



CEFET-MG

CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA DE MINAS GERAIS

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE MATERIAIS

CURSO DE ENGENHARIA DE MATERIAIS

RAFAEL ELIAS GOMES LEAL

**AVALIAÇÃO DA APLICAÇÃO DE SOLUÇÃO AQUOSA DE TETRABORATO DE
SÓDIO REAGENTE P. A. (BÓRAX) NA USINAGEM POR DESCARGAS
ELÉTRICAS DO AÇO FERRAMENTA ABNT H13**

BELO HORIZONTE

2023

RAFAEL ELIAS GOMES LEAL

**AVALIAÇÃO DA APLICAÇÃO DE SOLUÇÃO AQUOSA DE TETRABORATO DE
SÓDIO REAGENTE P. A. (BÓRAX) NA USINAGEM POR DESCARGAS
ELÉTRICAS DO AÇO FERRAMENTA ABNT H13**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao
Curso de Graduação de Engenharia de Materiais
do Centro Federal de Educação Tecnológica de
Minas Gerais como requisito parcial para a
obtenção do título de Bacharel em Engenharia de
Materiais

Orientador: Prof. Dr. Ernane Rodrigues da Silva

Coorientador: Jorge Wanderson Barbosa

BELO HORIZONTE
2023

RAFAEL ELIAS GOMES LEAL

**AVALIAÇÃO DA APLICAÇÃO DE SOLUÇÃO AQUOSA DE TETRABORATO DE
SÓDIO REAGENTE P. A. (BÓRAX) NA USINAGEM POR DESCARGAS
ELÉTRICAS DO AÇO FERRAMENTA ABNT H13**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao
Curso de Graduação de Engenharia de Materiais
do Centro Federal de Educação Tecnológica de
Minas Gerais como requisito parcial para a
obtenção do título de Bacharel em Engenharia de
Materiais

Aprovado em ____/____/____

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Ernane Rodrigues Silva – Orientador

Jorge Wanderson Barbosa – Coorientador

Prof. Dr. André Barros de Mello Oliveira

Me. Daniel de Moraes Lima

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus por tudo.

Aos meus pais Jacinto Augusto e Maria do Rosário e minha irmã Hortênsia por todo o apoio para cursar uma faculdade de Engenharia e para me orientar ao longo da vida.

Aos meus avós José Leal, Edirce Leal, Francisco Gomes e Raimunda Lucas por serem maravilhosos e proporcionarem momentos únicos em minha vida. Que mesmo os que ficaram apenas em memória sempre serão meus queridos avós.

À minha segunda mãe Idalina Lacerda e sua filha Verônica Lacerda, por participarem com muito carinho e ativamente da minha criação influenciando positivamente na pessoa que me tornei.

À querida Bárbara Alyne por todos os motivos que ela sabe e por estar me apoiando desde que me conheceu, pelas conversas e momentos únicos em que me mostrou sua simplicidade, gentileza e carinho das formas mais sinceras e amáveis.

Ao meu amigo João Antunes por toda ajuda ao longo dos últimos anos, pelas conversas e momentos únicos que tivemos que com toda certeza me ajudaram a chegar aonde estou e a vislumbrar um futuro melhor.

Ao meu orientador Professor Dr. Ernane Rodrigues da Silva por aceitar o meu pedido de orientação, por toda atenção que prestou mesmo antes do trabalho de conclusão e por todo suporte com conversas, conselhos e orientações que aconteceram ao longo dos últimos anos.

Ao meu Coorientador Jorge Wanderson Barbosa, por toda atenção e orientação que prestou ao longo dos últimos anos. Por todas as conversas e conselhos que me ajudaram a desenvolver uma visão mais analítica e humana das diversas facetas da vida.

À Professora Aline Silva Magalhães por toda orientação durante a disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso II e pela abordagem tranquilizadora durante as aulas.

Aos Professores e técnicos do DEMAT que marcaram positivamente minha passagem desde meu ingresso no curso de Engenharia de Materiais e que me proporcionaram aulas e conversas enriquecedoras.

Ao CEFET-MG por toda a infraestrutura e qualidade de ensino que remonta à sua origem e que a cada ano constrói uma parte da vida de cada aluno e funcionário que tenha passado por suas instalações.

RESUMO

O processo não convencional de Usinagem por Descargas Elétricas (EDM – *Electrical Discharge Machining*) é utilizado na fabricação de peças complexas e de difícil usinagem, que ao serem submetidas a tratamentos de endurecimento superficial que podem ser termoquímicos como o de boretção, apresentam tanto a resistência ao desgaste quanto a resistência a fadiga melhoradas. Este trabalho apresenta um estudo da usinagem do aço ferramenta para trabalho a quente ABNT H13 realizado em uma máquina de Usinagem por Descargas Elétricas por Penetração (S-EDM) adaptada, utilizando cobre eletrolítico como eletrodo ferramenta e uma solução eletrolítica, como fonte de boro, contendo o Bórax reagente Padrão Analítico ($\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$), que foi diluído em água deionizada. Para a identificação de alterações morfológicas, microestruturais e mensuração da espessura das camadas formadas, imagens foram obtidas utilizando microscopia óptica. A dureza da camada foi mensurada através do ensaio de microdureza Vickers, enquanto a presença de boretos foi verificada por meio de difração de Raios-X (DRX) combinando-se aos resultados da Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV). Esta difração que forneceu uma imagem da seção transversal com destaque para um ponto denominado como A, na camada refundida, onde foi realizada análise pontual de Espectroscopia de raios X por dispersão em energia (EDS). Com a solução contendo bórax, foi obtida uma camada boretada com espessura média de $45\mu\text{m}$ e 639 HV, representando um ganho de 131% no valor da dureza em relação à dureza de 277HV do material base. A fase Fe_2B foi observada nos difratogramas de Raios-X. Diferente de outros trabalhos em que mudanças metalúrgicas provocadas pelo aquecimento seguido do resfriamento brusco promoveram uma camada refundida dura com uso do fluido dielétrico, nesta pesquisa não foi observado este tipo de camada, em virtude da presença do cobre que foi depositado pelo desgaste do eletrodo de cobre eletrolítico formando boreto de cobre com um valor médio de microdureza Vickers de 176HV, que é 36% abaixo do valor da dureza de 277HV do material base.

Palavras-chave: Boretção; Usinagem por Descargas Elétricas (EDM); Aço ABNT H13; Bórax ($\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$).

ABSTRACT

The unconventional process of Electrical Discharge Machining (EDM – Electrical Discharge Machining) is used in the manufacture of complex and difficult-to-machine parts, which, when applied to surface resistance treatments that can be thermochemical such as boriding, present both the resistance improved wear and fatigue resistance. This work presents a study of the machining of ABNT H13 hot work tool steel carried out in an adapted Penetration Electrical Discharge Machining (S-EDM) machine, using electrolytic copper as tool electrode and an electrolytic solution, as a source of boron, containing the reagent Borax Analytical Standard ($\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$) which was diluted in deionized water. To identify morphological and microstructural changes and measure the thickness of the layers formed, images were obtained using optical microscopy. The hardness of the layer was measured using the Vickers microhardness test, while the presence of borides was verified using X-Ray diffraction (XRD) combining with the results of Scanning Electron Microscopy (SEM), which resulted in an image of the cross section with emphasis on a point called A, in the remelted layer, where a spot analysis of Energy Dispersive X-Ray Spectroscopy (EDS) was carried out. With the solution containing borax, a borided layer with an average thickness of $45\mu\text{m}$ and 639 HV was obtained, representing a gain of 131% in the hardness value in relation to the 277HV hardness of the base material. The Fe_2B phase was observed in the X-Ray diffractograms. Unlike other studies in which metallurgical changes caused by heating followed by sudden heating promoted a hard remelted layer with the use of dielectric fluid, a hard layer remelted was not observed in this research due to the presence of copper that was deposited by the wear of the copper electrode electrolytic forming copper hole with an average Vickers microhardness value of 176HV, which is 36% below the 277HV hardness value of the base material.

Keywords: Boring; Die-Sinking EDM; ABNT H13 steel; Borax ($\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$).

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Classificação dos processos de Boretção.....	16
Figura 2 - Seção transversal boretada com camadas de FeB e Fe₂B do aço ABNT H13 .	19
Figura 3 - Difração de raios-X da superfície do aço ABNT H13.....	20
Figura 4 - Diferentes processos para aplicação de EDM	21
Figura 5 - Fases da descarga elétrica e formação do canal de plasma no processo Usinagem por Descargas Elétricas	22
Figura 6 - Eletrodo de Grafita para EDM	23
Figura 7 - Eletrodo maciço de cobre 150 mm	24
Figura 8 - Métodos de circulação do fluido dielétrico no processo de (EDM).....	26
Figura 9 – Mecanismo de implantação iônica da nitretação por descargas elétricas	28
Figura 10 - Interação dos íon e elétrons do plasma com a superfície catódica	29
Figura 11 - Espectro de (DRX) para do Aço ABNT H13 boretado	31
Figura 12 - Etapas realizadas para obtenção de resultados com ensaios práticos	32
Figura 13 - Adaptações e componentes gerais da máquina de EDM.....	35
Figura 14 - Modelo bipartido representativo da amostra do aço ABNT H13	36
Figura 15 - Conjunto do porta eletrodos e porta amostras com esquema de montagem	37
Figura 16 - Componentes internos da cuba auxiliar	38
Figura 17 - Painel de controle e seus respectivos botões de ajustes	40
Figura 18 - Microscópio óptico Fortel	41
Figura 19 - Microdurômetro Shimadzu HMV-2T	42
Figura 20 - Imagem de microscopia óptica da seção transversal da amostra usinada por EDM.....	45
Figura 21 - Imagem de microscopia óptica de uma região da seção transversal da amostra usinada por EDM após ensaio de microdureza Vickers	47

Figura 22 - Difratoogramas de Raios-X da superfície da amostra usinada por eletroerosão com eletrodo ferramenta de cobre e do aço ABNT H13 de referência.....	48
Figura 23 - Imagem de MEV da seção transversal da amostra usinada por EDM com eletrodo ferramenta de cobre	49
Figura 24 - Gráfico do espectro de EDS no ponto A indicado na imagem de MEV	50

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Classificação AISI dos aços ferramenta	14
Tabela 2 - Composição química típica do Aço ABNT H13.....	15
Tabela 3 - Estados de fornecimento e dureza típica do Aço ABNT	15
Tabela 4 - Escolha do material para o eletrodo na (EDM) em função do fator analisado	24
Tabela 5 - Parâmetro e especificações para o processo de usinagem por EDM	39
Tabela 6 - Parâmetros para o ensaio de DRX.....	43
Tabela 7 - Valores de microdureza Vickers das camadas refundida, intermediária (boretada) e do material base (substrato – aço ABNT H13)	46

LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E SÍMBOLOS

ABNT: Associação Brasileira de Normas Técnicas

AISI: (Instituto Americano do Ferro e Aço) *American Iron and Steel Institute*

CEFET-MG: Centro Federal de Educação e Tecnologia de Minas Gerais

CV: Cavalo Vapor

DEMAT: Departamento de Engenharia de Materiais

DRX: Difração de raios-x

EDM: (Usinagem por Descargas Elétricas) *Electrical Discharge Machining*

EDS: (Espectroscopia por Energia Dispersiva) *Energy Dispersive Spectroscopy*

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

MO: Microscopia Óptica

NDE: Nitretação por Descargas Elétricas

P. A.: Padrão Analítico

Rpm: Rotação por Minuto

S-EDM: (Usinagem por Descargas Elétricas por Penetração) *Diesinking Electrical Discharge Machining*

W-EDM: (Usinagem por Descargas Elétricas a Fio) *Wire Electrical Discharge Machining*

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	10
2	OBJETIVOS.....	12
2.1	OBJETIVOS GERAIS.....	12
2.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	12
3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	13
3.1	AÇOS FERRAMENTA PARA TRABALHO A QUENTE	13
3.1.1	Aço ABNT H13.....	15
3.2	GENERALIDADES DA BORETAÇÃO	16
3.2.1	Boretação do Aço ABNT H13	18
3.3	USINAGEM POR DESCARGAS ELÉTRICAS	20
3.3.1	Processo de Eletroerosão	20
3.3.2	Eletrodos usados na EDM.....	23
3.3.3	Parâmetros da EDM.....	25
3.3.4	Fluido Dielétrico.....	25

3.4	BORETAÇÃO NA USINAGEM POR DESCARGAS ELÉTRICAS	27
3.5	BÓRAX	30
3.6	CARACTERIZAÇÃO DE BORETOS NO AÇO ABNT H13 POR DRX	30
4	MATERIAIS E MÉTODOS	32
4.1	ADAPTAÇÕES NA MÁQUINA DE EDM.....	34
4.2	CONFECÇÃO DOS ELETRODOS PEÇA E FERRAMENTA	35
4.3	PREPARAÇÃO DA SOLUÇÃO AQUOSA APLICADA NA EDM.....	38
4.4	APLICAÇÃO DO PROCESSO DE USINAGEM POR EDM	39
4.5	PREPARAÇÃO DAS AMOSTRAS PARA ANÁLISES	41
5	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	44
5.1	AVALIAÇÃO DAS CAMADAS SUBSUPERFICIAIS	44
5.2	MICRODUREZA VICKERS	45
5.3	DIFRATOGRAMAS DE RAIOS-X	48
5.4	MEV E EDS.....	49
6	CONCLUSÕES.....	51
7	RECOMENDAÇÕES.....	52
	REFERÊNCIAS	47

1 INTRODUÇÃO

Segundo El-hofy (2005); Abbas et al. (2007) e Kumar et al. (2009), o processo de Usinagem por Descargas Elétricas (EDM – *Electrical Discharge Machining*) existe em condições distintas de nível tecnológico desde o final do Século XVIII, com a descoberta da erosão por descargas elétricas, observada por meio das pesquisas de Joseph Priestly.

Durante o século XX, a técnica de EDM foi impulsionada devido aos diversos eventos bélicos que tinham demandas dos governos, por tecnologias eficazes, e assim surgiram estudos sobre os fenômenos de faíscas de descargas elétricas, submersas em óleo mineral, que são mais uniformes que no meio ambiente (EL-HOFY, 2005).

Nas décadas de 1950 e 1960 a produção de equipamentos de EDM teve um aumento, porém, com grandes limitações de materiais e desempenho, que foram solucionadas por meio das técnicas de modelagem matemática, culminando na década de 1970, com o desenvolvimento da eletroerosão por corte a fio e componentes eletrônicos mais eficazes (ABBAS et al., 2007).

Em um processo de EDM, os componentes dos equipamentos e fenômenos envolvendo a formação do canal de plasma são responsáveis pela erosão do material e a alta energia envolvida no processo, de tal forma que provoca modificações superficiais, alterando as propriedades físicas e químicas do material usinado (BARBOSA, 2023).

Em função da capacidade de modificar superfícies por meio da técnica de EDM substituindo-se o fluido dielétrico convencional, um hidrocarboneto, por solução rica em elementos de interesse, diversos trabalhos foram desenvolvidos com esta premissa segundo Fernandes (2020).

As pesquisas envolvem tanto metais ferrosos quanto não ferrosos, que é o caso dos trabalhos de Camargo et al. (2008) e Santos et al. (2019), que obtiveram sucesso ao utilizar a ureia como fonte de nitrogênio para aplicar o processo de nitretação por descargas elétricas, denominado por Raslan (2015) como NDE, ao usinar a liga de titânio Ti6Al4V.

Para metais ferrosos como o aço ABNT 4140, Santos (2013) também obteve êxito na nitretação por descargas elétricas. E ainda, no aço ABNT 8620, Nascimento et al. (2022) descreve ter realizado boretação por descargas elétricas utilizando solução aquosa de octaborato de sódio tetrahidratado ($\text{Na}_2\text{B}_8\text{O}_{13}\cdot 4\text{H}_2\text{O}$). Em ambas as pesquisas a implantação iônica por plasma eletrolítico foi o mecanismo de enriquecimento superficial, descrito nos trabalhos.

Classificados como tratamentos termoquímicos os processos de cementação, nitretação, carbonitretação e boretação, são capazes de formar camadas superficiais endurecidas no material, favorecendo o aumento da resistência ao desgaste, à fadiga e à corrosão, aumentando a vida útil de componentes em trabalhos à frio ou a quente como no caso do aço ferramenta para trabalho a quente ABNT H13, muito aplicado na área de ferramentaria das indústrias (COSTA, 2010).

2 OBJETIVOS

2.1 OBJETIVOS GERAIS

O objetivo geral deste trabalho é avaliar a presença do elemento boro, possível formador de boretos de ferro nas camadas superficiais do aço ABNT H13, usinado por meio do processo de Usinagem por Descargas Elétricas por penetração, aplicando como fonte de boro a solução aquosa de Tetraborato de sódio reagente P. A. (Padrão Analítico), conhecido comercialmente como Bórax ($\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$).

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Utilizar máquina de EDM adaptada com cuba auxiliar de aço inoxidável para aplicação da solução aquosa contendo Tetraborato de sódio na usinagem de amostras do aço ABNT H13;

Avaliar a formação da camada refundida e da camada intermediária na superfície do aço ABNT H13 após o processo de usinagem por EDM, por meio de microscopia óptica;

Mensurar a espessura das camadas refundida e intermediária;

Medir a microdureza Vickers das camadas refundida e intermediária;

Caracterizar por difração de raios-x as fases presentes na superfície da amostra usinada por EDM e analisar por meio de espectroscopia por dispersão de energia (EDS) via MEV a presença do elemento boro na seção transversal das camadas.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A revisão bibliográfica aborda os assuntos relacionados ao Aço ABNT H13 e o processo de boretação por método não convencional via EDM. No processo de Usinagem por Descargas Elétricas, seus princípios e parâmetros são revisados a fim de conciliar com o processo de tratamento superficial termoquímico de Boretção por plasma eletrolítico. Os diferentes meios de obtenção do elemento boro para formação de boretos, são abordados de forma a demonstrar a viabilidade das reações e mecanismos envolvidos no processo de boretação, ao mesmo tempo em que a caracterização por difração de Raios-X é descrita como usual para verificação da presença de boretos de ferro no Aço ABNT H13.

3.1 AÇOS FERRAMENTA PARA TRABALHO A QUENTE

Conforme (COSTA, 2010), existem definições diversas e não exatas para o que representa um aço ferramenta, mas dentro do escopo de informações existentes, uma classificação seguindo critérios de composição química, aplicações e tratamentos térmicos é realizada. Para aços ferramenta, a classificação AISI que é exposta na Tabela 1, evidencia diferentes aplicações em função da composição química e das características metalúrgicas. A seleção do melhor aço para determinada aplicação deve seguir as demandas de projeto e a acessibilidade ao material e fontes de processamento mais favoráveis para obtenção de propriedades e custos viáveis.

Os aços ferramentas apresentam em seu portfólio de aplicações, as mais rigorosas demandas se comparados aos demais tipos de aços devido a gama de propriedades em função dos elevados teores de elementos de liga, a homogeneidade química e baixos teores de inclusões internas. Para trabalhos a quente, os aços mais usuais apresentam média ou alta liga com baixos teores de carbono, de forma que as aplicações serão possíveis em função das propriedades essenciais ao trabalho a quente como, por exemplo, a resistência à deformação nas temperaturas de uso e de processamento, a resistência ao impacto, à erosão, a trincas a quente e por fim, uma boa usinabilidade (COSTA, 2010).

Tabela 1 - Classificação AISI dos aços ferramenta

Aplicação	Tipos de aços ferramenta	Simbologia
Temperáveis e resistentes ao choque	Aços temperáveis em água (<i>water</i>)	W
	Aços resistentes ao choque (<i>shock</i>)	S
Aços para fins especiais	Tipo baixa liga (<i>Low alloy</i>)	L
	Tipo carbono-tungstênio	F
	Aços para moldes	P
Aços para trabalho a frio	Aços temperáveis em óleo (<i>Oil</i>)	O
	Aços média liga, temperáveis ao ar (<i>Air</i>)	A
	Aço alto carbono, alto cromo	D
Aços para trabalho a quente (<i>Hot working</i>)	Ao cromo	H1-H19
	Ao tungstênio	H20-H39
	Ao molibdênio	H40-H59
Aços rápidos	Ao tungstênio	T
	Ao molibdênio	M

Fonte: Adaptado de Costa, 2010.

A série dos aços para trabalho a quente é a que recebe a simbologia H, que pode ser subdividida em três subgrupos, conforme a Tabela 1. Os mais usuais são os aços H11, H12 e H13 que são resistentes à erosão de fundidos e resistentes a trincas. As principais características e aplicações dos aços ferramentas para trabalhos a quente da série H envolvem moldes para processamento de metais não ferrosos como alumínio, zinco e magnésio até o processamento de polímeros termoplásticos, matrizes e punções para forjamento e extrusão a quente. Também apresenta aplicações em facas e tesouras para trabalho a quente e peças estruturais de ultra alta resistência.

3.1.1 Aço ABNT H13

O Aço ABNT H13 é aplicado para trabalhos a quente com utilização em matrizes de forjamento, estampagem, moldes para fundição sob pressão de metais não ferrosos, moldes para polímeros, dentre outras aplicações (SOARES, 2009).

A composição típica do Aço ABNT H13 e características de valores mínimos e máximos de C, Mn, P, Si, Cr, V e Mo estão relacionadas conforme a Tabela 2 (SOARES, 2009).

Tabela 2 - Composição química típica do Aço ABNT H13

C		Mn		P	S	Si		Cr		V		Mo	
mín.	máx.	mín.	máx.	máx.	máx.	mín.	máx.	mín.	máx.	mín.	máx.	mín.	máx.
0,32	0,45	0,20	0,60	0,03	0,03	0,80	1,25	4,75	5,50	0,80	1,2	1,10	1,75

Fonte: Adaptado de Gerdau, 2003.

Pela composição química, percebe-se a variedade de elementos de liga que conferem propriedades de tenacidade e elevada dureza em trabalhos a quente conferindo boa estabilidade dimensional e resistência a abrasão, que são demandadas para processos envolvendo injetados e fundidos.

O aço ABNT H13 apresenta temperabilidade e suscetibilidade a tratamentos térmicos ao mesmo tempo que tem boa trabalhabilidade em eletroerosão, polimentos e texturizações. É possível de ser obtido nos estados recozido, esferoidizado ou temperado e revenido. O mais comum é o esferoidizado de baixa dureza conforme relacionado na Tabela 3.

Tabela 3 - Estados de fornecimento e dureza típica do Aço ABNT

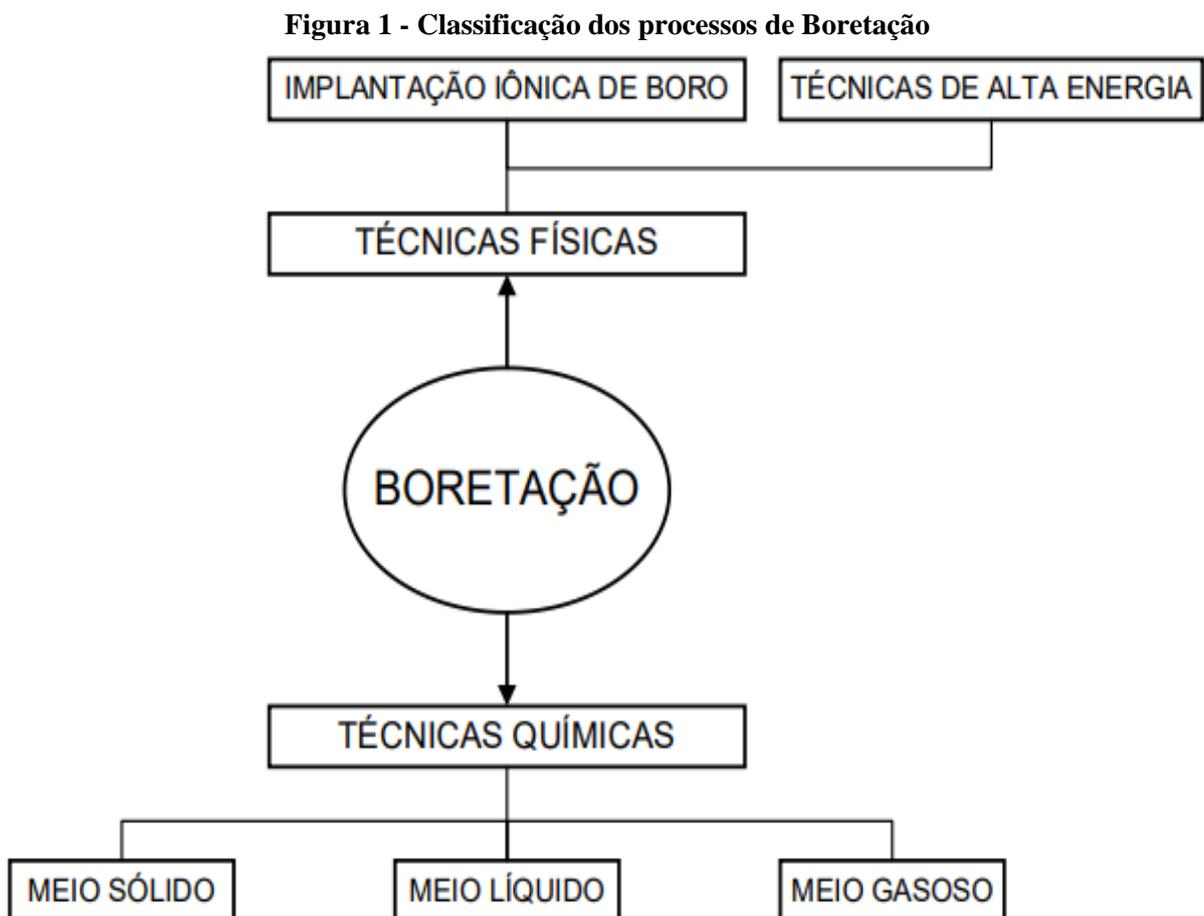
Material	Tratamento térmico	Estado de fornecimento	Dureza de fornecimento
ABNT H13	Esferoidização	Laminado, forjado e/ou usinado, trefilado	Máx. 262HB (trefilado) Máx. 230HB (outros)

Fonte: Adaptado de Soares, 2009.

3.2 GENERALIDADES DA BORETAÇÃO

A boretação é um processo de tratamento superficial termoquímico que visa a obtenção de camadas de elevada dureza para superfícies que apresentem condições operacionais de desgaste em função da baixa dureza do material base. O elemento boro é dissociado pelo metal base por causa de seu pequeno raio atômico formando boretos (BRAKMAN, GOMMERS e MITTEMEIJER, 1989).

Conforme revisado por Kulka (2019), a boretação pode ser alcançada por distintos mecanismos que são classificados como processos físicos e químicos. Os processos físicos envolvem a dissociação de íons com técnicas de implantação iônica e técnicas de alta energia, enquanto os métodos químicos envolvem meios líquidos, meios sólidos e meios gasosos. De forma geral, sua classificação pode ser visualizada de acordo com a Figura 1.



Fonte: Adaptado de Kulka, 2019.

Uma vez que o propósito da boretação é a obtenção de camadas superficiais mais duras que o material base, de forma a reduzir o desgaste com baixo coeficiente de atrito, a formação de boretos característicos de elevadas durezas é fortuita. Os boretos formados podem ser de ferro ou cromo, sendo os boretos de ferro (FeB e Fe₂B) mais comuns em tratamentos de materiais ferrosos de forma a obter dureza de 2000 HV, aproximadamente (GÖK et al., 2017).

Uma análise foi realizada por Costa (2010) de forma a comparar os aços AISI 1010, AISI 1040, D2 e inox 304 em relação os efeitos gerais dos distintos tratamentos termoquímicos de nitretação, cementação e boretação com os respectivos aços sem tratamento. A nitretação foi realizada a gás por 150 minutos em temperatura de 565°C, já a cementação foi realizada a 930°C por 180 minutos e temperados em água. O endurecimento por transformação dos aços D2 e inox 304 ocorreu com aquecimento lento até 1020°C e temperados em óleo, já a boretação de 2, 4, 6 e 8 horas ocorreram a 900°C.

Com relação ao parâmetro de espessura de camada, a cementação obteve os maiores valores para os aços AISI 1010 e AISI 1040, com 300µm e 290µm, respectivamente, enquanto a boretação em 8h obteve os maiores valores para os aços D2 e inox 304 com camadas de aproximadamente 45µm e 80µm, respectivamente. Importante ressaltar que a cementação não foi realizada nos aços D2 e inox 304 em função de não ser usual para tais materiais.

Para o parâmetro de dureza Vickers, o autor obteve os maiores valores para boretação em 8h em todos os aços com 1500 HV no caso do AISI 1010, 1350 HV para o aço AISI 1040, 1175 HV para o aço D2 e 1160 HV no caso do inox 304. O aço inox 304 obteve dureza próxima da obtida na boretação de 8h comparada com a nitretação de aproximadamente 1150 HV.

Na comparação da perda de massa por desgaste e por corrosão em aços que sofreram distintos processos termoquímicos, Costa (2010) observou que a boretação sobressai positivamente, ou seja, com menores valores de desgaste em relação aos demais processos nos dois parâmetros para os quatro tipos de aços analisados.

De forma mais detalhada, os aços sem tratamento apresentaram maiores desgastes em todos os casos, sendo que para o aço AISI 1010 a cementação apresentou maior desgaste de massa perdendo 34 mg, enquanto a boretação de 8h teve desgaste de apenas 5 mg. No aço AISI 1040 a perda de massa foi significativamente inferior ao apresentado no aço AISI 1010, de forma que a condição sem tratamento apresentou perda de 16mg, o cementado 6mg e o boretado por 8h apenas 2,5mg, sendo que perda de massa do aço AISI 1040 é inferior em função do maior teor de carbono presente em sua estrutura que o aço AISI 1010. Para o aço D2 a menor perda foi para a boretação de 2h, reduzindo em 2,5mg enquanto a boretação de 6h se obteve o melhor resultado no inox 304 com perda de 1mg, apenas (COSTA, 2010).

Em relação ao desgaste de massa por corrosão, o aço D2 apresentou os maiores desgastes com perda acima de 350 mg para as condições sem tratamento, nitretado e endurecidos por transformação. As boretações em 2, 4, 6 e 8 horas, respectivamente, apresentaram perdas entre 90 e 110 mg. Os aços AISI 1010 e AISI 1040 apresentaram perdas de mais de 100 mg para condições sem tratamento, nitretação e cementação enquanto as perdas nas boretações foram similares para os distintos tempos, mas superiores para o AISI 1040 com perdas de 45 mg enquanto para o AISI 1010 as perdas foram de 15 mg (COSTA, 2010).

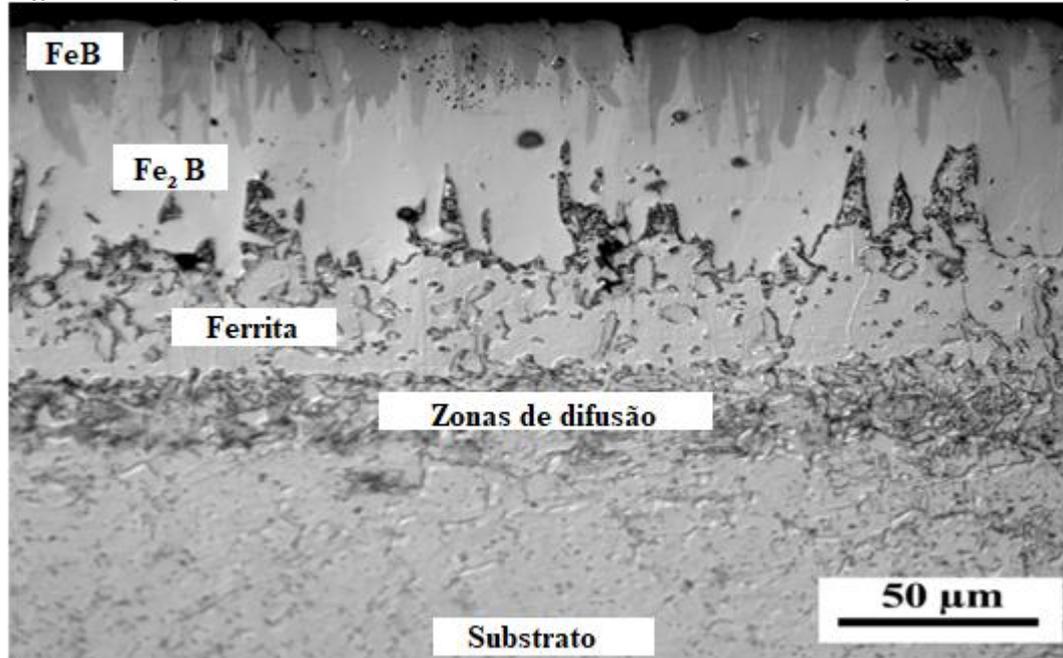
O aço inox 304 apresentou os menores valores de perdas mássicas por corrosão em todos os tratamentos e até para a condição sem tratamento, de forma que o mesmo em conjunto com a nitretação apresentou perdas de 40 e 35 mg, respectivamente. As boretações em 2 e 4h foram obtidas perdas de 15 mg enquanto para os tempos de 6 e 8h as perdas ficaram abaixo de 10 mg (COSTA, 2010).

3.2.1 Boretação do Aço ABNT H13

Conforme realizado por Morón et al. (2020), um processo de boretação em caixa utilizando pó de Ekabor II em temperatura de 950°C e tempo de 6h em forno elétrico, permitiu a obtenção da microestrutura compatível com a formação de camadas de boretos polifásicos (FeB e Fe₂B) em um aço ABNT H13.

A Figura 2 ilustra as camadas obtidas após o tratamento com pó de Ekabor II, de forma que em escala de 50 μ m as camadas de boretos foram formadas acima de uma zona difusional e de um constituinte ferrítico, semelhante a abordagem de Zimmerman (2013), que de acordo com o processo realizado em faixa austenítica, os aços podem ser simultaneamente boretados e endurecidos por resfriamento ao ar após a boretação.

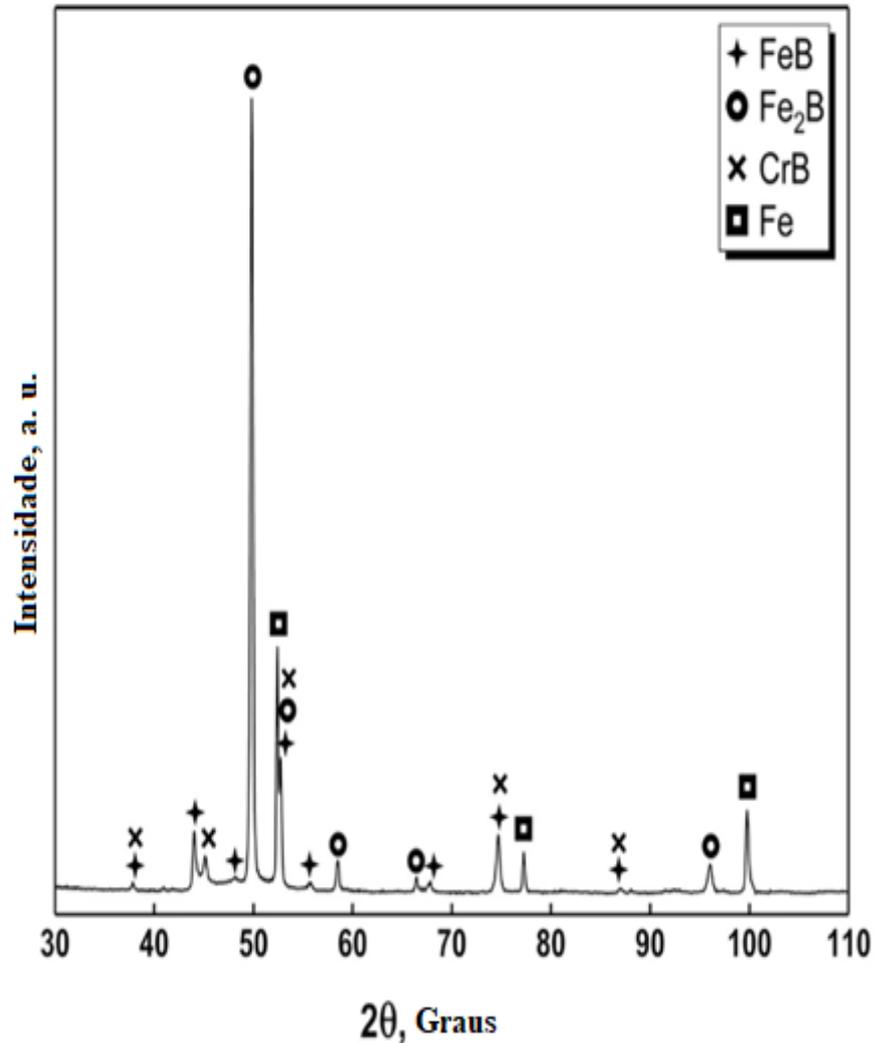
Figura 2 - Seção transversal boretada com camadas de FeB e Fe₂B do aço ABNT H13



Fonte: Adaptado de Morón et al, 2020.

Morón et al. (2020), realizaram análise de Difração de Raios-X numa ampla faixa de varredura (2θ de 30 a 110) em que se evidenciou a presença de picos relacionados as fases Fe₂B, FeB, CrB e Fe, demonstrando assim a formação de boretos previamente abordados em literatura conforme revelado pelo DRX da Figura 3.

Figura 3 - Difração de raios-X da superfície do aço ABNT H13



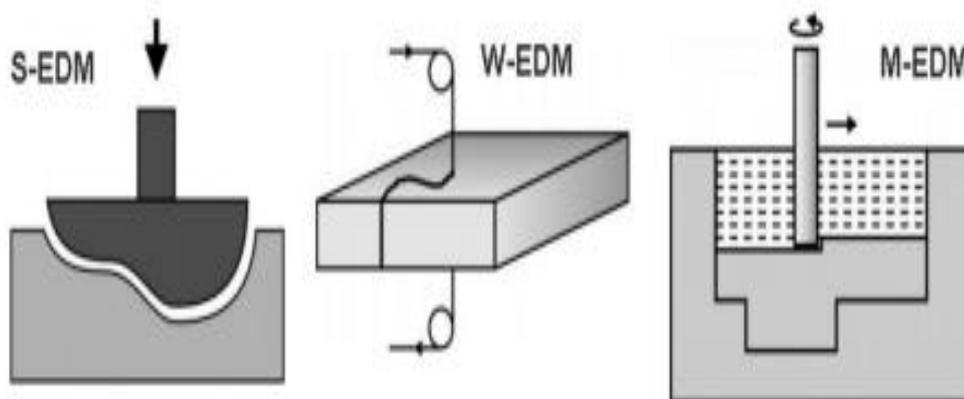
Fonte: Adaptado de Morón et al., 2020.

3.3 USINAGEM POR DESCARGAS ELÉTRICAS

3.3.1 Processo de Eletroerosão

Os processos de usinagem por descargas elétricas (EDM), popularmente conhecidos como eletroerosão, podem ser classificados quanto aos eletrodos que podem ser de grafita, de cobre eletrolítico, ou fios utilizados e movimentos usuais de processo que podem ser verticais, horizontais e rotacionais. Têm-se como principais processos o S-EDM, W-EDM e M-EDM conforme ilustrado na Figura 4 (BLEYS et al., 2006).

Figura 4 - Diferentes processos para aplicação de EDM



Fonte: BLEYS et al., 2006.

Conforme a Figura 4, a eletroerosão a penetração (S-EDM – *Die-sinking Electrical Discharge Machining*) utiliza um eletrodo que realiza movimentos latitudinais cíclicos de forma a remover cavacos em forma de partículas. O eletrodo pode ser de cobre eletrolítico ou de grafita, com ajustes e parâmetros relacionados a determinado projeto, ou seja, a geometria e as condições superficiais são consideradas no momento de ajustar o afastamento, bem como as condições de perpendicularidades e parâmetros eletrônicos do equipamento de EDM (BLEYS et al., 2006).

Seguindo-se os processos de EDM ilustrados na Figura 4, tem-se a eletroerosão por corte a fio (W-EDM – *Wire Electrical Discharge Machining*) que utiliza um fio em roldanas guia de movimentação contínua, promovendo a usinagem por meio de descargas elétricas simultâneas. O fio tensionado e guiado pelas roldanas passa em frente a peça a uma distância de trabalho, enquanto o controle das descargas elétricas entre fio e peça ocorre por uma fonte geradora e controladora de pulsos e segue uma programação via comando numérico computadorizado (CNC - *Computer Numeric Control*) (BLEYS et al., 2006).

O último processo ilustrado na Figura 4 é a eletroerosão por fresagem (M-EDM – *Milling Electrical Discharge Machining*) que 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 empregando no mínimo dois eixos 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 (BLEYS et al., 2006).

Raslan (2015) relata que a Usinagem por Descargas Elétricas (EDM – *Electrical Discharge Machining*), é um processo não convencional de usinagem, também conhecido popularmente como eletroerosão. A EDM é um processo termoelétrico cuja fonte de energia tem sua origem nas descargas elétricas geradas por canal de plasma.

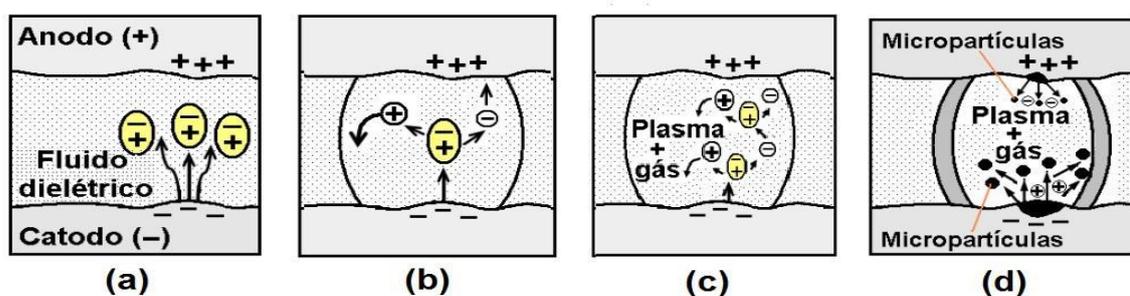
O plasma se forma devido a passagem de corrente elétrica entre dois eletrodos, a peça e a ferramenta, ambos imersos em fluido dielétrico. A transferência de íons contido no canal e plasma transforma a energia cinética gerada por eles em energia térmica ao se chocarem contra a superfície da peça, no caso do ajuste da polaridade positiva na ferramenta.

O calor proporciona a fusão e evaporação do material, e a sua remoção é facilitada pela turbulência do fluido, que possibilita a remoção de material. Normalmente, os materiais empregados como eletrodo ferramenta são: cobre e grafita.

Os eletrodos peça e ferramenta trabalham com uma distância entre si denominada fenda de trabalho ou *gap*, que varia entre 5 a 100 μm , dependendo dos parâmetros de trabalho ajustados na máquina de eletroerosão. O *gap* é preenchido pelo fluido dielétrico aplicado no processo, que pode ser, normalmente, um hidrocarboneto (óleo mineral) ou água deionizada.

Segundo König (2013), na teoria termoelétrica o calor gerado pelas descargas elétricas na região do canal próximo da superfície, funde o material que é removido e ejetado da poça fundida. A descarga elétrica ocorre durante quatro etapas, como mostra a Figura 5 que ilustra as fases do processo de EDM elaborada por Stevens (1998) e adaptada por Barbosa (2022).

Figura 5 - Fases da descarga elétrica e formação do canal de plasma no processo Usinagem por Descargas Elétricas



Fonte: Adaptado de Barbosa, 2022.

Na primeira fase, de ignição (Figura 5 (a)), a diferença de potencial aplicada entre os eletrodos emite elétrons primários do catodo, que são atraídos pelo anodo. Durante o caminho percorrido pelos elétrons primários na fenda de trabalho, eles se chocam contra átomos do dielétrico, produzindo íons positivo e/ou negativos e elétrons secundários.

A segunda fase (Figura 5 (b)), de formação de canal de plasma, íons positivos são atraídos pelo anodo e elétrons pelo catodo, aquecendo o fluido dielétrico, com aumento na temperatura ocorre a diminuição da resistência dielétrica. O aquecimento cria o canal de plasma na forma de uma bolha de vapor.

Na terceira fase (Figura 5 (c)), de fusão, o choque dos elétrons e íons positivos contra a superfície aquece o material, devido a transformação da energia cinética em térmica. E por fim, na quarta fase (Figura 5 (d)), de ejeção do material, após o termino do tempo de descarga, (T_{ON}), ajustado na máquina para o regime de trabalho, a corrente é interrompida, o canal se desfaz e o material fundido é transformado em pequenas gotas ejetadas da poça fundida. Uma parte do material removido é resolidificado na superfície do eletrodo peça, formando a camada refundida.

3.3.2 Eletrodos usados na EDM

Os eletrodos comumente utilizados na EDM são de Cobre eletrolítico e de grafita, mas outros eletrodos de metal duro, latão, ligas de cobre-tungstênios podem ser empregados (BARBOSA, 2023; BENEDIC,1987). A Figura 6 ilustra um eletrodo de grafita, enquanto a Figura 7 ilustra eletrodos de cobre eletrolítico, ambos usuais na EDM.

Figura 6 - Eletrodo de Grafita para EDM



Fonte: GT Grafitas, 2023.

Figura 7 - Eletrodo maciço de cobre 150 mm

Fonte: IIEDM, 2023.

Em processos industriais, a escolha de materiais envolve um critério de seleção geralmente relacionado ao custo, à dificuldade de obtenção e eficácia relacionada a propriedades demandadas. Na Tabela 4, observa-se uma comparação entre eletrodos de Cobre eletrolítico e de grafita em função dos critérios de seleção.

Tabela 4 - Escolha do material para o eletrodo na (EDM) em função do fator analisado

Cobre Eletrolítico	Grafita
Maior condutividade térmica	Maior ponto de fusão
Maior condutividade elétrica	Maior taxa de remoção do material
Melhor acabamento superficial	Maior resistência ao desgaste do eletrodo
Maior precisão dimensional da peça	Melhor usinabilidade do eletrodo

Fonte: BARBOSA, 2023.

Observa-se na Tabela 4 que o eletrodo de cobre eletrolítico tem como destaque a maior precisão dimensional da peça e sua boa condutividade, mas apresenta mais desgaste e menor taxa de remoção que o eletrodo de grafita.

Segundo Müller et al. (2015), para peças de maior ponto de fusão, a grafita se mostra mais eficiente, enquanto para peças de menor ponto de fusão o cobre eletrolítico tem melhor desempenho.

3.3.3 Parâmetros da EDM

Por ser um processo que visa a usinagem de forma não convencional, mas controlada, a EDM apresenta variáveis de processo que regulam a taxa de remoção de material promovendo condições superficiais com rugosidade e dimensões estáveis. As variáveis do processo também visam a manutenção do eletrodo ferramenta, ao mesmo tempo que possibilitam as reações e interações com o fluido dielétrico e a peça. Alguns parâmetros podem ser elencados de forma a tornar o processo de EDM mais eficiente (BENEDICT, 1987).

O material de eletrodo ferramenta varia em função do custo e do material usinado. A região e área superficial do eletrodo influenciam na taxa de remoção e na estabilidade dimensional da peça final. A penetração do arco elétrico impacta na rugosidade e remoção de material, que também se relacionam com a corrente, frequência, tempo de onda ligado e desligado, retração de eletrodo e limpeza do fluido dielétrico (BENEDICT, 1987).

3.3.4 Fluido Dielétrico

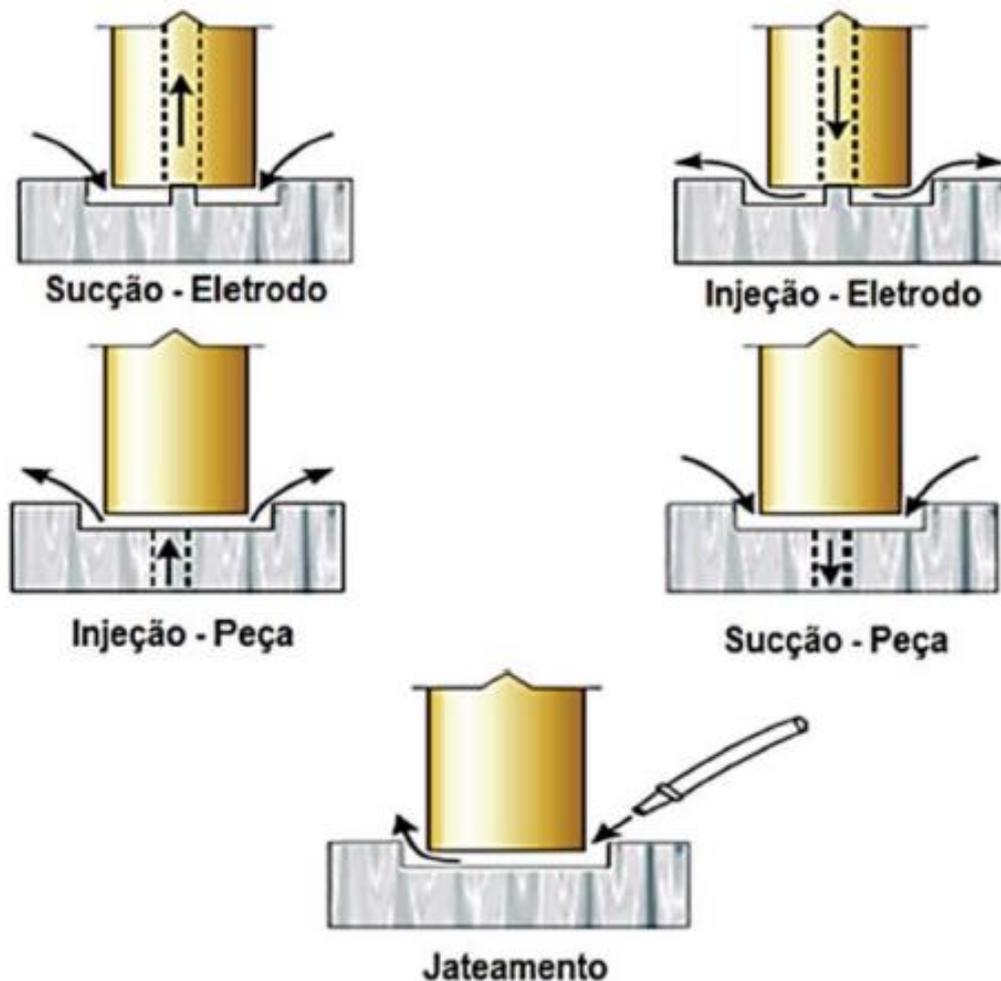
Em um processo de usinagem por descargas elétricas os principais fluidos dielétricos são os óleos sintéticos, minerais e vegetais, querosene e soluções com água deionizada. O fator mais importante para o fluido dielétrico é sua alta rigidez dielétrica com rápida deionização, ao mesmo tempo que apresenta boa refrigeração e baixa viscosidade. (MCGEOUGH, 1988; LIMA E RASLAN, 2009).

A função do fluido dielétrico envolve a remoção de sólidos finos gerados no processo EDM ao mesmo tempo que condiciona uma refrigeração do eletrodo ferramenta e do material de interesse. A remoção dos sólidos finos irá promover maior eficiência de processo com taxa de remoção e acabamento superficial mais satisfatórios. Esta limpeza do eletrodo promove também a sua proteção contra o desgaste e impede a adesão de uma camada refundida dos sólidos finos na superfície do eletrodo que poderiam promover o desgaste por corrosão (ARANTES et al., 2003).

As partículas sólidas finas devem circular de forma a permitir a entrada e saída do fluido dielétrico, sendo que pequenas cavidades ou furos são obstáculos no processo de remoção das partículas em função da maior dificuldade de remoção das mesmas entre os eletrodos e o fluido (ARANTES, 2001; WONG et al., 1995).

O problema apresentado pela presença das cavidades é solucionado por meio de uma retração periódica frequente do eletrodo ferramenta. A Figura 8 ilustra as diferentes formas de circulação do fluido dielétrico no processo EDM por penetração (ARANTES, 2001; WONG et al., 1995).

Figura 8 - Métodos de circulação do fluido dielétrico no processo de (EDM)



Fonte: ARANTES, 2001.

3.4 BORETAÇÃO NA USINAGEM POR DESCARGAS ELÉTRICAS

O processo de Boretação por meio da EDM ainda é recente referente a trabalhos e estudos produzidos, mas já apresenta resultados satisfatórios como tratamento superficial para obtenção de camadas de boretos mais duros que proporcionam maior vida útil do componente usinado (ÖZERKAN, 2018).

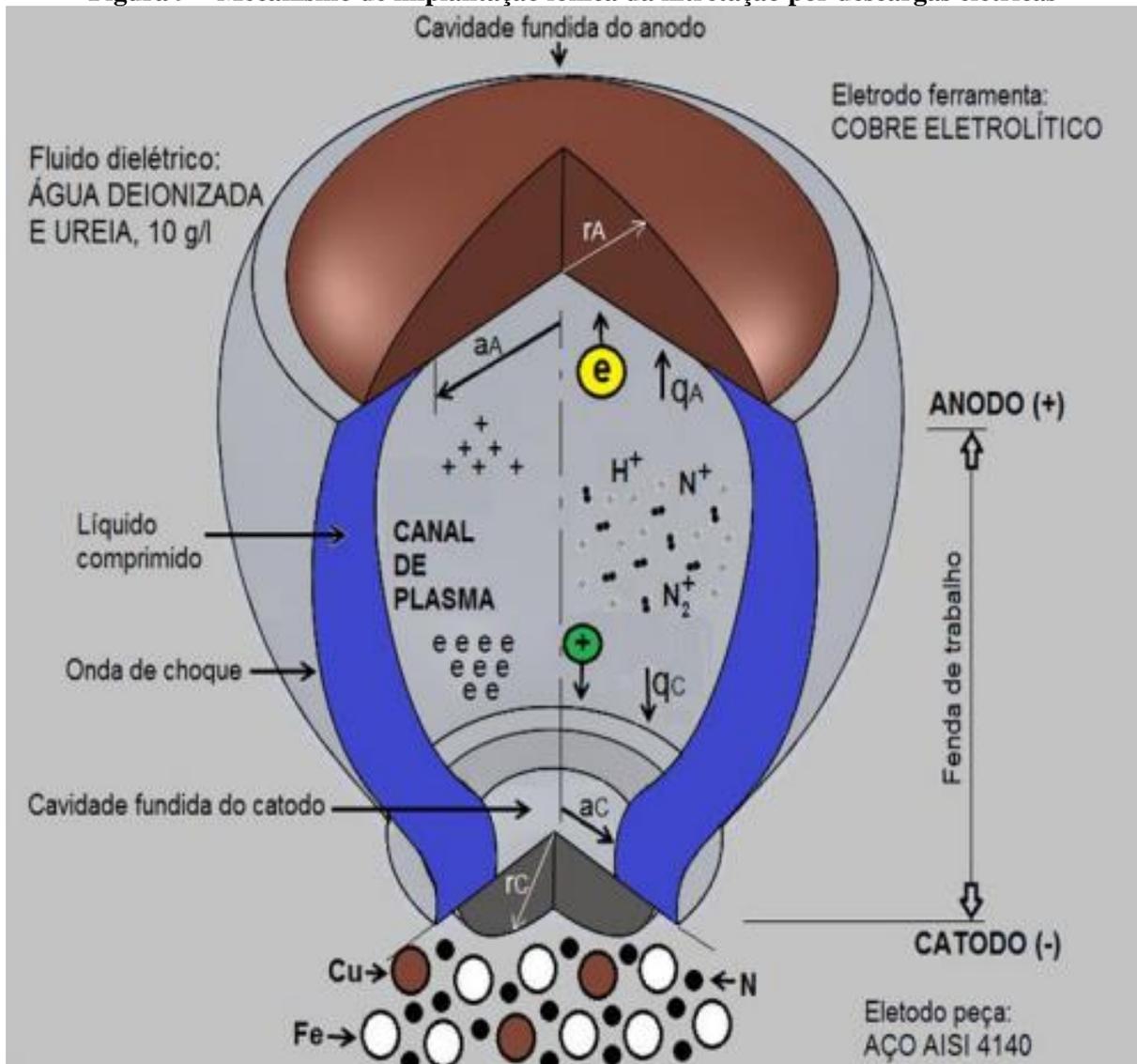
Alguns estudos revelam que o tratamento por usinagem por descargas elétricas já é aplicado em aços diversos como, por exemplo, os aços AISI 1040 e ABNT H13. De forma mais detalhada, com uso do pó de óxido de boro (B_2O_3) diluído em querosene, foi possível a boretação por EDM em aço AISI 1040 de forma a obter o índice 941 HV em dureza superficial mais externa e 413 HV mais próxima ao substrato (ÖZERKAN, 2018).

O fenômeno que permite a formação das camadas boretadas ou nitretadas é o plasma gerado pela diferença de potencial do meio, de forma que a energia gerada pelo plasma é responsável por quebra de ligações e formação de íons que serão inseridos na superfície do material (RASLAN, SILVA E SANTOS, 2012).

Em processos de tratamentos termoquímicos usuais de nitretação e boretação, o mecanismo difusional em conjunto com atmosfera rica em nitrogênio ou com boro é determinante para formação das camadas de nitretos e boretos que conferem o aumento da dureza superficial. Entretanto, no processo de nitretação ou boretação por usinagem por descargas elétricas ocorre uma inserção de íons presentes no fluido dielétrico que são inseridos por meio da diferença de potencial entre os eletrodos, gerando plasma que canaliza e acelera os íons até a superfície. Um estudo relata que uma camada nitretada do aço AISI H13 foi obtida por meio da EDM com uso de solução de ureia e água deionizada utilizando um eletrodo ferramenta de cobre eletrolítico (SILVA et al., 2020).

Estudo realizado por Santos (2013) apresenta a teoria da implantação iônica do nitrogênio na usinagem por descargas elétricas, aplicada ao aço ABNT 4140, utilizando eletrodo ferramenta de cobre eletrolítico e fluido dielétrico formado por solução de ureia em água deionizada conforme ilustrado pela Figura 9.

Figura 9 – Mecanismo de implantação iônica da nitretação por descargas elétricas



Fonte: Santos, 2013.

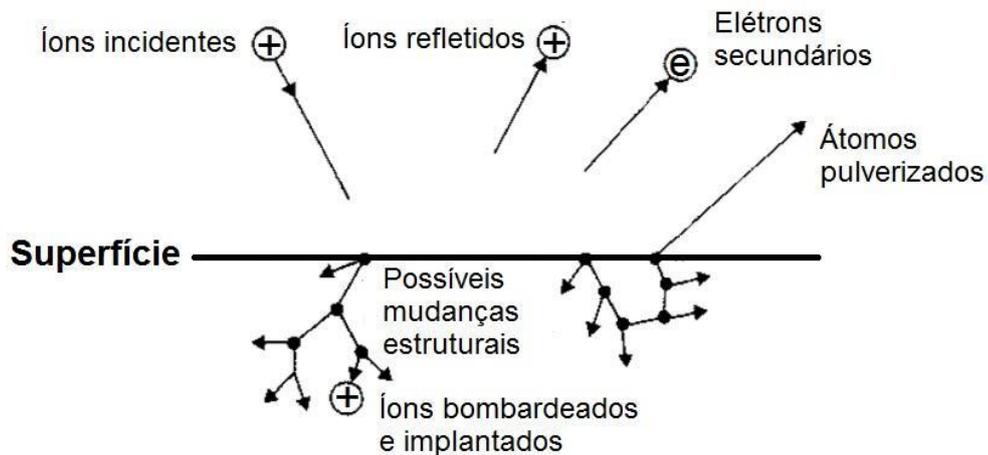
A Figura 9 demonstra que a ruptura por impacto gerado no dielétrico gera o amoníaco (NH_3) que é gasoso e sofre uma posterior decomposição em N_2 e H_2 , conforme as Equações (1) e (2):



Têm-se então uma situação onde íons N_2^+ , N^+ e H_2^+ , são difundidos no canal de plasma. Estes íons positivos serão impulsionados e implantados na superfície do eletrodo peça (catodo), pela alta energia cinética que adquirem (SANTOS, 2013).

Nascimento Neto (2006) afirma que o plasma contém espécies eletricamente carregadas como elétrons, íons positivos e negativos, além de átomos e moléculas, que podem ser usados em processos de tratamento superficiais de tecnologia limpa, substituindo processos convencionais de natureza química. A colisão de íons contidos no canal de plasma com a superfície tratada possibilita o transporte e implantação de elementos químicos provenientes do meio no qual o canal está inserido. Quando as moléculas ionizadas atingem a superfície, elas se dissociam, e então, os átomos provenientes são implantados até uma profundidade (ZAGONEL, 2006). A Figura 10 ilustra esquematicamente as prováveis reações físico químicas, que ocorrem na superfície do substrato.

Figura 10 - Interação dos íon e elétrons do plasma com a superfície catódica



Fonte: Chapman, 1980.

Apesar de escassos, estudos sobre boretação por EDM podem ser encontrados na literatura. Oserkan (2018) cita ter tratado o aço AISI 1040 superficialmente, utilizando solução de querosene contendo pó de óxido de boro, B_2O_3 , em diferentes concentrações. A aplicação do óxido de boro possibilitou a formação de uma camada resistente à abrasão e corrosão.

Lima et al. (2022), Nascimento et al. (2021) e Barbosa et al. (2022) usinaram por eletroerosão os aços ABNT 4140, ABNT 8620 e ABNT P20, respectivamente, aplicando solução contendo octaborato de sódio diluído em água deionizada. Os autores obtiveram resultados satisfatórios, ao encontrarem a presença do elemento boro, observada pelos picos de boretos formados nos difratogramas de Raios-X das amostras.

3.5 BÓRAX

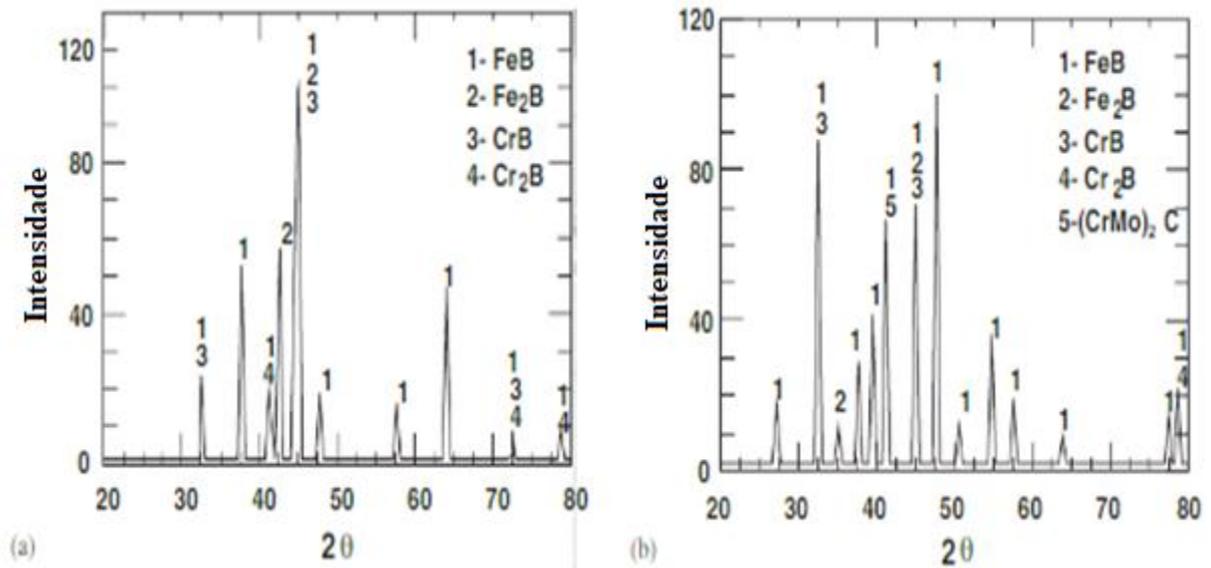
O bórax ($\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$), também chamado de Tetraborato de Sódio Decahidratado, ou Tetraborato Dissódico Decahidratado, é utilizado como fonte de boro nos tratamentos termoquímicos de boretação, de forma que esses tratamentos se baseiam na redução em bórax fundido ($\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$), em conjunto com o uso de ativadores a base de Fe-Si, Fe-Ti-Al ou somente alumínio. Os 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 ($\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$) possui cristais que formam pós de coloração esbranquiçada, inodoro e com solubilidade lenta de aproximadamente $32\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$ 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).

3.6 CARACTERIZAÇÃO DE BORETOS NO AÇO ABNT H13 POR DRX

Conforme a Figura 3, o DRX em varredura de 2Θ de 30 a 110° apresentou picos referentes a boretos do tipo FeB, Fe_2B e CrB em uma amostra do aço ABNT H13 boreteada em caixa com pó de Ekabor II a 950°C por 6h. De acordo com a Figura 11 a presença de boretos foi observada no processo de boretação do Aço ABNT H13 com pó de Ekabor nos tempos de 1h à 1173 K (Figura.11a) e 5h à 1273 K (Figura.11b) (GENEL, 2006).

Figura 11 - Espectro de (DRX) para do Aço ABNT H13 boretado



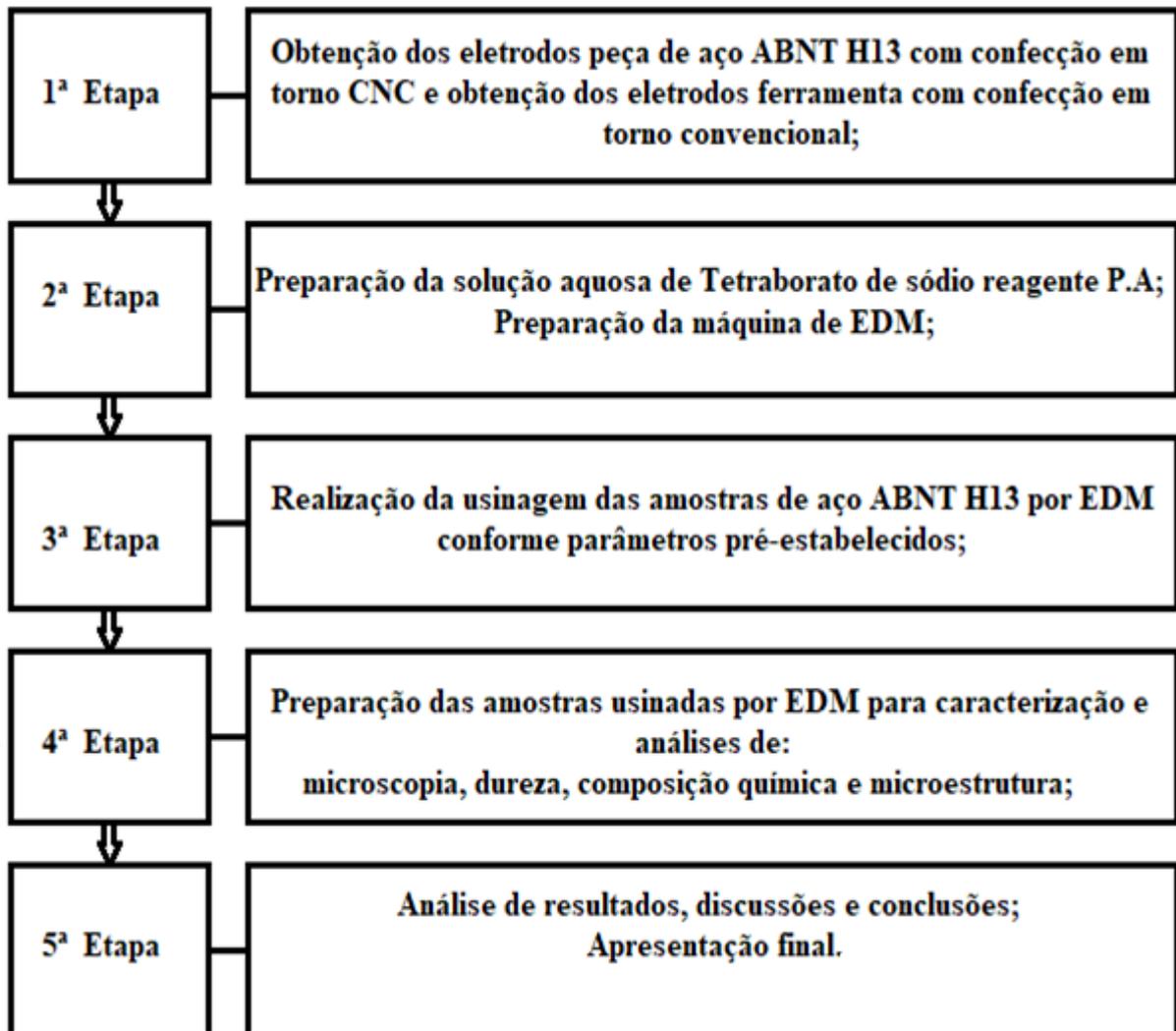
Fonte: Adaptado de GENEL, 2006.

Pode-se identificar conforme a Figura 11a e a Figura 11b a presença de picos relacionados a boretos do tipo FeB e Fe₂B identificados respectivamente pelos índices 1 e 2 e picos relacionados a boretos do tipo CrB e Cr₂B respectivamente identificados pelos índices 3 e 4. Exclusivamente para a Figura 11b, o pico está relacionado a (CrMo)₂C identificado pelo 5. Para a Figura 11b, têm-se mais picos relacionados a boretos do tipo FeB em função do maior tempo de tratamento com Ekabor e maior temperatura de processamento que favorece a cinética das reações (GENEL, 2006).

4 MATERIAIS E MÉTODOS

Os testes realizados durante a elaboração deste trabalho são divididos em etapas que foram previamente definidas conforme o fluxograma apresentado na Figura 12. As etapas abordaram desde a confecção das amostras que foram os eletrodos peça de aço ABNT H13, até a obtenção dos eletrodos ferramenta de cobre eletrolítico, devido a sua melhor adequação ao processo, em virtude das propriedades elencadas anteriormente na Tabela 5. Preparação da solução aquosa, a realização dos ensaios de EDM com parâmetros previamente definidos e com a realização das caracterizações e análises de resultados.

Figura 12 - Etapas realizadas para obtenção de resultados com ensaios práticos



Fonte: autoria própria.

A usinagem foi realizada em uma máquina de EDM por penetração convencional, Eletroplus – Modelo 540/SERVSPARK, adaptada para uso com fluido não convencional. O fluido não convencional utilizado foi de uma solução aquosa de Tetraborato de Sódio Reagente P. A (Bórax) de formulação química ($\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$) em água deionizada.

O Bórax reagente P. A. utilizado nos testes foi da fabricante ACS Científica, com validade até 20 de março de 2028, e devidamente rotulado com as instruções de advertência e descrições do conteúdo: número do CAS 1303-96-4, peso molecular de 381,37g/mol e pureza mínima de 99,5%.

As amostras do aço ABNT H13 foram preparadas por torno CNC, enquanto os eletrodos ferramenta de cobre eletrolítico foram preparados por usinagem em torno convencional. Para realização dos ensaios, a solução de Bórax ($\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$) foi diluída em um recipiente graduado com água deionizada. Um aparelho condutivímetro portátil digital, com faixa de medição de 0- 9999 $\mu\text{S} \cdot \text{cm}^{-1} \pm 2\%$ foi utilizado para aferição da condutividade elétrica da água, antes e após a deionização, e também da solução.

Após os ensaios as amostras foram submetidas a uma limpeza ultrassônica, para remoção dos detritos do material aderidos em sua superfície. Seguindo-se o procedimento, as amostras foram preparadas utilizando técnicas metalográficas, de forma a caracterizar as camadas formadas.

Para a verificação de alterações morfológicas, microestruturais e a mensuração da espessura da camada formada, imagens foram obtidas utilizando o microscópio 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 Raios-X.

Para auxiliar na identificação das camadas e respectivas espessuras, utilizou-se da técnica de Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) da seção transversal das amostras bipartidas. Em conjunto com o MEV, foi realizada uma análise elementar do boro nas camadas refundidas e intermediárias por Espectroscopia por Energia Dispersiva (EDS – Energy Dispersive Spectroscopy).

Conforme aplicado em outros estudos similares que foram realizados por Santos et al. (2017), Elias et al. (2019) e Silva et al. (2020) em processos de descargas elétricas para fins de nitretação, e Barbosa (2023) em processos de descargas elétricas para fins de boretação, as adaptações são importantes em virtude da necessidade de não danificar os componentes do equipamento.

4.1 ADAPTAÇÕES NA MÁQUINA DE EDM

Conforme exposto anteriormente, para a realização da usinagem nas amostras foi utilizada uma máquina de eletroerosão a penetração Eletroplus – 540/SERVSPARK pré-adaptada conforme trabalhos de nitretação ou boretação por descargas elétricas realizado por Santos et al., (2017b); Silva et al., (2020a); Barbosa (2023).

O equipamento de eletroerosão disponível conta com uma potência de 6,5KVA, podendo realizar movimentação manual nos eixos longitudinal X e transversal Y por meio de dispositivos do tipo manivela. Para o eixo vertical Z tem-se guias lineares e eixos de esferas recirculares, comandados por motor de passo que controlam o eletrodo ferramenta. O peso máximo admissível do eletrodo ferramenta montado no cabeçote é de 60kg. As adaptações realizadas não afetaram o desempenho e nem danificaram componentes originais do equipamento.

A principal adaptação envolveu o uso de um recipiente do tipo cuba auxiliar de aço inoxidável austenítica, posicionada no interior do tanque de trabalho da máquina de EDM. A cuba tem como função evitar a contaminação do fluido de solução aquosa de Tetraborato de sódio reagente P. A. com o fluido dielétrico próprio da máquina, que é um óleo mineral (hidrocarboneto). Conforme analisado por Silva et al (2020), a adaptação da cuba auxiliar permite o funcionamento do sistema de forma aberta, propiciando melhor circulação de fluido que também auxilia na remoção das partículas do material usinado geradas no processo.

Outra adaptação realizada, foi o uso de uma bomba centrífuga com mangueira de saída, com objetivo de promover a circulação e homogeneização da solução, além da limpeza da fenda de

trabalho entre o eletrodo peça e o eletrodo ferramenta. Estas adaptações podem ser observadas pelas indicações na Figura 13.

Figura 13 - Adaptações e componentes gerais da máquina de EDM

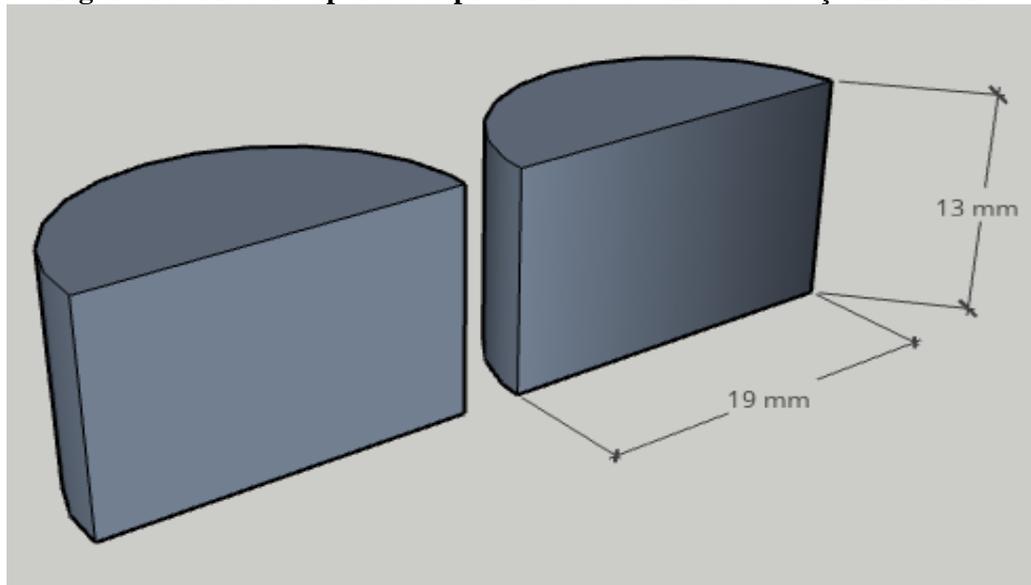


Fonte: autoria própria.

4.2 CONFECÇÃO DOS ELETRODOS PEÇA E FERRAMENTA

Os eletrodos peças, usados como amostras, foram obtidos por usinagem do aço ABNT H13 por meio de torno CNC, com dimensões de 19 mm de diâmetro por 13 mm de altura. As amostras foram cortadas com aparelho *cut-off* no sentido axial, formando um conjunto bipartido conforme ilustra a Figura 14, com exceção as amostras que foram analisadas por Difração de Raios-X.

Figura 14 - Modelo bipartido representativo da amostra do aço ABNT H13

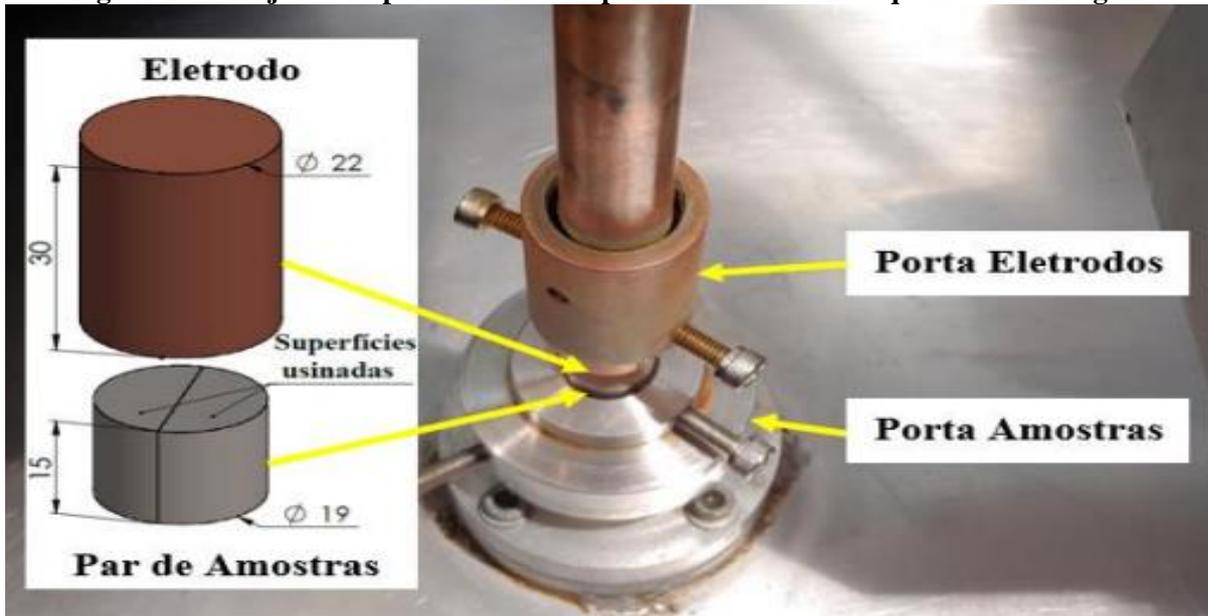


Fonte: autoria própria.

Nesta demanda específica, o corte axial ocorreu em virtude de um possível desprendimento de camadas de interesse para a análise durante o corte, após serem usinadas por EDM. O corte então foi realizado com objetivo de permitir a visualização por meio de microscopia óptica das camadas formadas após o processo de usinagem por EDM.

Conforme a Figura 15 e com base no equipamento de EDM disponível, devido as dimensões do suporte porta eletrodo ferramenta, este passou por confecção em cobre eletrolítico, usinados em torno convencional no formato cilíndrico com diâmetro de 22 mm e 30 mm de comprimento. Cada amostra do aço ABNT H13 foi usinada com um único eletrodo ferramenta, de forma que cada ferramenta não influenciasse nos resultados das superfícies das amostras.

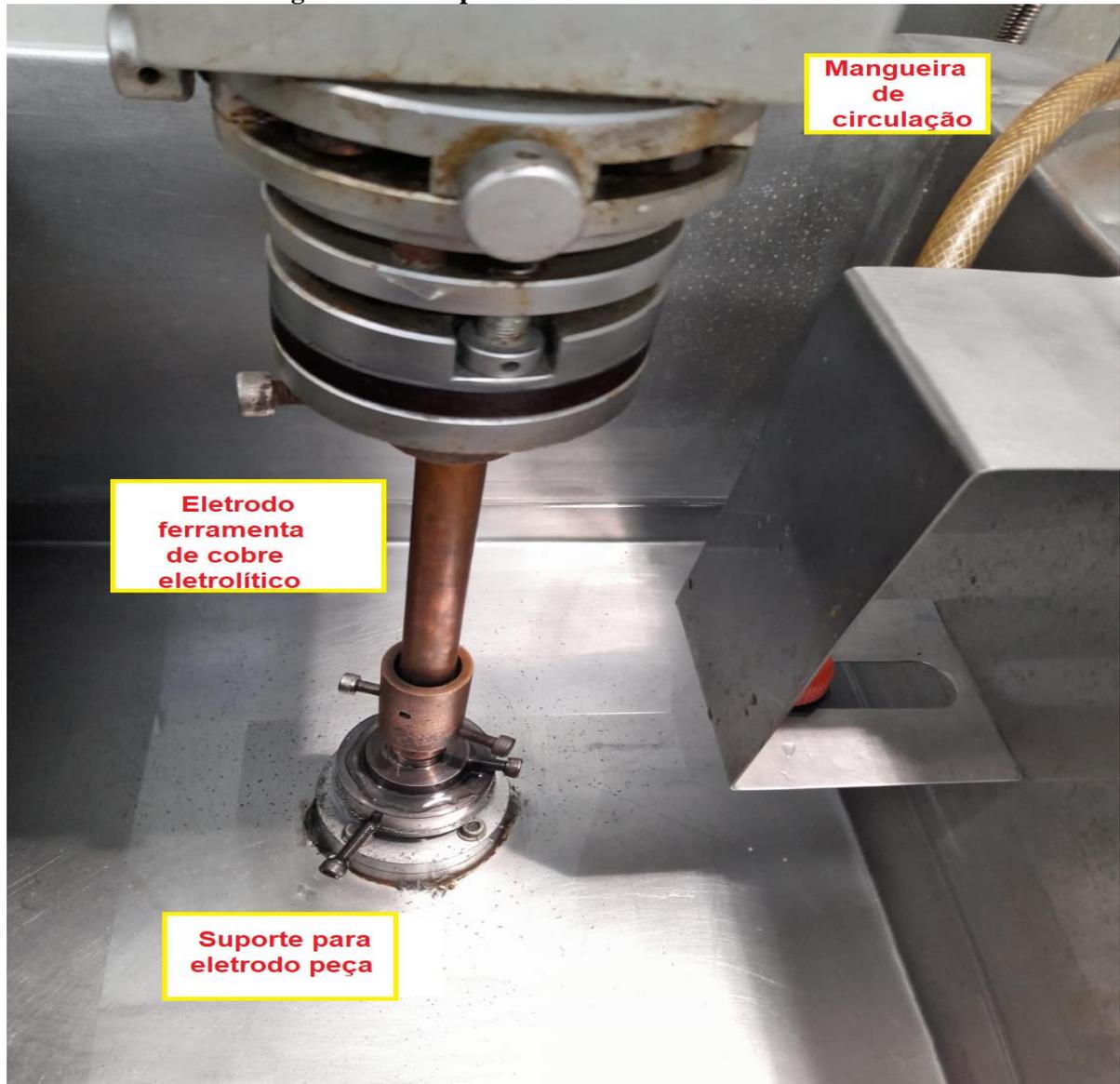
Figura 15 - Conjunto do porta eletrodos e porta amostras com esquema de montagem



Fonte: Barbosa, 2023.

A Figura 16 assinala a região interna da cuba de aço inoxidável auxiliar com os componentes nas posições de usinagem, tais como os eletrodos ferramenta e peça, e a mangueira de circulação da solução aquosa fixada em seu suporte, que deve promover melhor homogeneidade e retirada das partículas arrancadas dos eletrodos. O eletrodo ferramenta deverá ser fixado por meio de parafuso de fixação na luva que forma um conjunto com a haste, ambos de cobre eletrolítico. A amostra será posicionada e fixada em um rebaixo no suporte preso na base da cuba auxiliar.

Figura 16 - Componentes internos da cuba auxiliar



Fonte: autoria própria.

4.3 PREPARAÇÃO DA SOLUÇÃO AQUOSA APLICADA NA EDM

A solução aquosa utilizada no processo de EDM deve-se ter parâmetros relacionados às suas propriedades físico-químicas, de forma a reproduzir trabalhos anteriores que utilizaram em sua preparação 30 litros de água deionizada, com $0 \mu\text{S}/\text{cm}$ de condutividade elétrica em que a solução fosse compatível como um fluido dielétrico, ou apresentasse a rigidez dielétrica semelhante ao mesmo.

Primeiramente, a água potável foi obtida do sistema de abastecimento público, com condutividade elétrica característica próxima a 150 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Após o processo de deionização que reduziu a condutividade elétrica para 0 $\mu\text{S}/\text{cm}$, foram adicionados 500 gramas do Bórax P. A. diluído na água, formando a solução aquosa na concentração de 16,6 gramas por litro. Utilizando-se de um aparelho condutivímetro portátil, mediu-se da condutividade elétrica da solução aquosa contendo Bórax.

4.4 APLICAÇÃO DO PROCESSO DE USINAGEM POR EDM

Para possibilitar a operação da máquina de EDM, durante os testes, alguns ajustes foram realizados em seu painel de controle. Alguns parâmetros e especificações correspondentes passaram por ajustes durante o funcionamento e aplicação do primeiro teste de usinagem conforme a Tabela 5.

Tabela 5 - Parâmetro e especificações para o processo de usinagem por EDM

Item	Parâmetro	Especificação
I	Polaridade do eletrodo ferramenta	Positiva
II	Corrente	40 A
III	Tempo de pulso (T_{ON})	500 μs
IV	Tempo de pausa (T_{OFF})	1,5 (75 μs)
V	Fenda de trabalho (Gap)	1,0
VI	Afastamento periódico da ferramenta	2,0
VII	Velocidade do servo	2,0
VIII	Tempo de erosão	3,0
IX	Erosímetro	

Fonte: autoria própria.

Os ajustes dos parâmetros conforme as especificações possibilitaram uma operação estável da máquina de acordo com os objetivos do trabalho que envolviam a formação de boretos

superficiais nas amostras. Para ajustar os parâmetros, o processo de usinagem foi iniciado observando-se o erosímetro após o início da operação. O operador realizou os ajustes de forma que ao acender todos os *LEDs* do erosímetro, tendo-se então a indicação de estabilidade do processo de usinagem.

O tempo para a realização da usinagem foi de cerca de 30 minutos em cada teste. Foram usinadas quatro amostras do aço ABNT H13, uma delas bipartida. Os parâmetros foram selecionados com base nos experimentos de Raslan, Silva e Santos (2012). A Figura 17 mostra o painel de controles da máquina de EDM com os respectivos parâmetros apresentados na Tabela 5.

Figura 17 - Painel de controle e seus respectivos botões de ajustes



Fonte: autoria própria.

Os ajustes foram realizados durante o primeiro processo de usinagem, observando-se as luzes do erosímetro. O fabricante da máquina informa em seu manual de uso, informa que o valor 1,5 ajustado no botão de controle do Tempo de pausa (T_{OFF}) corresponde a, por exemplo, 15% do valor do Tempo de pulso (T_{ON}).

4.5 PREPARAÇÃO DAS AMOSTRAS PARA ANÁLISES

Após a usinagem por EDM, as amostras foram limpas para remoção de partículas soltas da superfície e puderam então ser preparadas para as técnicas metalográficas de embutimento a quente com resina epóxi. A resina para embutimento possui baixa contração e boa aderência de forma a fixar bem a amostra, não provocando o desprendimento da camada refundida por não deixar expostas as bordas.

Após o embutimento, as amostras passaram por uma sequência de lixas de 180, 220, 360, 400, 500, 600 e 1200 mesh. Depois de lixadas, foram polidas com pasta diamantada, de 3 e 1 μm em politrizes manuais, antes do ataque químico com o reagente nital 3% (3 ml de ácido nítrico – HNO_3 – e 98 ml de álcool etílico) que possibilitou a visualização das camadas subsuperficiais por câmera de captura instalada no microscópio óptico ilustrado pela Figura 18.

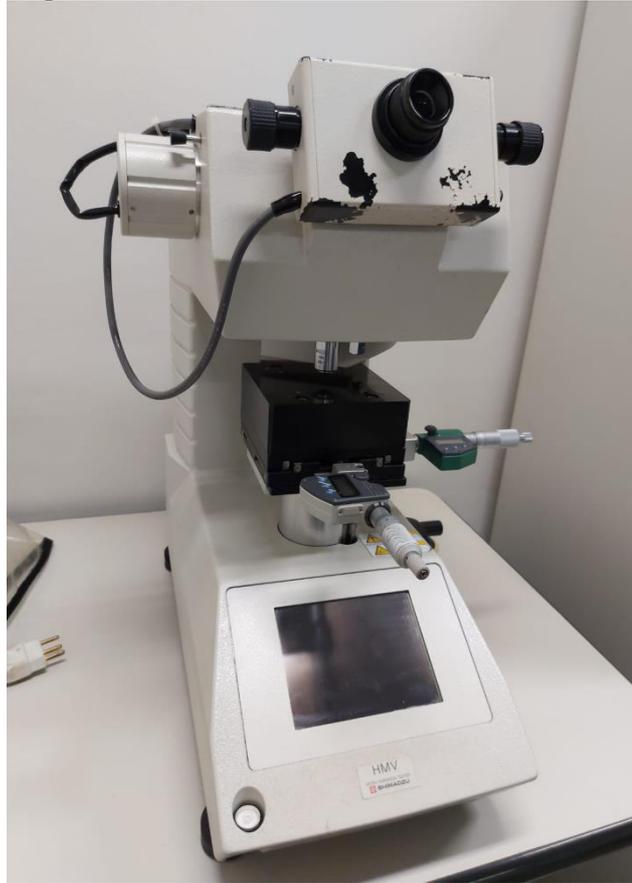
Figura 18 - Microscópio óptico Fortel



Fonte: autoria própria.

A microdureza Vickers das camadas refundida e intermediária, e do próprio material base foram mensuradas com auxílio de microdurômetro Shimadzu HMV-2T ilustrado na Figura 19, com capacidade de carga variando de 10 a 100 gf. Para o ensaio, foi utilizada a carga de 25 gf por 15 segundos de permanência. As indentações foram realizadas na seção transversal das amostras, em conjunto de três e espaçadas igualmente em torno de 20 μm , partindo da superfície para o interior da amostra.

Figura 19 - Microdurômetro Shimadzu HMV-2T



Fonte: autoria própria.

Para análise de DRX, as amostras passaram por uma limpeza com álcool por meio de aparelho de ultrassom por 15 minutos. A difração de raios-x convencional, Bragg-Brentano ou θ - 2θ foi utilizada para evidenciar a possível presença de boretos de ferro na superfície usinada por EDM. A Tabela 6 relaciona os parâmetros de varredura utilizados para o ensaio de DRX das amostras.

Tabela 6 - Parâmetros para o ensaio de DRX

Parâmetro	Especificação
Radiação	CuK α
Tensão	40 kV
Corrente	30 mA
Tipo de varredura	$\theta - 2\theta$
Ângulo inicial de varredura (2θ)	20°
Ângulo final de varredura (2θ)	120°
Modo de varredura	Tempo fixo
Passo de amostragem	0,02°
Tempo de varredura por ponto	5 s

Fonte: autoria própria.

Para os ensaios de identificação das camadas e respectivas espessuras, foi aplicada a técnica da Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) da seção transversal das amostras bipartidas. Em conjunto com o MEV, realizou-se uma análise elementar do boro nas camadas refundidas e intermediárias por Espectroscopia por Energia Dispersiva (EDS – *Energy Dispersive Spectroscopy*).

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

A seguir, são apresentados os resultados obtidos do processo de usinagem por descargas elétricas por penetração do aço ABNT H13 e as discussões pertinentes, aplicando a solução aquosa contendo tetraborato de sódio reagente padrão analítico.

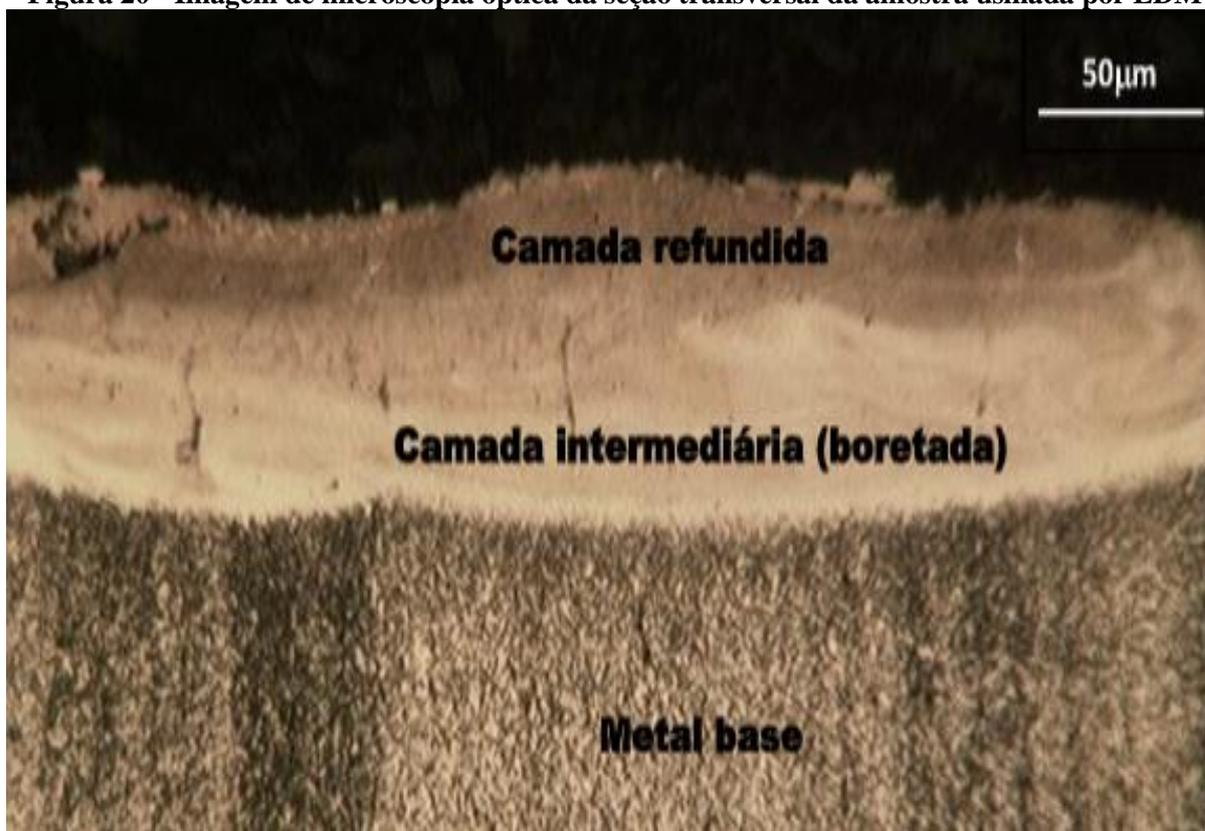
Com a preparação da solução contendo Bórax reagente P. A. ($\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$) em água deionizada, a condutividade elétrica da água sem tratamento, fornecida pelo sistema público de abastecimento foi de $150 \mu\text{S} \cdot \text{cm}^{-1}$. Após o processo de deionização, a condutividade elétrica da mesma caiu para $0 \mu\text{S} \cdot \text{cm}^{-1}$. A solução contendo bórax ($\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$) em água deionizada, apresentou uma condutividade atingindo $8000 \mu\text{S} \cdot \text{cm}^{-1}$, aproximadamente, medida a 23°C , de forma semelhante ao reproduzido por Barbosa (2023) e Nascimento (2023).

Conforme Briggs (2000), a diluição máxima de Bórax ($\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$) em água deionizada pode variar de acordo com as características físicas e químicas do composto, de forma que a concentração de boro para a solução saturada também depende destas características. Briggs (2000) ainda explica que para o bórax ($\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$), a solubilidade é lenta, de aproximadamente $26 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ de água a 20°C , portanto, a concentração utilizada de $16 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$, para a solução contendo o Bórax ($\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$) em água deionizada não supera os limites de solubilidade máxima dos compostos.

5.1 AVALIAÇÃO DAS CAMADAS SUBSUPERFICIAIS

A Figura 20 ilustra imagem de microscopia óptica da seção transversal da amostra do aço ABNT H13, usinada por descargas elétricas com solução aquosa (eletrolítica) formada por bórax reagente padrão analítico adicionado a água deionizada. O cobre eletrolítico foi utilizado como eletrodo ferramenta.

Figura 20 - Imagem de microscopia óptica da seção transversal da amostra usinada por EDM



Fonte: autoria própria.

Esta imagem ilustra a camada refundida na superfície e na subsuperfície a camada intermediária, ou seja, a camada boretada. O resultado é semelhante aos que foram observados por Lima et al. (2022), Nascimento et al. (2021) e Barbosa et al. (2022) ao usinarem por eletroerosão os aços ABNT 4140, ABNT 8620 e ABNT P20, respectivamente, aplicando água deionizada contendo octaborato de sódio. A camada intermediária apresentou uma espessura média de 45 μm , aproximadamente.

5.2 MICRODUREZA VICKERS

A Tabela 7 relaciona os resultados da mensuração de microdureza Vickers com carga de 25 gf a 15 segundos das camadas refundida, intermediária (boretada) e ainda do material base (substrato – aço ABNT H13) medidas na seção transversal da amostra.

Tabela 7 - Valores de microdureza Vickers das camadas refundida, intermediária (boretada) e do material base (substrato – aço ABNT H13)

Região	Dureza (HV)	Variação de dureza em relação ao substrato
Camada refundida	176 ± 3	36%
Camada intermediária (boretada)	639 ± 59	131%
Material base (substrato – aço ABNT H13)	277 ± 4	–

Fonte: o próprio autor.

Observa-se o aumento de dureza de 131 % na camada intermediária e redução na dureza da camada refundida. Özerkan (2018), verificou aumento no valor da dureza superficial na boretadação por EDM do aço AISI 1040. O autor relata ter obtido 941HV na camada refundida e 413HV na camada boretada, utilizando pó de óxido de boro B₂O₃ adicionado ao querosene em substituição ao dielétrico convencional.

Neste trabalho, a usinagem por eletroerosão propiciou um fato que destoa das demais pesquisas, já que, ao contrário dos demais resultados, a camada refundida ficou macia em relação ao material base, com valor 36% da dureza do substrato, o aço ABNT H13, recozido.

Segundo Ghanem, et al. (2002) mudanças metalúrgicas provocadas pelo aquecimento seguido do resfriamento brusco promovido pelo fluido dielétrico produz uma camada refundida dura. Tal fato não foi observado nesta pesquisa, em função da formação da camada refundida rica em Borato de Cobre, que apresenta uma dureza menor até que a do próprio substrato. Já o aumento de dureza na camada intermediária foi possível pela difusão do boro, por implantação iônica a plasma, decomposto da solução aquosa (eletrolítica) formada por água deionizada contendo Bórax.

De acordo com Uslu, et al. (2007), o aumento de dureza na camada boretada em relação ao material base, pode ser atribuído a formação das fases FeB e Fe₂B, boretos de ferro, que se formam durante o processo de boretadação. A Figura 21 ilustra uma imagem de microscopia óptica da seção transversal da amostra boretada em uma região onde pode-se observar endentações produzidas pelo ensaio de microdureza Vickers.

Figura 21 - Imagem de microscopia óptica de uma região da seção transversal da amostra usinada por EDM após ensaio de microdureza Vickers



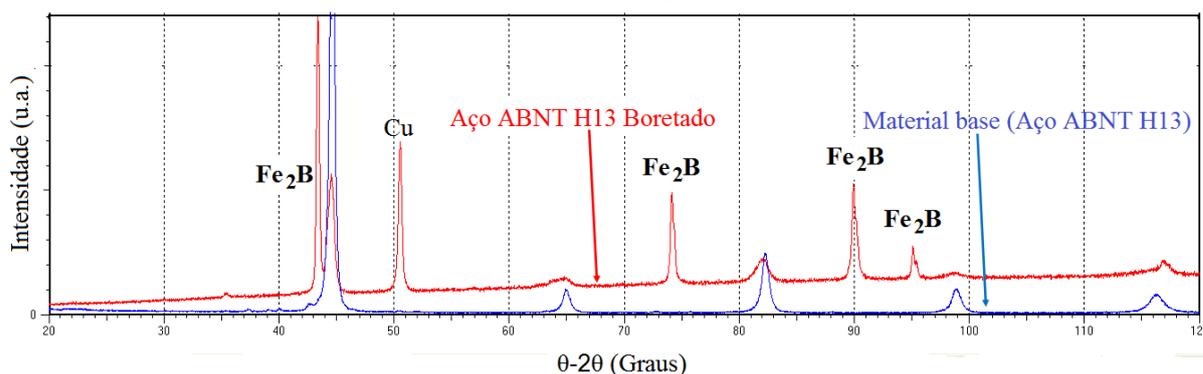
Fonte: autoria própria.

Nota-se o maior tamanho da indentação produzida na camada refundida e conseqüentemente menor valor de dureza, em relação à camada intermediária. Uma provável explicação para este fato pode estar relacionada 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 para formar borato de cobre, e neste caso, o borato de cobre forma a camada refundida junto ao material base, o aço ABNT H13.

5.3 DIFRATOGRAMAS DE RAIOS-X

A Figura 22 ilustra os difratogramas de Raios-X da superfície da amostra usinada por eletroerosão e do aço ABNT H13, como referência, sem tratamento.

Figura 22 - Difratogramas de Raios-X da superfície da amostra usinada por eletroerosão com eletrodo ferramenta de cobre e do aço ABNT H13 de referência



Fonte: o próprio autor.

O gráfico do difratograma na Figura 22 ilustra os picos de boreto de ferro Fe_2B formados na superfície da amostra usinada (boretada) do aço ABNT H13. As cartas retiradas dos padrões de difração do banco de dados ICSD indicam: $\theta = 44,68^\circ$ (carta 76-0092), $\theta = 74,35^\circ$ (carta 75-1062), $\theta = 89,92$ (carta 25-1033) e $\theta = 94,62^\circ$ (carta 36-1392). Observa-se ainda o pico de cobre, $\theta = 50,43$ indicado na carta 04-0836.

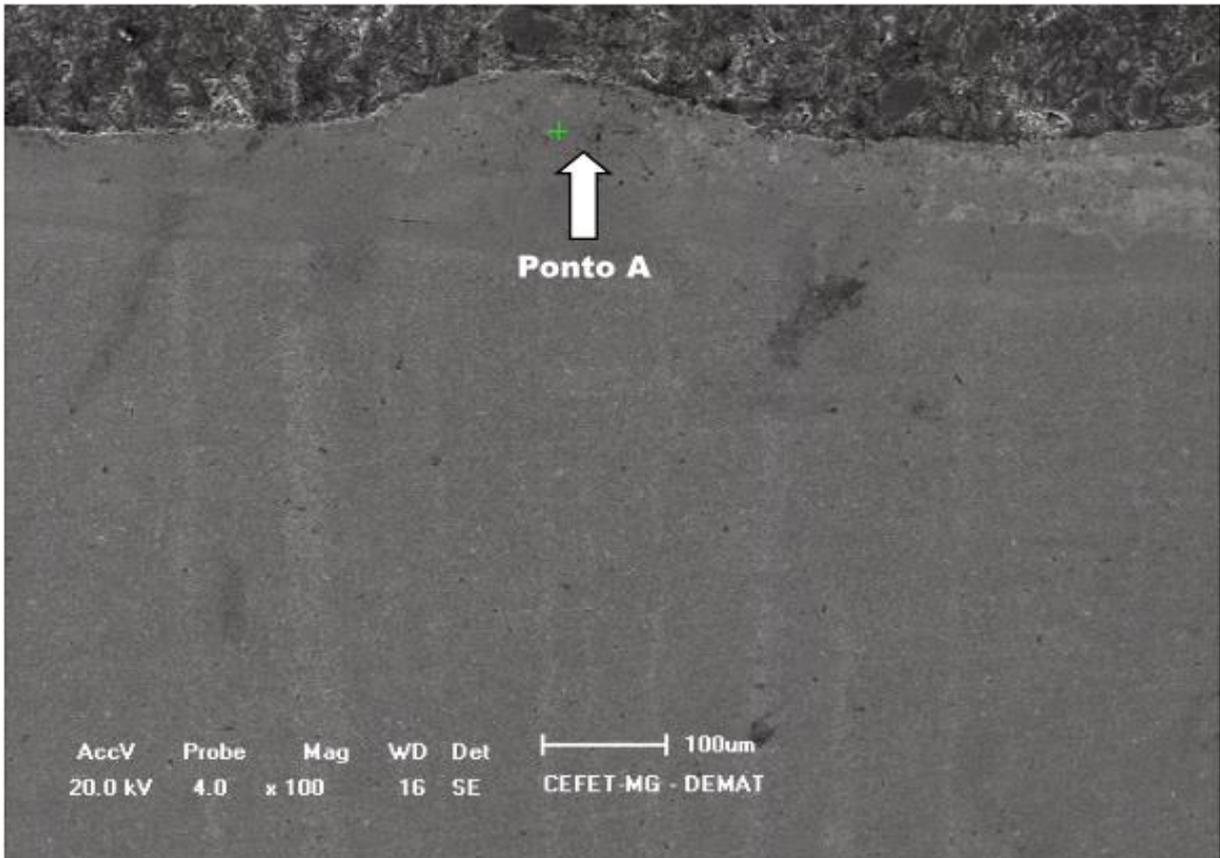
No difratograma da amostra usinada por EDM é possível observar os picos de boreto de ferro formados, em relação ao aço ABNT H13 de referência, semelhantes aos observados por Gunes, et al. (2013) em sua pesquisa.

Segundo Kayali (2015) a camada boretada é formada pelos boretos de ferro das fases FeB e Fe_2B . O mecanismo de colisão dos íons e elétrons causa ruptura da solução aquosa (eletrolítica), com energia suficiente para decompor os constituintes presentes na mistura (água deionizada e borax) e possibilitar a implantação do boro por meio do canal de plasma. De acordo Yao, et al. (2016), o formato dos picos alongados, observados no difratograma, são características da presença dos boretos de ferro.

5.4 MEV E EDS

A Figura 23 ilustra imagem da seção transversal obtida por meio de MEV com destaque para o ponto A, na camada refundida, onde foi realizada análise pontual de Espectroscopia de raios X por dispersão em energia (EDS).

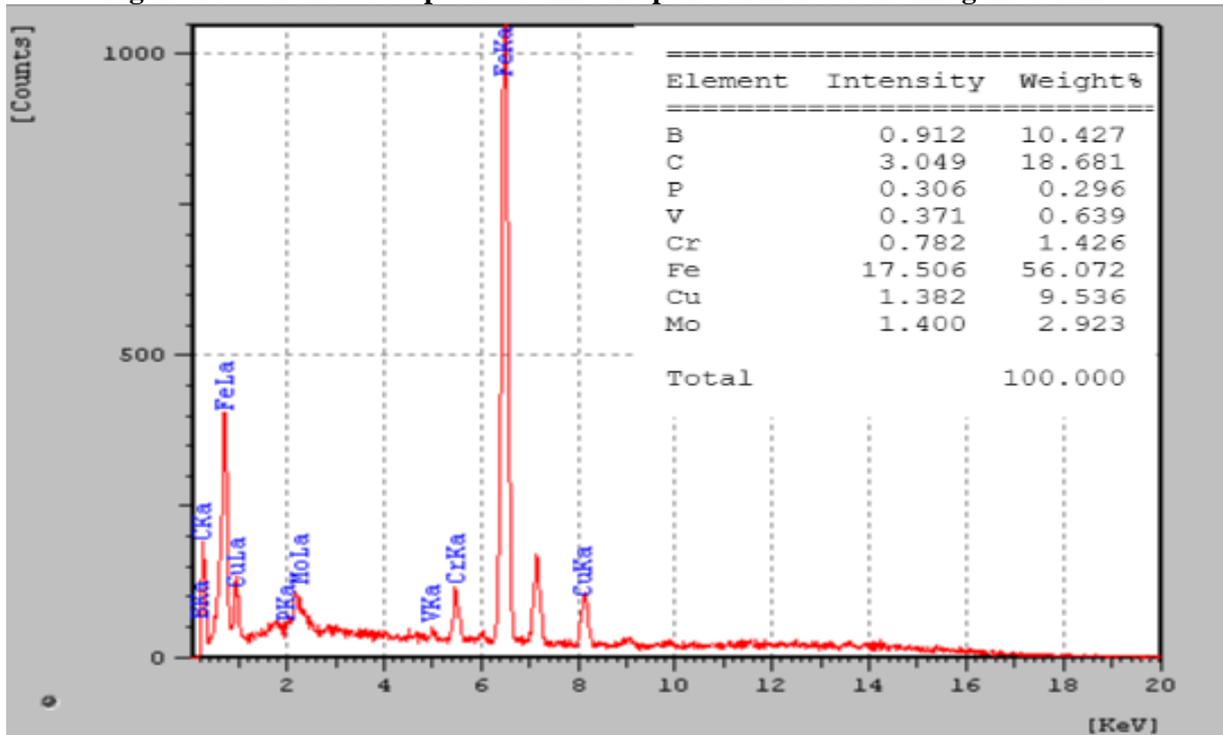
Figura 23 - Imagem de MEV da seção transversal da amostra usinada por EDM com eletrodo ferramenta de cobre



Fonte: o próprio autor.

A Figura 24 apresenta o gráfico do espectro de EDS pontual (ponto A) na camada refundida indicada na imagem de MEV da Figura 23. E ainda, a relação dos elementos encontrados e seus respectivos percentuais, contidos no ponto indicado.

Figura 24 - Gráfico do espectro de EDS no ponto A indicado na imagem de MEV



Fonte: o próprio autor.

O elemento químico boro, principal alvo deste trabalho de pesquisa, foi detectado pela análise pontal na camada refundida do aço ABNT H13, devido a identificação do pico de boro no gráfico do espectro de EDS, semelhante ao observado por Joshi & Hosmani (2014), em sua pesquisa, comprovando o processo de boretação.

A modificação superficial no aço ABNT H13 por meio de máquina de eletroerosão por penetração foi possível, devido à reação química dos elementos contidos no aço com o elemento químico boro, decomposto do bórax na água deionizada.

A modificação superficial no aço ABNT H13 promoveu o aumento de dureza na camada intermediária, possibilitada pela difusão do boro, por implantação iônica a plasma, decomposto da solução aquosa (eletrolítica) formada por água deionizada contendo Bórax. Diferente de outros trabalhos em que mudanças metalúrgicas provocadas pelo aquecimento seguido do resfriamento brusco do promoveram uma camada refundida dura com uso do fluido dielétrico, não foi observado uma camada refundida dura nesta pesquisa em virtude da presença do cobre que foi depositado pelo desgaste do eletrodo de cobre eletrolítico.

6 CONCLUSÕES

Os métodos utilizados neste trabalho de pesquisa se mostraram eficientes na aplicação da boretação da superfície do aço ABNT H13 por meio da usinagem por descargas elétricas produzidas em uma máquina de EDM por penetração adaptada, usando uma solução aquosa (eletrolítica) contendo Bórax P.A. diluído em água deionizada.

Foi obtida uma camada subsuperficial intermediária com espessura de 45 μm , aproximadamente, e valor médio de microdureza Vickers de 639 HV, que é aproximadamente 131% maior que o valor da dureza do material base (277 HV).

A camada superficial refundida apresentou valor médio de microdureza Vickers 176 HV, que é 36% abaixo do valor da dureza do material base (277 HV), devido à presença do boreto de cobre formado da decomposição do boro do bórax combinado com o cobre do eletrodo ferramenta.

A solução eletrolítica formada por bórax adicionado à água deionizada proporcionou a disponibilidade do elemento boro, o qual foi implantado por plasma eletrolítico na superfície do aço ABNT H13, justificado pela presença de picos de boreto de ferro Fe_2B observada no difratograma de Raios-X e detectado por meio do espectro de EDS obtido por MEV, realizado na camada superficial refundida na seção transversal.

7 RECOMENDAÇÕES

Aplicar solução aquosa contendo Bórax P.A. na usinagem de outros aços, por exemplo, ABNT 4140, ABNT P20, ABNT 8620, entre outros.

Realizar testes tribológicos como microabrasão com equipamentos caloteste e/ou pino sobre disco na superfície do aço ABNT H13 boretado por usinagem por descargas elétricas.

REFERÊNCIAS

- 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.
- ALP, Burcu; SAVRIK, Sevdije Atakul; BALKOSE, Devrim. Preparation and Characterization of Copper Borates as Lubricant Additives. **Journal of Materials Science and Engineering**, v. 4, p. 95-108. 2014.
- 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.
- BARBOSA, J. P. S.; SILVA, A. E.; SILVA, S. P.; SILVA, E. R. **Avaliação do Aço ABNT P20 Usinado por EDM com Solução Aquosa de Octaborato de Sódio Tetrahidratado como Fonte de Boro**. **Revista Perspectivas da Ciência e Tecnologia**, v. 14, 2022.
- BARBOSA, J. P. M. S.; **Avaliação do aço ABNT P20 usinado por EDM com solução aquosa de octaborato de sódio tetrahidratado e bórax como fonte de boro**. Dissertação (mestrado) – Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Materiais, Belo Horizonte, 2023. Disponível em: <https://sig.cefetmg.br/sigaa/public/programa/defesas.jsf?lc=pt_BR&id=305> Acesso em: 20 de mai. de 2023.
- 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. Disponível em: <<https://www.scielo.br/j/mr/a/jgCsc3Q5c9YyZhtrmHt9Bdh/abstract/?lang=en>> Acesso em: 05 de abr. de 2023.

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.

CAMARGO BC; COSTA HL; RASLAN AA. **Endurecimento superficial de uma liga Ti6Al4V por meio de usinagem por descargas elétricas**. Anais... 5° COBEF - Congresso Brasileiro de Engenharia de Fabricação, Belo Horizonte, 2008.

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.

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.

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

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

GENEL, K. **Boriding kinetics of H13 steel**. *Vacuum*, 80(5), 451-457, 2006. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/232379939_Boriding_kinetics_of_H13_steel> Acesso em: 11 de abr. de 2023.

GHANEM, F.; BRAHAM, C.; FITZPATRICK, M.E.; SIDHOM H. Effect of near-surface residual stress and microstructure modification from machining on the fatigue endurance of a tool steel. **Journal of Materials Engineering and Performance**, v. 11 p. 631–639, 2002.

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. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0257897217307855?via%3Dihub>>.

Acesso em: 10 de abr. de 2023.

GT Grafitas, 2023. Disponível em: <<http://gtgrafites.com.br/produtos/grafite-para-edm/s>>
Acesso em: 10 de mar. de 2023.

GUNES, Ibrahim; TAKTAK, Ibrahim; BINDAL, Cuma; YALCIN, Yilmaz; ULKER, Sukru; KAUALI, Yusuf. 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.

GUNES, Ibrahim. Wear Behaviour of Plasma Paste Boronized of AISI 8620 Steel with Borax and B₂O₃ Paste Mixtures. *Journal of Materials Science and Technology*, v. 29, n. 7, p. 662-668, 2013.

IIEDM, 2023. Disponível em: <<https://intertechnikedm.com/produto/cu150rod/>> Acesso em: 10 de mar. de 2023.

JOSHI, Akshay A; HOSMANI, Santosh S. Pack-boronizing of AISI 4140 Steel: Boronizing mechanism and the role of container design. *Materials and Manufacturing Processes*, v. 29, n.9, p. 1062–1072, 2014.

KAYALI, Yusuf. Investigation of diffusion kinetics of borided AISI P20 steel in micro-wave furnace. *Vacuum* 121, 129- 134, 2015.

KÖNIG, W. **Fertigungsverfahren 3: Abtragen und Generieren.** Springer-Verlag, 2013.

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.

LIMA, D. M.; SILVA, S. P.; NASCIMENTO, C. A.; SILVA, E. R. **Effects of Sodium Octaborate on AISI 4140 Steel Machined by Die-sinking 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 – 5º Congresso Brasileiro de Engenharia de Fabricação, Belo Horizonte, Minas Gerais, Brasil, 14-17 2009.

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

MORÓN, R. C. et al. **Friction and reciprocating wear behavior of borided AISI H13 steel under dry and lubricated conditions.** *Journal of Materials Engineering and Performance*, v. 29, n. 7, p. 4529-4540, 2020. Disponível em: <<https://link.springer.com/article/10.1007/s11665-020-04957-w>>. Acesso em: 28 de mar. de 2023.

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

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

NASCIMENTO, C.A., LIMA, D.M., SILVA, S.P., BATISTA, B.E.R., SILVA, E.R.. **Estudo da aplicação do Octaborato de sódio como fonte de boro no tratamento termoquímico de boretação por eletroerosão no aço ABNT 8620.** *Perspectivas da Ciência e Tecnologia*. Vol.14, 2021, <http://dx.doi.org/10.22407/1984-5693.2021.v14.p.e20221407>. ISSN 1984-5693.

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.

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

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

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, 2017.

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.

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

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. Doctorate degree thesis - Departament of Mechanical Engineering. Katholieke Universiteit Leuren. 1998.

USLU, I; H. COMERT, H; IPEK, M; OZDEMIR, O; BINDAL, C. Evaluation of borides formed on AISI P20 steel. **Materials and Design**, v. 28, p. 55–61, 2007.

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.

YAO, Quantong; SUN, Jian; FU, Yuzhu; TONG, Weiping; ZHANG, Hui. An evaluation of a borided layer formed on Ti6Al-4V alloy by means of SMAT and low-temperature boriding. *Materials (Basel)*, v. 9, n.12, 2016.

ZAGONEL, L. F.. **Tratamentos de superfícies de uma liga ferrosa por íons de nitrogênio**. Tese de Doutorado - Curso de Física, Universidade Estadual de Campinas. Campinas, 2006.

ZIMMERMAN, C., **Boriding (Boronizing) of Metals**, ASM Handbook. Steel Heat Treating Fundamentals and Processes, Vol 4A, ASM International, Materials Park, 2013, p 709–724.