 for sucker rods. **Metal Science and Heat Treatment** 53 (11–12), 2012.

ARANTES, L. J. **Avaliação de fluidos dielétricos no processo de usinagem por descargas elétricas**. 2001. 74f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2001.

ARANTES, L. J. *et al.* Avaliação de superfícies usinadas por diferentes fluidos dielétricos no processo de usinagem por eletroerosão. **Rem: Revista Escola de Minas**, v. 56, p. 91-96, 2003.

ASM INTERNATIONAL. Properties and selection: nonferrous alloys and special-purpose materials. **ASM international**, v. 2, p. 1143-1144, 1992

BENEDICT, G. F. Nontraditional manufacturing processes. CRC press, 1987.

BLEYS, P. *et al.* Surface and sub-surface quality of steel after EDM. Advanced Engineering Materials, v. 8, n. 1–2, p. 15–25, 2006.

BRAKMAN, C. M.; GOMMERS, A. W. J.; MITTEMEIJER, E. J. Boriding of Fe and Fe-C, Fe-Cr, and Fe-Ni alloys; boride-layer growth kinetics. **Journal of Materials Research**, v. 4, n. 6, p. 1354-1370, 1989.

BRIGGS, M. Boron oxides, boric acid, and borates. **Kirk-Othmer Encyclopedia of Chemical Technology**, 2000.

ÇALIK, A. Effect of powder particle size on the mechanical properties of boronized EN H320 LA steel sheets. **ISIJ international**, v. 53, n. 1, p. 160-164, 2013.

CAMARGO B. C.; COSTA H. L.; RASLAN A. A. Endurecimento superficial de uma liga Ti6Al4V por meio de usinagem por descargas elétricas. **Anais... 5º COBEF -Congresso Brasileiro de Engenharia de Fabricação**, Belo Horizonte, 2008.

CAMPOS-SILVA, I. *et al.* Properties and characterization of hard coatings obtained by boriding: an overview. In: **Defect and Diffusion Forum**. Trans Tech Publications Ltd, 2010. p. 1284-1289.

CHAPMAN, B. Glow discharge process – **sputtering and plasm etching**. New York, John Wiley & Sons, 1980.

COSTA, A. L. V. et al. Aços e ligas especiais. Editora Blucher, 2010.

CRUZ, C.; MALAQUIAS, E. S.; FERNANDES, L. A. Introdução à usinagem não tradicional. **DEEME, UFU, Uberlândia-MG**, p. 7-19, 1999.

CRUZ JR, E. J. A influência do tamanho do grão ferrítico da peça na integridade superficial de peças erodida. 2015. 51f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) UNESP - Campus de Ilha Solteira, 2015.

DORF, R. C.; KUSIAK, A. (Ed.). Handbook of design, manufacturing and automation. John Wiley & Sons, 1994.

DOSSETT, J. L.; TOTTEN, G. E. Heat Treating of Irons and Steels. **ASM HANDBOOK** V. 4, 2014.

DROZDA, T. J. (Ed.). **Tool and manufacturing engineer's handbook: machining**. Society of Manufacturing Engineers, 1983.

EL-HOFY, H. A. G. Advanced machining processes: nontraditional and hybrid machining processes. McGraw Hill Professional, 2005.

ELIAS, L.; ELIAS, C.; BATISTA B. E. R.; SILVA E. R. Nitretação por descargas elétricas do ferro fundido nodular. **Revista Perspectivas da Ciência e Tecnologia 11**, 141-154, 2019.

FAUCHAIS, P.; BOULOS, M.; PFENDER, E. Physical and thermodynamic properties of thermal plasmas. **Iron and Steel Society, AIME, Plasma Technology in Metallurgical Processing**, p. 11-26, 1987.

FERNANDES, L. S. R. *et al.* NITRETAÇÃO POR DESCARGAS ELÉTRICAS DE LIGA ALUMÍNIO-SILÍCIO. **Revista Eletrônica Perspectivas da Ciência e Tecnologia-ISSN: 1984-5693**, v. 12, 2020 FREDRIKSSON, G. I.; HOGMARK, S. Influence of dielectric temperature in electrical discharge machining of hot work tool steel. **Surface engineering**, v. 11, n. 4, p. 324-330, 1995.

FULLER, J. E. Electrical Discharge Machining, Metals Handbook. v. 16, 9 ed. 1989.

GALEDARI, S. A.; KHOEI, S. M. M. Effect of pulse frequency on microstructure and surface properties of Ck45 steel treated by plasma electrolysis method. **Journal of alloys and compounds**, v. 551, p. 415-421, 2013.

GARCÍA-LEÓN, R. A.; MARTÍNEZ-TRINIDAD, J.; CAMPOS-SILVA, I. Historical review on the boriding process using bibliometric analysis. **Transactions of the Indian Institute of Metals**, p. 1-17, 2021.

GHANEM, F.; BRAHAM, C.; FITZPATRICK, M. E.; SIDHOM H. Effect of near-surface residual stress andmicrostructuremodification from machining on the fatigue endurance of a tool steel. **J Mater Eng Perform**, 11 631–639, 2002.

GERDAU. Aços Finos Piratini – Manual de aços. v.1, 2003.

GÖK, M. S. *et al.* Dry sliding wear behavior of borided hot-work tool steel at elevated temperatures. **Surface and Coatings Technology**, v. 328, p. 54-62, 2017.

GUITRAU, E. B. The EDM Handbook. **Hansen Gardner Publications**. Cincinnati, OH. 1997. 306p.

GUNES, I. *et al.* Investigation of diffusion kinetics of plasma paste borided AISI 8620 steel using a mixture of B₂O₃ paste and B₄C/SiC. **Sadhana**, v. 38, n. 3, p. 513-526, 2013.

GUPTA, P. *et al.* Electrolytic plasma technology: Science and engineering—An overview. **Surface and Coatings Technology**, v. 201, n. 21, p. 8746-8760, 2007.

HARVEY, P. D. Engineering properties of steel. Asm International, 1982.

HECK, S. C. Influência da boretação com pó na resistência ao desgaste, corrosão e oxidação dos aços AISI 1060 e AISI H13. 2010. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo, 2010.

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

HUDOK, D. Properties and selection: irons, steels, and high-performance alloys. **Metals handbook**, v. 1, p. 200-211, 1990.

JAHAN, M. P. Die-sinking electrical discharge machining. **Electrical discharge** machining (EDM), p. 1-32, 2015.

JAMESON, E. C. **Electrical discharge machining**. Society of Manufacturing Engineers, 2001.

JESUS, A. M. P. *et al.* Comparison between EDM and grinding machining on fatigue behaviour of AISI D2 tool steel. **International Journal of Fatigue**, n. 139. 2020.

JHA B.; RAM K.; RAO M. An overview of technology and research in electrode design and manufacturing in sinking electrical discharge machining. **Journal of Engineering Science and Technology Review**, N. 4. P.118-130. 2011.

JIANG, Y.; BAO, Y.; WANG, M. Kinetic Analysis of Additive on Plasma Electrolytic Boriding. **Coatings**, v. 7, n. 5, p. 61, 2017.

JUMBAD, V. R. *et al.* Application of electrolytic plasma process in surface improvement of metals: a review. **Lett. Appl. NanoBioSci**, v. 3, p. 1249-1262, 2020

KALPAKJIAN, S.; SCHMID, S. R., **Manufacturing engineering and technology**. 6.ed., Pearson, 2009.

KAOUKA, A.; ALLAOUI, O.; KEDDAM, M. Growth kinetics of the boride layers formed on SAE 1035 steel. **Matériaux & Techniques**, v. 101, n. 7, p. 705, 2013.

KAYALI, Y. Investigation of diffusion kinetics of borided AISI P20 steel in microwave furnace Afyon Kocatepe University, Faculty of Technology, Department of Metallurgical and Materials Engineering, Turkey, 2015.

KEDDAM, M.; TAKTAK, S. Characterization and diffusion model for the titanium boride layers formed on the Ti6Al4V alloy by plasma paste boriding. **Applied Surface Science**, v. 399, p. 229-236, 2017.

KEDDAM, M. *et al.* Liquid Boriding of Cp-Ti and Ti6Al4V Alloy: Characterization of Boride Layers and Tribological Properties. **Surface Engineering and Applied Electrochemistry**, v. 56, n. 3, p. 348-357, 2020.

KÖNIG, W. Sparks machine ceramics. **PMI. Powder metallurgy international**, v. 23, n. 2, p. 96-100, 1991.

KÖNIG, W.; KLOCKE, F.; LENZEN, R. The electrical machining process-what demands will they face in the future. **International Journal of Electrical Machining**, v. 1, n. 1, p. 3-8, 1996.

KLOCKE, F. *et al.* Analysis of material removal rate and electrode wear in sinking EDM roughing strategies using different graphite grades. **Procedia CIRP**, v. 6, p. 163-167, 2013.

KRUKOVICH, M. G.; PRUSAKOV, B. A.; SIZOV, I. G. **Plasticity of boronized layers**. Berlin: Springer, 2016.

KULKA, M. Current Trends in Boriding: Techniques, Engineerings Materials Series, Springer Nature, Switzerland, 2019.

KUMAR, S. *et al.* Surface modification by electrical discharge machining: a review. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 209, n. 8, p. 3675–3687, 2009.

LEE, H. T.; HSU, F. C.; TAI, T. Y. Study of surface integrity using the small area EDM process with a copper-tungsten electrode. **Materials Science and Engineering: A**, v. 364, n. 1-2, p. 346-356, 2004.

HAYNES, W. M.; LIDE, D. R.; BRUNO, T. J. CRC handbook of chemistry and physics. CRC press, 2016.

LIMA, D. M. *et al.* Effects of Sodium Octaborate on AISI 4140 Steel Machined by Diesinking EDM. **Materials Research**, v. 25, 2022.

LIMA, R. M.; RASLAN, A. A. A utilização de Fluidos dielétricos à Base de Óleos Vegetais na Usinagem por Descargas Elétricas por Penetração. In: COBEF – 5° Congresso Brasileiro de Engenharia de Fabricação, Belo Horizonte, Minas Gerais, Brasil, 14-17 2009.

MARIANI, F. E. Tratamentos térmicos e termoquímicos de boroaustêmpera em ferros fundidos nodulares e caracterização dos produtos resultantes. 2014. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo.

MARTINI, C.; PALOMBARINI, G.; CARBUCICCHIO, M. Mechanism of thermochemical growth of iron borides on iron. **Journal of Materials Science**, v. 39, n. 3, p. 933-937, 2004.

MCGEOUGH, J. A. Electrodischarge machining. **Advanced methods of machining**, v. 130, 1988.

MEHRER, H. Diffusion in solids: fundamentals, methods, materials, diffusioncontrolled processes. Springer Science & Business Media, 2007.

MEHMOOD, S. Electric Discharge Machining (EDM) Generated Surface Finish and its Effects on the Fatigue Life of Aerospace Alloys (Dissertation). Pakistan: University of Engineering & Technology Taxila, 2016.

MEHMOOD, S.; ANJUM, N. A.; ANWAR, W.; RAHMAN, R. A.; JAVED, K.; BADSHAH, S. A Review of the Effect of Electric Discharge Machining on the Surface Integrity of Metallic Parts. **The Nucleus**, v. 55, n. 1, p. 38-46, 2018.

MELETIS, E. I. *et al.* Electrolytic plasma processing for cleaning and metal-coating of steel surfaces. **Surface and coatings technology**, v. 150, n. 2-3, p. 246-256, 2002.

MENDONÇA, G. M.; SCHLOTEFELDT, A. A.; SENGER, V. Estudo de desgaste, taxa de remoção e rugosidade superficial em eletrodos de latão, bronze e cobre na eletroerosão por penetração. In: 4º Encontro da Cadeia de Ferramentas, Moldes e Matrizes. Joinvile, Santa Catarina, Brasil, 21-24 mai. 2006.

MISCHLER, S.; MUNOZ, A. I. Wear of CoCrMo alloys used in metal-on-metal hip joints: a tribocorrosion appraisal. **Wear**, v. 297, n. 1-2, p. 1081-1094, 2013.

MOHANTY, C. P.; MAHAPATRA, S. S.; SINGH, M. R. An intelligent approach to optimize the EDM process parameters using utility concept and QPSO algorithm. **Engineering Science and Technology, an international journal**, v. 20, n. 2, p. 552-562, 2017.

MÜLLER, A. *et al.* **Análise da usinagem por eletroerosão com diferentes eletrodos-ferramenta.** 8º COFEB Congresso Brasileiro de Engenharia de Fabricação, Salvador, 2015.

NASCIMENTO, C. A. *et al.* Estudo da aplicação do octaborato de sódio como fonte de boro no tratamento termoquímico de boretação por eletroerosão no aço abnt 8620. **Revista Eletrônica Perspectivas da Ciência e Tecnologia-ISSN: 1984-5693**, v. 14, 2022.

NASCIMENTO NETO, E. R. **Utilização de plasma na Remoção de Óleo da Superfície de Alumínio**. Campinas. Dissertação – Faculdade de Engenharia Química, Universidade Estadual de Campinas, 2006.

NICESIO, I. C. *et al.* Avaliação da qualidade da ureia no processo de nitretação por descargas elétricas. **Anais... 9º CONEM –Congresso Nacional de Engenharia Mecânica**, Fortaleza, 2016.

NOVAKOVA, A. A. *et al.* Electron-beam boriding of low-carbon steel. **Journal of alloys and compounds**, v. 383, n. 1-2, p. 108-112, 2004.

ÖZERKAN, H. B. Simultaneous machining and surface alloying of AISI 1040 steel by electrical discharge machining with boron oxide powders. **Journal of Mechanical Science and Technology**, v. 32, n. 9, p. 4357-4364, 2018.

PANDEY, A.; SINGH, S. Current research trends in variants of Electrical Discharge Machining: A review. **International Journal of Engineering Science and Technology**, v. 2, n. 6, p. 2172-2191, 2010.

PFENDER, E. *et al.* Methods and principles of plasma generation. **Plasma Technology in Metallurgical Processes**, p. 27-47, 1987.

PORTER, D. A.; EASTERLING, K. E. **Phase transformations in metals and alloys** (revised reprint). CRC press, 2009.

PRAMANIK, A. *et al.* Fatigue life of machined components. **Advances in Manufacturing**, v. 5, p. 59-76, 2017.

PRZYBYŁOWICZ, K. Teoria i praktyka borowania stali (Theory and practice of steel boronizing). **Publishing House of Kielce University of Technology, Kielce in Polish PL ISSN**, p. 0239-4979, 2000.

RASLAN, A. A.; SILVA, E. R.; SANTOS, R. F. **Método de nitretação através da usinagem com descargas elétricas** – NDE. Uberlândia, MG, 2012.

RASLAN, A. A. Implantação lônica em Meio Aquoso por EDM: Resistência ao Desgaste de Aço AISI 4140. Anais... 8º COBEF -Congresso Brasileiro de Engenharia de Fabricação, Salvador, 2015.

SAHU, S. *et al.* Effect of using SiC powder-added dielectric media during electrodischarge machining of Inconel 718 superalloys. **Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering**. N. 330, p. 1-19. 2018.

SANTOS, R. F. Influência do material da peça e do tratamento térmico na eletroerosão dos aços AISI H13 e AISI D6, Disserteção de M.Sc., PUCMinas/Mestrado em Engenharia Mecânica, Belo Horizonte, MG, Brasil, 2007.

SANTOS, R. F. **Nitretação por EDM do aço AISI 4140**. Tese (Doutorado) - Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2013.

SANTOS, R. F. *et al.* Analysis of the Surface Integrity when Nitriding AISI 4140 Steel by the Sink Electrical Discharge Machining (EDM) process. **Procedia CIRP 45**, 303-306, 2016.

SANTOS, R. F. *et al.* Influence of Urea Content Blended with Deionized Water in the Process of Nitriding Using Electrical Discharge Machining on AISI 4140 Steel, **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology 89**,1251-1257, 2017a.

SANTOS, R. F. *et al.* Influence of the electrode material on the nitriding of medium carbon steel using sink electrical discharge machining. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 90, n. 5, p. 2001-2007, 2017b.

SANTOS, R. N. N. *et al.* Nitretação por descargas elétricas da liga Ti-6Al-4V com adição de pó abrasivo SiC ao fluido dielétrico. Matéria, v. 24, n. 3, pp. e-12.474, set. 2019.

SALEH, T.; BAHAR, R. ELID Grinding and EDM for Finish Machining. **Comprehensive materials finishing**, p. 364-407, 2017.

SEN, S.; SEN, U.; BINDAL, C. An approach to kinetic study of borided steels. **Surface and Coatings Technology**, v. 191, n. 2-3, p. 274-285, 2005.

ŞEŞEN, F. E.; ÖZGEN Ö. S.; ŞEŞEN M. K. A Study on Boronizing Kinetics of an Interstitial-Free Steel. Materials Performance and Characterization. **ASTM** International 6 (4), 492-509, 2017.

SILVA, E. R. Otimização e avaliação dos parâmetros de influência do processo AJEDM. Tese (Doutorado) - Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2012.

SILVA, I. C. *et al.* Evolution of boride layers during a diffusion annealing process. **Surface and Coatings Technology309**,155-163, 2017.

SILVA, J. Z. *et al.* Kinetics of Formation of Fe2B Layers on AISI S1 Steel. **Materials Research 21**(5), 01-10, 2018.

SILVA, S. P. *et al.* Surface modification of AISI H13 steel by die-sinking electrical discharge machining and TiAIN coating: A promising hybrid technique to improve wear resistance. **Wear**, v. 462, p. 203509, 2020a.

SILVA, S. P. *et al.* Investigation of nitride layers deposited on annealed AISI H13 steel by die-sinking electrical discharge machining. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology 109**, 2325–2336, 2020b.

SINGH, H.; BANWAIT S. S. Experimental Investigations of Surface Modification of AISI 1045 Die Steel by Electro Discharge Machining Process. **American Journal of Mechanical Engineering 4** (4), 131-141, 2016.

SINHA, A. K. Boriding (Boronizing). **ASM International, ASM Handbook.**, v. 4, p. 437-447, 1991.

SKRÓCIE, W. **Boriding/Boronizing of Steel Materials** [Internet]. 2021. Available from:https://www.totalmateria.com/page.aspx?ID=CheckArticle&site=kts&LN=PL&N M=496

SOARES, J. P. Aços para Ferramentas - Características Tratamentos Aplicações. Porto: Publindústria, 2009. 371 p.

STEVENS, L. **Improvement of Surface Quality in Die-sinking EDM**. Leuven. Thesis [Doctorate degree] – Departament of Mechanical Engineering. Katholieke Universiteit Leuren. 1998.

TABUR, M. *et al.* Abrasive wear behavior of boronized AISI 8620 steel. **Wear 266**, 1106–1112, 2009.

TAKTAK, S. Some mechanical properties of borided AISI H13 and 304 steels. **Materials & Design**, v. 28, n. 6, p. 1836-1843, 2007.

TÜRKMEN, İ; YALAMAÇ E; KEDDAM M. Investigation of tribological behaviour and diffusion model of Fe2B layer formed by pack-boriding on SAE 1020 steel. **Surface &Coatings Technology 377**, 01-12, 2019.

TÜRKMEN, İ.; YALAMAÇ, E. Effect of Alternative Boronizing Mixtures on Boride Layer and Tribological Behaviour of Boronized SAE 1020 Steel. **Metals and Materials International**, p. 1-15, 2021.

USLU, I. *et al.* A comparison of borides formed on AISI 1040 and AISI P20 steels. **Materials & design**, v. 28, n. 6, p. 1819-1826, 2007.

WHAN, R. E. Materials characterization. ASM International, 1986.

WONG, Y. S.; LIM, L. C.; LEE, L. C. Effects of flushing on electro-discharge machined surfaces. **Journal of materials processing technology**, v. 48, n. 1-4, p. 299-305, 1995.

YADAV, V.; JAIN, V. K.; DIXIT, P. M. Thermal stresses due to electrical discharge

machining. International Journal of Machine Tools & Manufacture, v. 42, n. 8, p. 877-888, 2002.

YAN, B. H.; TSAI, H. C.; HUANG, F. Y. The effect in EDM of a dielectric of a urea solution in water on modifying the surface of titanium. **International Journal of Machine Tools and Manufacture**, v. 45, n. 2, p. 194-200, 2005.

ZAGONEL, I. F. **Tratamentos de superfícies de uma liga ferrosa por íons de nitrogênio.** Campinas. Tese [Doutorado] – Curso de FÍsica, Universidade Estadual de Campinas, 2006.