



**CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA DE MINAS  
GERAIS PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE  
MATERIAIS**



**DISSERTAÇÃO DE MESTRADO**

**Claudinei Alfredo do Nascimento**

**AVALIAÇÃO DA APLICAÇÃO DA SOLUÇÃO AQUOSA CONTENDO  
OCTABORATO DE SÓDIO NA USINAGEM POR DESCARGAS ELÉTRICAS  
DO AÇO ABNT 8620**

Belo Horizonte

2023

**CLAUDINEI ALFREDO DO NASCIMENTO**

**AVALIAÇÃO DA APLICAÇÃO DA SOLUÇÃO AQUOSA CONTENDO  
OCTABORATO DE SÓDIO NA USINAGEM POR DESCARGAS ELÉTRICAS  
DO AÇO ABNT 8620**

Defesa de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Materiais do CEFET-MG, 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

2023

Nascimento, Claudinei Alfredo do.  
N244a Avaliação da aplicação da solução aquosa contendo octaborato de sódio na usinagem por descargas elétricas do aço ABNT 8620 / Claudinei Alfredo do Nascimento. – 2023.  
51 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. Aço. 2. Boretação. 3. Usinagem por eletroerosão. 4. Boro. I. Silva, Ernane Rodrigues da. II. Título.

CDD: 671.35



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 21 / 2023 - POSMAT (11.52.07)

Nº do Protocolo: 23062.024259/2023-11

Belo Horizonte-MG, 12 de maio de 2023.

## DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

**?AVALIAÇÃO DA APLICAÇÃO DA SOLUÇÃO AQUOSA CONTENDO OCTABORATO DE SÓDIO NA USINAGEM POR DESCARGAS ELÉTRICAS DO AÇO ABNT 8620 ?**

Autor: Claudinei Alfredo do Nascimento

Orientador: Prof. Ernane Rodrigues da Silva

A Banca Examinadora composta pelos membros abaixo aprovou em 15 de maio de 2023 esta Dissertação:

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

Prof. Dr. Marcello Rosa Dumont (EXAMINADOR INTERNO)  
Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais - CEFET/MG

Prof. Dr. André Barros de Mello Oliveira (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 17/05/2023 12:16 )  
ANDRE BARROS DE MELLO OLIVEIRA  
DEMAT (11.55.06)  
Matrícula: 3194005

(Assinado digitalmente em 15/05/2023 19:53 )  
ERNANE RODRIGUES DA SILVA  
CEMAT (11.51.06)  
Matrícula: 392338

(Assinado digitalmente em 16/05/2023 15:12 )  
MARCELLO ROSA DUMONT  
DEMAT (11.55.06)  
Matrícula: 2143739

(Assinado digitalmente em 15/05/2023 21:03 )  
SINVAL PEDROSO DA SILVA  
CPF: 913.576.676-04

Visualize o documento original em <https://sig.cefetmg.br/public/documentos/index.jsp> informando seu número: **21**, ano: **2023**, tipo: **ATA DE DEFESA DE DISSERTAÇÃO**, data de emissão: **12/05/2023** e o código de verificação: **4aad8b39ee**

Dedico este trabalho aos meus pais (*in memoriam*) que, desde cedo me ensinaram o valor do conhecimento para se entender o mundo. Eles me mostraram pelos seus exemplos, que não há limites para a busca de um sonho. A Deus, por ser meu socorro em momentos de angústia.

## **AGRADECIMENTOS**

Primeiramente, a Deus pela dádiva da vida; pelas bênçãos da saúde, da fé, do otimismo e da perseverança; e por todas as oportunidades surgidas em minha existência.

Agradeço a CAPES pelo apoio ao Programa de Pós-Graduação do CEFET-MG para o aperfeiçoamento pessoal dentro das instituições de educação.

Aos meus pais, pelo incentivo, amor e paciência.

A minha esposa, Juliana de Souza Alves e minha filha, Isadora de Souza Nascimento, pela paciência em momentos difíceis.

Ao meu orientador Ernane Rodrigues da Silva, pelas suas imensuráveis orientações, durante todo o período.

Aos membros da banca da defesa, Prof. Dr. Marcello Rosa Dumont, Prof. Dr. André Barros de Mello Oliveira, Prof. Dr. Sinval Pedroso da Silva, pelas observações, correções, críticas e até sugestões sobre o trabalho aqui apresentado.

A todos os docentes do DEMAT, em especial àqueles que participaram da minha jornada do programa da Pós-Graduação.

Aos técnicos do DEMAT, Caroline Fernandes de Paula Almeida pelas orientações e esclarecimento das dúvidas sobre o programa da pós e, sempre com a serenidade e presteza nas informações, à Júlia Demétrio Xavier, sempre nos tratando com o maior respeito e, neste momento final, tão importante, ajudando no encaminhamento das informações, e ao Jorge Wanderson Barbosa pelas conversas inerentes ao assunto, ensaios nas amostras e a sua disponibilidade em ajudar o próximo que lhe é peculiar.

Obrigado ao CEFET-MG pela infraestrutura em todas as etapas desta caminhada.

E por fim, agradeço a todos do DEMAT, inclusive aos que aqui não foram citados, mas que, tiveram sua importância em ações, orientações e conversas para a conclusão desta etapa.

“Em algum lugar, alguma coisa incrível está esperando para ser descoberta.” (CARL SAGAN)

## RESUMO

A boretação é um tratamento termoquímico aplicados em aços para melhorar suas propriedades superficiais, promovendo melhor desempenho em diversas aplicações tribológicas na engenharia mecânica. Este trabalho de pesquisa investigou a viabilidade da utilização do octaborato de sódio ( $\text{Na}_2\text{B}_8\text{O}_{13}\cdot 4\text{H}_2\text{O}$ ) como fonte do elemento boro no processo de Usinagem por Descargas Elétricas (EDM), por penetração, em superfície do aço ABNT 8620, utilizando uma máquina de eletroerosão adaptada. O eletrodo ferramenta utilizado foi o cobre eletrolítico. O octaborato de sódio foi diluído em água deionizada na proporção  $16,67 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$  para formar a solução aquosa, que atuou como fluido dielétrico. A camada boretada foi avaliada por meio de microscopia óptica e ensaio de microdureza Vickers. A difusão do boro foi avaliada por difratometria de raios-x na superfície usinada e também por espectroscopia de raios-x por dispersão em energia (EDS) em equipamento de Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV). Após a aplicação do tratamento por EDM foi verificado o ganho de 134%, aproximadamente, no valor de microdureza na camada boretada em relação ao material base. A fase  $\text{Fe}_2\text{B}$  foi detectada no difratograma de raios-x, bem como, a implantação do elemento boro, observada por meio de EDS na seção transversal da peça próximo da subsuperfície.

**Palavras-chave:** Aço ABNT 8620, Boretação, Usinagem por Descargas Elétricas, Octaborato de Sódio.

## ABSTRACT

Boriding is a thermochemical treatment applied to steels to improve their surface properties, promoting better performance in various tribological applications in mechanical engineering. This research work investigated the feasibility of using sodium octaborate ( $\text{Na}_2\text{B}_8\text{O}_{13}\cdot 4\text{H}_2\text{O}$ ) as a source of the element boron in the Electrical Discharge Machining (EDM) process, by penetration, in the surface of AISI 8620 steel, using an adapted EDM machine. The tool electrode used was electrolytic copper. Sodium octaborate was diluted in deionized water in the ratio  $16,67 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$  to form an aqueous solution, which acted as a dielectric fluid. The borid layer was evaluated using optical microscopy and the Vickers microhardness test. Boron diffusion was evaluated by x-ray diffraction on the machined surface and also by energy dispersion x-ray spectroscopy (EDS) in Scanning Electron Microscopy (SEM) equipment. After the application of the EDM treatment, a gain of approximately 134% was verified in the microhardness value in the borided layer in relation to the base material. The  $\text{Fe}_2\text{B}$  phase was detected in the x-ray diffractogram, as well as the implantation of the boron element, observed through EDS in the cross-section of the piece close to the subsurface.

**Keywords:** *AISI 8620 steel, Boriding, Sodium octaborate, EDM.*

## LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 – DIAGRAMA DE EQUILÍBRIO DE FASES FERRO-BORO. ....	15
FIGURA 2 – SISTEMAS DE LIMPEZA DA FENDA DE TRABALHO. ....	18
FIGURA 3 – FASES DA DESCARGA ELÉTRICA E FORMAÇÃO DO CANAL DE PLASMA NA EDM. .....	19
FIGURA 4 – INTERAÇÃO DOS ÍONS E ELÉTRONS DO PLASMA COM A SUPERFÍCIE CATÓDICA. .....	24
FIGURA 5 – FLUXOGRAMA DAS ETAPAS DA PESQUISA. ....	27
FIGURA 6 – IMAGEM DAS ADAPTAÇÕES REALIZADAS NA MÁQUINA EDM. ....	28
FIGURA 7 – IMAGEM DA AMOSTRA BIPARTIDA DO AÇO ABNT 8620. ....	29
FIGURA 8 – IMAGEM DO INTERIOR DA CUBA COM ELETRODOS PEÇA E FERRAMENTA FIXADOS. ....	30
FIGURA 9 – IMAGEM DO PAINEL DE CONTROLE DA MÁQUINA DE EDM. ....	32
FIGURA 10 – IMAGEM DE MICROSCOPIA ÓPTICA DA SEÇÃO TRANSVERSAL DA AMOSTRA. ATAQUE.....	35
NITAL 3%. ....	35
FIGURA 11 – IMAGEM DE MICROSCOPIA ÓPTICA DA SEÇÃO TRANSVERSAL DA SUPERFÍCIE USINADA DA AMOSTRA EMBUTIDA COM 4 REGIÕES (A, B, C, D) EM DESTAQUE. ATAQUE NITAL 3%. ....	37
FIGURA 12 – IMAGEM DE MEV DA SEÇÃO TRANSVERSAL DA AMOSTRA ILUSTRANDO AS ENDENTAÇÕES PRODUZIDAS PELO ENSAIO DE MICRODUREZA VICKERS. ....	39
FIGURA 13 – DIFRATOGRAMAS DE RAIOS-X DA SUPERFÍCIE DA AMOSTRA DO AÇO ABNT 8620 USINADA POR EDM COM SOLUÇÃO AQUOSA CONTENDO OCTABORATO DE SÓDIO. .....	40
FIGURA 14 – DIFRATOGRAMA DE RAIOS-X DA AMOSTRA DO AÇO ABNT 8620 REFERÊNCIA. ....	41
FIGURA 15 – IMAGEM DE MEV DA SEÇÃO TRANSVERSAL DA AMOSTRA USINADA. REGIÃO A (CAMADA REFUNDIDA) E B (MATERIAL BASE) ONDE FORAM REALIZADAS AS ANÁLISES EDS. ....	42
FIGURA 16 – GRÁFICO DO ESPECTRO DE EDS NA REGIÃO A, INDICADA NA IMAGEM DE MEV DA FIGURA 15. EM DESTAQUE O TRECHO AMPLIADO, INDICADO PELO RETÂNGULO. ....	42
FIGURA 17 – GRÁFICO DO ESPECTRO DE EDS NA REGIÃO B, INDICADA NA IMAGEM DE MEV DA FIGURA 15. EM DESTAQUE O TRECHO AMPLIADO, INDICADO PELO RETÂNGULO. ....	44

## LISTA DE TABELAS

TABELA 1 – COMPOSIÇÃO QUÍMICA DO AÇO ABNT 8620 UTILIZADO NA PESQUISA (% EM PESO).....	25
TABELA 2 – PARÂMETROS OPERACIONAIS DE EDM USADOS NO PROCESSO DE USINAGEM. .....	31
TABELA 3 – PARÂMETROS USADOS NO ENSAIO DE DIFRAÇÃO DE RAIOS-X.....	34
TABELA 4 – VALORES MÉDIOS DAS ESPESSURAS DAS CAMADAS REFUNDIDA E INTERMEDIÁRIA.....	36
TABELA 5 – MICRODUREZA VICKERS DO AÇO ABNT 8620: CAMADAS REFUNDIDA E INTERMEDIÁRIA.....	38

## SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	11
2. Objetivos geral	13
2.1. Objetivos específicos	13
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	14
3.1. Tratamento termoquímico de boretação	14
3.2. Processo de Usinagem por Descargas Elétricas	16
3.3. Tratamento superficial aplicado por EDM	19
3.4. Processos de implantação iônica por plasma eletrolítico.	22
3.5. Aço ABNT 8620	25
3.6. Octaborato dissódico tetrahidratado ( $\text{Na}_2\text{B}_8\text{O}_{13}\cdot 4\text{H}_2\text{O}$ )	26
4. METODOLOGIA	27
4.1. Máquina de EDM adaptada utilizada na pesquisa	28
4.2. Confecção dos eletrodos peça e ferramenta	29
4.3. Preparação da solução aquosa aplicada na EDM	30
4.4. Aplicação do processo de usinagem por EDM	31
4.5. Preparação das amostras para ensaios e análises	33
5. RESULTADOS	35
5.1. Avaliação camadas subsuperficiais	35
5.2. Mensuração da microdureza Vickers das camadas refundida e intermediária	38
5.3. Avaliação da presença das fases FeB e Fe <sub>2</sub> B e do elemento boro	40
6. CONCLUSÕES	45
7. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	46
REFERÊNCIAS	47

## 1. INTRODUÇÃO

Pesquisadores e cientistas da área de ciência dos materiais buscam por novos materiais e tecnologias de tratamentos superficiais com o objetivo de potencializar ganhos de resistência ao desgaste das superfícies. Neste contexto, um tratamento termoquímico interessante é a boretação, que consiste em adicionar o elemento químico boro, por difusão na superfície de peças, promovendo aumento na dureza superficial das mesmas. Apesar de não ser o método mais eficaz para aumentar a resistência ao desgaste, já que, vários fatores relacionados à microestrutura exercem influência neste mecanismo, é um dos métodos importantes para atenuar desgaste superficial.

A Usinagem por Descargas Elétricas (EDM) se destaca entre os processos não convencionais de usinagem mais utilizados na fabricação de moldes e matrizes, por trabalhar peças de elevada dureza com geometrias complexas, difíceis de serem usinadas por processos de usinagem convencionais (EL-HOFY, 2005).

Inspirado no trabalho de Kumar et al (2005) que verificou a transferência de elementos químicos contidos no fluido dielétrico ou do eletrodo ferramenta utilizado no processo de EDM para a superfície da peça usinada. Raslan (2015) teve a ideia de usar a EDM para modificar e tratar superficialmente o aço ABNT 4140, e junto com seus colaboradores obteve ganhos significativos de dureza superficial ao aplicar uma solução aquosa contendo ureia diluída em água deionizada, como fonte de nitrogênio. Raslan nomeou o processo como Nitretação por Descargas Elétricas (NDE). Sua pesquisa desenvolvida junto com seus orientandos na Faculdade de Engenharia Mecânica (FEMEC) da Universidade Federal e Uberlândia (UFU) gerou a patente nº BR 10 2012 0305232. As pesquisas do professor Raslan possibilitaram a aplicação de soluções contendo substâncias com elementos que, contidos no fluido, são usados para transferir elementos químicos para a superfície da peça usinada pelo processo EDM.

A pesquisa aplicada nesta dissertação foi inspirada no processo NDE e em trabalhos realizados em outras instituições de ensino e pesquisa como a Puc-Minas (QUIRINO, 2017), a UFMG (SILVA, 2020) e o próprio CEFET-MG (SANTOS, 2015; SILVA, 2016; NICESIO, 2017; MURTA, 2017; LIMA, 2018; OLIVEIRA, 2019; SANTOS, 2019; ELIAS, 2020; FERNANDES, 2020; ELIAS,

2020; BARBALHO, 2021; SANTOS, 2022) que possibilitam a publicação de vários artigos científicos.

Este trabalho tem o intuito de realizar a usinagem do aço ABNT 8620 em máquina EDM por penetração adaptada, e com o uso de solução de octaborato dissódico tetra hidratado ( $\text{Na}_2\text{B}_8\text{O}_{13}\cdot 4\text{H}_2\text{O}$ ) diluído em água deionizada como fluido não dielétrico e fonte de boro, substituindo o fluido convencional da máquina no processo EDM. A novidade consiste em um processo de usinagem em simultaneidade com tratamento termoquímico no aço, com emprego de fonte de boro no fluido, contribuindo para melhoria da produtividade e demanda industrial, como uma alternativa para o endurecimento superficial.

Apesar da boretação e nitretação por descargas elétricas serem estudos distintos, trabalhos como o de Raslan, Silva e Santos (2012), Silva et al (2020a), foram utilizados como referência para este estudo, pois o mecanismo de nitretação por descargas elétricas estudado pelos autores, é o que mais se assemelha para fundamentar o processo de endurecimento superficial obtido neste trabalho.

## **2. Objetivos geral**

O objetivo geral desta pesquisa foi avaliar qualitativamente a presença do elemento boro nas camadas superficiais do aço ABNT 8620, usinado por meio do processo de Usinagem por Descargas Elétricas por penetração, aplicando como fluido uma solução de octaborato dissódico tetrahidratado ( $\text{Na}_2\text{B}_8\text{O}_{13}\cdot 4\text{H}_2\text{O}$ ) diluído em água deionizada.

### **2.1. Objetivos específicos**

- Utilizar máquina de EDM adaptada para aplicação da solução aquosa contendo octaborato de sódio na usinagem de amostras do aço ABNT 8620;
- Avaliar a formação das camadas superficiais: refundida e intermediária, por meio de microscopia óptica e Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV);
- 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 formadas na superfície da amostra usinada por EDM;
- 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**

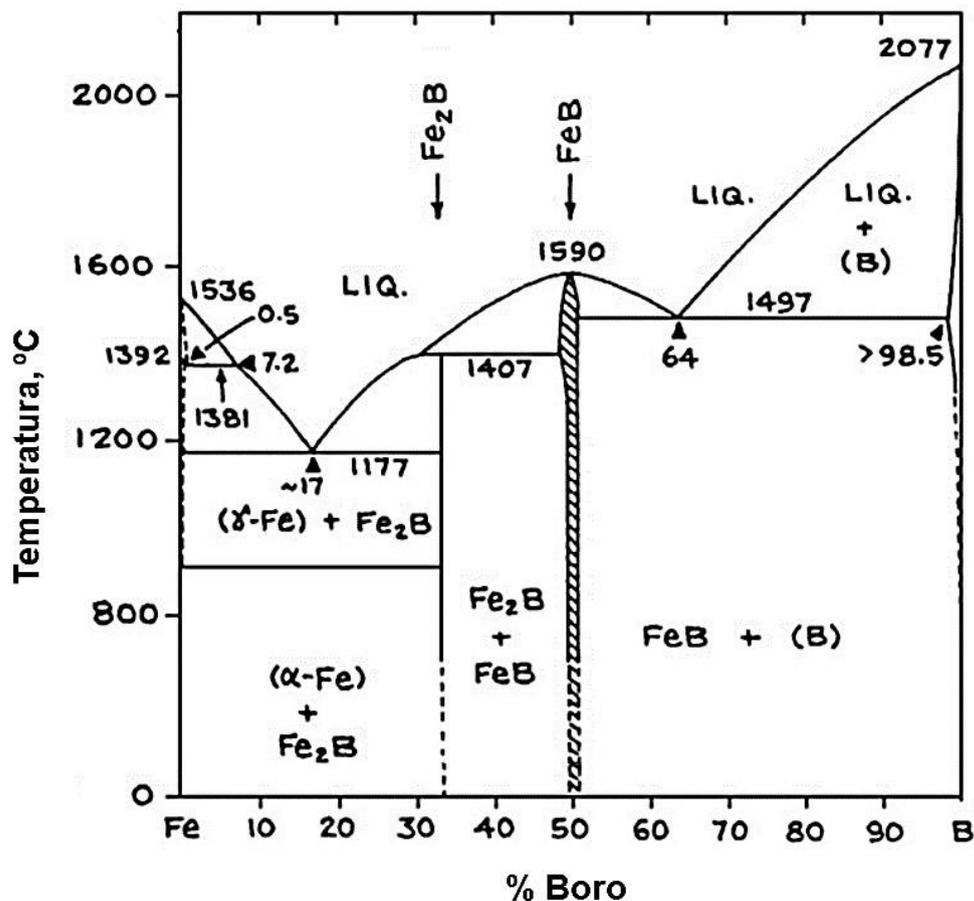
As propriedades mecânicas dos aços permitem que sejam amplamente utilizados nas indústrias. A escolha do material, tratamento superficial adequado e o processo para a melhoria superficial, sobre condições extremas de serviço, como corrosão e desgaste, reduz sua vida útil, causando perdas econômicas. Logo, pesquisas sobre técnicas de modificação superficial apresentam relevante interesse no meio científico.

#### **3.1. Tratamento termoquímico de boretação**

De acordo com Türkmen et al (2019) os processos termoquímicos como cementação, nitretação, carbo-nitretação, nitro-cementação e boretação são comumente usados como métodos de endurecimento superficial, para melhorar as propriedades de superfície em materiais ferrosos. A boretação é considerada uma das técnicas de modificação de superfície muito eficaz para melhorar as propriedades mecânicas e resistência a corrosão de metais e suas ligas (GUNES et al, 2019). A boretação tem sido aplicada em uma ampla gama de materiais como aço ao carbono, ligas de aço, aço ferramenta e materiais não ferrosos (USLU et al, 2007). Segundo Tabur et al (2009) as peças de aço boretado apresentam excelente desempenho em diversas aplicações tribológicas na engenharia mecânica e no setor automotivo. Silva et al (2018) afirmam que o processo de boretação é um tratamento termoquímico no qual os átomos de boro são difundidos na superfície de peças para formar camadas duras compostas de boreto metálico, no caso de aços de alta liga. Para Skrócie (2021), algumas vantagens como ganho na dureza da superfície do material tratado e redução no coeficiente de atrito, são observadas, possibilitando redução significativa do desgaste na superfície tratada. De acordo com Sen et al (2005) a difusão do boro na superfície de ligas metálicas cria uma zona de reação densa de boretos metálicos, gerando propriedades superiores na superfície dos materiais. O boro é um elemento de tamanho relativamente pequeno, este fato permite que ele se difunda em uma variedade de metais, reagindo com esses para formar boretos intermetálicos. Gunes (2013) afirma que as camadas de boreto consistem principalmente de fases intermetálicas FeB e Fe<sub>2</sub>B. A boretação promove a

melhoria de várias propriedades até uma determinada profundidade da superfície para o interior do metal base. Durante o processo, o boro é difundido na parte metálica através da superfície em um meio contendo uma fonte do mesmo. O agente boretante (fonte de boro) pode ser aplicado às peças de várias maneiras: no estado sólido, líquido, gasoso ou mesmo no estado de plasma (ŞEŞEN et al, 2017). Os tratamentos de difusão térmica de compostos de boro usados para formar boretos no ferro podem ser aplicados em meio gasoso, sólido, implantação de íons, eletroquímica, eletrólise, boretção a plasma e boretção em pasta (GUNES et al, 2013a). Os boretos de ferro  $\text{FeB}$  e  $\text{Fe}_2\text{B}$ , formados no aço possuem excelente desempenho tribológico (GUNES et al, 2019). O primeiro tipo a se formar é o  $\text{Fe}_2\text{B}$ , devido ao menor percentual do boro na liga, como pode ser observado no diagrama de Ferro-Boro, ilustrado na Figura 1.

Figura 1 – Diagrama de equilíbrio de fases Ferro-Boro.



Fonte: Allaoui et al (2006) – Adaptada.

Segundo Kulka (2019), existem diversas classificações na literatura para os processos de boretação, porém, o autor propõe uma classificação para boretação realizada em materiais ferrosos e não ferrosos, dividida basicamente em técnicas físicas de implantação iônica e alta energia, e técnicas químicas, através de boretantes sólidos, líquidos e gasosos. Na boretação física por implantação, átomos de boro ou íons, são acelerados por um canhão implantador de boro em direção a superfície do material a ser boretado, ou por canhões de plasma. O processo é geralmente utilizado na fabricação de componentes eletrônicos semicondutores. Nos métodos de alta energia, existe a boretação por feixe de elétrons. E de acordo com a tecnologia empregada, podem ser aplicados também o laser ou plasma, boretando por fusão de boro a superfície do material, formando boretos refundidos ou difundidos de elevada dureza. Ambos os métodos, de implantação iônica de boro e os que envolvem alta energia, exigem tecnologia avançada para serem utilizados, logo, têm baixa aplicabilidade e alto custo, quando comparado aos outros meios de boretação (KULKA, 2019) e (NOVAKOVA et al, 2004).

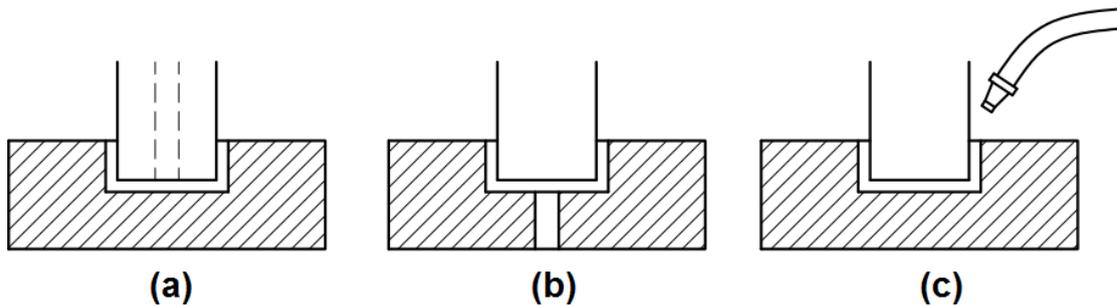
### **3.2. Processo de Usinagem por Descargas Elétricas**

De acordo com Raslan (2015) a usinagem por descargas elétricas (EDM – Electrical Discharge Machning), popularmente conhecida como eletroerosão é um processo de usinagem não convencional termoelétrico. A fonte de energia tem a sua origem em descargas elétricas geradas por canal de plasma, o qual é formado pela passagem de corrente elétrica entre dois eletrodos, peça e ferramenta, imersas em um fluido dielétrico. Altas temperaturas, entre 8.000 e 10.000 °C, são adequadas para o canal de plasma. Quando o canal de plasma é dissipado, as temperaturas atingem valores superiores a 15.000 °C e são geradas pressões da ordem de 200 bar. Este aumento na temperatura deve-se à energia cinética transferida por íons contidos no canal de plasma que colidem com as superfícies dos eletrodos. O efeito combinado de evaporação e fusão de material com turbulência do fluido dielétrico é responsável pela remoção de materiais. Guitrau (2017) afirma que os materiais empregados como eletrodos ferramenta são, normalmente, cobre e grafita. O cobre devido à boa condutividade elétrica (61,7 S.m/mm<sup>2</sup>) e a grafita devido ao alto ponto de fusão (3727 °C). Segundo Santos et

al (2017a) o processo de remoção de material ocorre por meio da descarga de energia entre ferramenta e eletrodo peça, que são separados por uma pequena distância, o gap, (de 5 a 100  $\mu\text{m}$  dependendo dos parâmetros elétricos ajustados na máquina), preenchido com um fluido dielétrico, normalmente um óleo de hidrocarboneto ou água deionizada. O princípio fundamental do processo é a remoção do material através do efeito térmico da descarga causada pela abertura do arco de formação do canal plasma, isto é, quando ocorre a ionização do fluido dielétrico e a corrente elétrica é conduzida ao longo deste canal de plasma durante o pulso. O calor de cada descarga funde e vaporiza mesmo as partes micrométricas do material próximo da região do gap, isto ocorre, tanto na peça como na ferramenta, submetidas ao bombardeamento de elétrons e íons. O polo positivo recebe o impacto de elétrons, enquanto o polo negativo recebe o impacto de íons positivos, que são mais pesados que os elétrons. Geralmente os íons positivos produzem menor energia cinética que os elétrons, por serem mais lentos e produzem menor impacto, gerando menos calor.

O líquido dielétrico é polarizado e as moléculas começam a se organizar entre as superfícies mais próximas do eletrodo ferramenta e peça até que a ionização ocorra. Elétrons e íons colidem nos eletrodos e sua energia cinética é convertida em energia térmica. Ao final da descarga, a expulsão violenta do material aquecido de ambos os eletrodos ocorre devido ao fluido dielétrico, que arrasta os detritos e resfria as superfícies instantaneamente. O fluido dielétrico é responsável por remover o material fundido na forma de detritos e pequenas cavidades (crateras) se formam na superfície. A camada abaixo da refundida também absorve elementos químicos oriundos do fluido dielétrico (MEHMOOD, 2016). De acordo com Fuller (1989), o fluido dielétrico tem um papel fundamental no processo, controlando a potência de abertura da descarga, promovendo a lavagem da fenda de trabalho, arrastando para fora as partículas erodidas, e auxilia no arrefecimento do sistema, nas vizinhanças das descargas. A limpeza adequada é importante para o desempenho do processo, sendo responsável pela presença e formação da camada refundida. Para Benedict (1987) os principais sistemas de limpeza a fenda de trabalho estão ilustrados na Figura 2. Em 2(a), a pressão ou sucção pelo interior do eletrodo ferramenta, em 2(b), a pressão ou sucção pelo interior do eletrodo peça e 2(c) por jato.

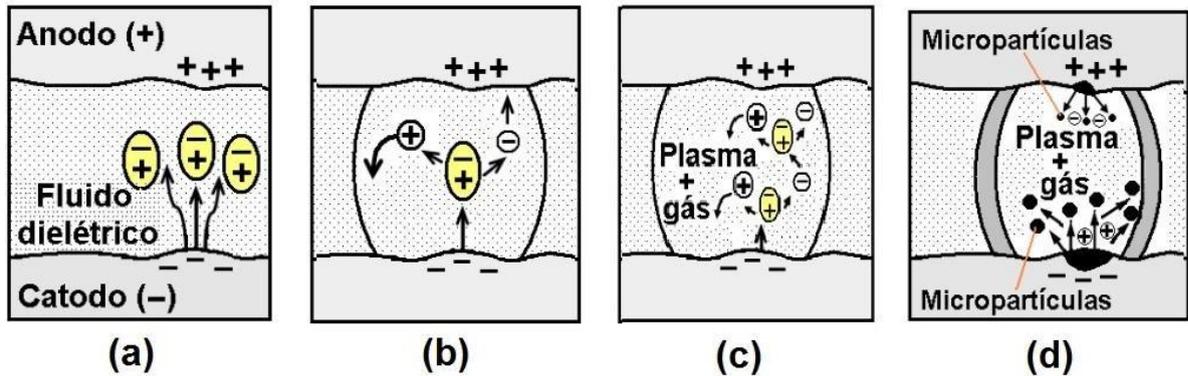
Figura 2 – Sistemas de limpeza da fenda de trabalho.



Fonte: Benedict (1987) – adaptada.

De acordo com Klocke e König (1997), a teoria termoelétrica é a que melhor explica o processo, segundo o qual o calor gerado pela descarga elétrica na região próxima ao canal de plasma funde o material, que é removido e ejetado da poça fundida devido à evaporação. A descarga elétrica ocorre durante quatro etapas sucessivas: Na primeira, de ignição, Figura 3(a), uma diferença de potencial é aplicada entre os eletrodos ferramenta e peça quando elétrons primários são emitidos pelo catodo e atraídos pelo anodo. Durante o caminho na fenda de trabalho, o gap, através do fluido dielétrico, os elétrons colidem com átomos neutros do dielétrico e formam íons positivos, íons negativos e elétrons secundários. Na segunda fase, Figura 3(b), ocorre a formação do canal de plasma, onde íons positivos, provenientes do dielétrico, são atraídos pelo catodo e, ao colidirem contra o mesmo, liberam mais elétrons. O fluido dielétrico começa a aquecer e diminui a resistência elétrica. O aquecimento forma uma bolha de vapor e o canal de plasma é criado. Na terceira fase, de fusão, Figura 3(c), quando elétrons e íons colidem com a superfície, sua energia cinética é transformada em calor, que induz a fusão e a evaporação parcial do material da superfície. O tempo de duração das três primeiras fases é denominado tempo de pulso ( $T_{on}$ ). Na última fase, Figura 3(d), o tempo de pausa ( $T_{off}$ ), ocorre a ejeção do material líquido, após atingir o tempo de descarga ajustado na máquina de EDM para o regime de trabalho, a corrente é interrompida bruscamente. O canal de plasma se desfaz e a pressão, cai rapidamente, com o material fundido evaporando e pequenas gotas líquidas são ejetadas da poça fundida. O material fundido é depositado e resolidificado na superfície da peça produzindo a camada refundida (STEVENS, 1998).

Figura 3 – Fases da descarga elétrica e formação do canal de plasma na EDM.



Fonte: Stevens (1998) – adaptada.

### 3.3. Tratamento superficial aplicado por EDM

O processo de EDM foi proposto inicialmente para uso na usinagem de materiais condutores elétricos de alta dureza. No entanto, o processo pode ser usado também como um método adicional para introduzir elementos químicos à superfície de peças por implantação iônica. O requisito fundamental para o enriquecimento por implantação de íons pelo processo EDM é utilizar solução aquosa contendo o elemento que se deseja implantar. Os íons do elemento químico são incorporados ao canal de plasma, possibilitando a implantação dos mesmos (SANTOS et al, 2017).

Os pesquisadores buscam desenvolver tecnologias de modificação de superfície que podem ser facilmente operadas e de baixo custo (YAN, TSAI e HUANG, 2005). Melhorias significativas das propriedades superficiais são possíveis com a aplicação do processo de EDM por penetração com fluido dielétrico formado por solução aquosa contendo elementos como: nitrogênio, carbono, boro, entre outros, que são transferidos para a superfície possibilitando o enriquecimento das mesmas. Esta técnica de enriquecimento de superfícies metálicas com elementos químicos utilizando descargas elétricas, vem se tornando atrativa e economicamente viável (NICESIO et al, 2016). O mecanismo de tratamento por eletroerosão difere das condições termodinâmicas presentes no tratamento a plasma convencional, uma vez que os íons no canal de plasma atingem a superfície com alta energia cinética, levando o material base à fusão e sublimação da superfície. Uma parte do material fundido é removida pelo movimento do fluido dielétrico e o restante é depositado, formando a camada

refundida (SANTOS et al, 2016).

Na EDM a energia gerada pelo canal de plasma funde o material. A natureza complexa do processo envolve a interação simultânea de fenômenos térmicos, mecânicos, químicos e elétricos. A EDM pode ser descrita como o processo de erosão e remoção de material pela ação transitória de descargas elétricas em materiais condutores, eletrodos peça e ferramenta, catodo e anodo, imersos em um líquido dielétrico, separados por uma pequena distância, o gap. O principal modo de erosão é causado pelo efeito térmico local, devido à descarga elétrica, que envolve os fenômenos como: condução de calor, distribuição de energia, fusão, evaporação, ionização, formação e colapso do canal de plasma. Quando a tensão elétrica no gap torna-se alta o suficiente, ela é descarregada entre os eletrodos, em um intervalo de tempo de micro segundos, íons positivos e elétrons são acelerados produzindo o canal de plasma. No momento em que o processo de ionização produz pressão e temperatura suficiente para ruptura do canal de plasma, o material dos eletrodos é fundido e evaporado (MEHTA e PATEL, 2014).

Para Nicesio et al (2016) muitos estudos têm sido conduzidos com o uso de diferentes fluidos dielétricos visando possibilitar o enriquecimento superficial de ligas com nitrogênio, carbono, boro e outros elementos. Melhorias significativas nas propriedades superficiais têm sido relatadas e a viabilidade do processo vem sendo estabelecida. Assim, a técnica de enriquecimento de superfícies metálicas utilizando descargas elétricas, torna-se atrativa, técnica e economicamente, sendo explorada em várias pesquisas. Tratamentos de superfície termoquímicos são especialmente aplicados em casos onde as características da superfície, como resistência ao desgaste e à corrosão de metais, devem ser aprimoradas. Os tratamentos de superfície termoquímicos tradicionalmente aplicados consistem em vários métodos, como cementação, nitretação e boretação (TÜRKMEN e YALAMAÇ, 2021). De acordo com Silva et al (2017) a formação de camadas de boreto durante o processo de boretação aumenta as propriedades mecânicas e químicas da superfície do material. O aumento dessas propriedades está relacionado à microestrutura da camada formada por boreto dos sistemas FeB ou Fe<sub>2</sub>B, produzidos pelas condições experimentais do processo e da composição química do substrato. Segundo Yan et al (2005) os pesquisadores estão interessados em desenvolver a tecnologia de modificação de superfície que pode

ser facilmente operado e de baixo custo. Os sistemas consistem em modificação de superfície usando usinagem por descarga elétrica por penetração com cobre eletrolítico como eletrodo ferramenta. A novidade do processo reside na técnica experimental, que permitiu a produção da camada modificada simultaneamente à usinagem por descarga elétrica do aço (SILVA et al, 2020a). O campo de modificação de superfície usando descargas elétricas com elementos químicos presentes no fluido dielétrico está em estágio experimental e muitas questões precisam ser abordadas antes que o método possa ser formalmente aceito pelas indústrias (SILVA et al, 2020b). A modificação de superfície usando eletroerosão é uma técnica em que o material na presença de fluido dielétrico, é decomposto e depositado sobre a superfície da peça de trabalho (SINGH e BANWAIT, 2016). Para realizar o processo de modificação superficial de componentes por meio da usinagem por eletroerosão, um dos desafios enfrentados pelos pesquisadores é: descobrir um produto que possa ser usado como fonte do elemento que deseje-se implantar na superfície. Camargo et al (2008) obtiveram sucesso ao utilizar a ureia como fonte de nitrogênio para aplicar o processo de nitretação por descargas elétricas, ao usinar a liga de titânio Ti-6Al-4V.

A modificação de superfícies é uma das aplicações do processo EDM. Vários estudos e pesquisas foram realizados, com resultados satisfatórios em relação às melhorias significativas das propriedades superficiais, viabilizando o uso do processo (KUMAR et al, 2009). Uma destas aplicações da EDM foi a nitretação com o objetivo de difundir átomos de nitrogênio na superfície do metal na presença de um ambiente de plasma eletrolítico. Os átomos de nitrogênio reagem quimicamente com elementos de liga e formam compostos estáveis (KHALAF et al, 2011). A modificação superficial por EDM é possível devido à presença de elementos químicos contidos no fluido dielétrico (SILVA et al, 2020). A utilização do processo de Usinagem por Descargas Elétricas por penetração alcança toda a área da cavidade do molde e/ou matriz sujeita à ação do canal de plasma independente da complexidade da mesma, propiciando assim, um método inovador de tratamento termoquímico (SANTOS et al, 2017).

A camada refundida é formada pelo material fundido durante a descarga, e que não é expelido quando o canal de plasma entra em colapso, ou é arrastado pelo fluido dielétrico, esses detritos se solidificam novamente na superfície. Surge ainda, a camada intermediária que está localizada logo abaixo da refundida, não

sofrendo fusão durante a descarga. Ela apresenta modificações na composição química devido a migração de átomos de íons positivos e micro estrutural devido as altas temperaturas (AMORIM et al, 2019).

### **3.4. Processos de implantação iônica por plasma eletrolítico.**

A boretação eletrolítica a plasma é o resultado integrado da eletrólise convencional e do processo de plasma atmosférico (JIANG, BAO e WANG, 2017). O tratamento eletrolítico a plasma por ser ecologicamente viável, supera neste quesito em relação aos processos de boretação convencionais. Além disso, como a formação do canal de plasma eletrolítico é um processo instantâneo e ocorre em uma fração de segundos. A combinação de plasma e eletrólise propicia o tratamento superficial de diversos metais. O calor aplicado ao eletrólito muda o estado líquido para gasoso, gás este que aquecido libera elétrons e íons positivos ao separar as partículas contidas no mesmo. O aquecimento promovido pelos deslocamentos dos elétrons e íons é utilizado para tratamento superficial (JUMBAD et al, 2020). O canal de plasma propicia o deslocamento rápido dos elétrons e íons entre os eletrodos, formando uma avalanche dos mesmos contra as superfícies dos eletrodos (FRIDMAN, 2008). A capacidade de formar plasma no eletrólito aquoso e na superfície da peça de trabalho promove a possibilidade de realização de vários tratamentos em peças metálicas. Além de diferentes interações químicas, elétricas, mecânicas e térmicas que ocorrem entre o sistema metal plasma eletrólito e o meio que os circundam. A energia cinética adquirida pelos íons devido ao deslocamento, no interior do canal de plasma, é usada para depositá-los na superfície do catodo (GUPTA et al, 2007).

O trabalho de pesquisa citado neste texto foi aplicado observando-se uma nova técnica de boretação, baseada em uma abordagem eletroquímica, semelhante ao trabalho experimental de Kaouka, Allaoui e Keddou (2013). O elemento boro é separado da estrutura molecular e implanta-se na superfície devido à energia propiciada pela descarga elétrica e devido ao seu menor tamanho atômico, em relação aos átomos de ferro (ÖZERKAN, 2019).

O princípio do tratamento iônico é baseado na descarga elétrica entre dois eletrodos, em que determinado aumento da diferença de potencial entre os eletrodos é requerido para iniciar e manter a descarga incandescente. O campo

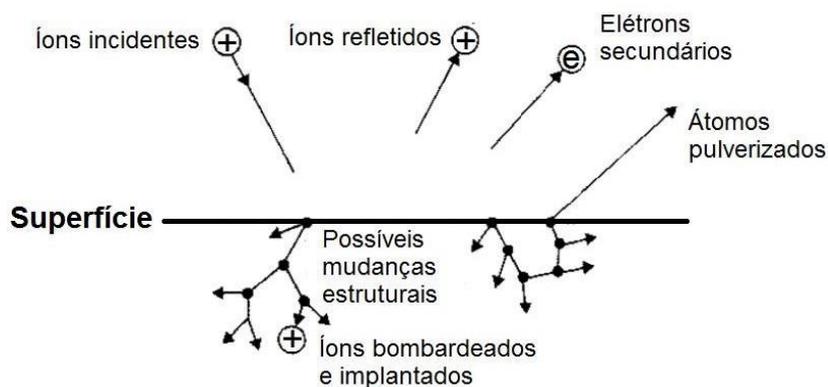
elétrico produz elétrons e íons livres no espaço entre os eletrodos. Na região da descarga elétrica os gases sofrem reações físico-químicas onde os elétrons e íons livres ganham e perdem energia devido ao deslocamento e colisões como as moléculas e átomos neutros, respectivamente. A transferência de energia para as moléculas leva a formação de uma variedade de novas espécies, incluindo átomos e moléculas ionizadas e excitadas. No meio onde estas descargas ocorrem, ou seja, o canal de plasma, características mecânicas e metalúrgicas podem ser alteradas através de reações que ocorrem entre a superfície do metal e as espécies ativas do plasma (ALVES e RODRIGUES, 1991).

O processo de tratamento por plasma é mantido pela descarga elétrica. Na interface plasma metal (catodo) ocorrem os principais fenômenos que auto sustentam a descarga e permitem o transporte de elementos para o interior do substrato. O plasma é gerado pelo fornecimento de energia a uma mistura gasosa ionizada, em um meio contendo quantidades aproximadamente iguais de carga positivas e negativas com comportamento coletivo. A transferência de energia se dá pelo campo elétrico. O campo elétrico intenso nas proximidades do catodo tem maior relevância nos tratamentos termoquímicos por plasma, já que os íons colidem com sua superfície e interagem química e fisicamente com as superfícies. Quando os íons atingem o catodo, algumas interações ocorrem, conforme pode ser observado na Figura 4. O bombardeamento de íons promove alterações micro estruturais a nível atômico como formação de lacunas e aquecimento do substrato, como consequência nos tratamentos. O bombardeamento também é responsável pela emissão de elétrons secundários, que são essenciais para a manutenção da descarga (reações de ionização), além de promover reações de dissociação e excitação, para geração de um ambiente de elevada reatividade (CHAPMAN, 1980).

O plasma contém espécies neutras e eletricamente carregadas de elétrons, íons positivos, íons negativos, átomos e moléculas. Por ser de tecnologia limpa, o plasma tem sido empregado como tratamento de superfícies metálicas, em substituição aos processos tradicionais, químicos ou mecânicos (NASCIMENTO NETO, 2006). A colisão dos íons com a superfície, nos processos por plasma, ocasiona o transporte do elemento químico a ser implantado para a superfície. Em estado de plasma, ou por meio de um feixe de íons, as moléculas são dotadas de energia, em geral, muito maior que a sua energia de ligação. As moléculas

ionizadas, ao atingirem a superfície se dissociam, e os átomos resultantes são implantados a uma determinada profundidade (ZAGONEL, 2006). A Figura 4 ilustra esquematicamente as prováveis reações físico-químicas que ocorrem na superfície do substrato e na interface plasma metal.

Figura 4 – Interação dos íons e elétrons do plasma com a superfície catódica.



Fonte: CHAPMAN (1980) – adaptada.

Embora sejam escassos na literatura, estudos de boretação por eletroerosão, Özerkan (2018) relata ter tratado a superfície do aço AISI 1040 com o emprego da usinagem por EDM, utilizando solução de pós de óxido de boro  $B_2O_3$  misturado em querosene em diferentes concentrações, como fluido dielétrico. Pós eletricamente condutores misturados ao dielétrico no processo de eletroerosão, podem formar camadas de liga altamente homogêneas. Apesar do elemento boro isoladamente, não ser condutor, a utilização de óxido de Boro  $B_2O_3$  misturado em querosene em diferentes concentrações neste processo resultou na obtenção de uma camada com alta resistência à abrasão e à corrosão, descreve o autor.

Os processos de nitretação e boretação são tratamentos termoquímicos superficiais de endurecimento por meio difusivo de átomos. Sendo que a boretação utiliza atmosfera rica em boro para promover a difusão do elemento químico na superfície do material. Já a nitretação utiliza atmosfera rica em nitrogênio, conforme estudos realizados por Silva et al (2020a) de nitretação por usinagem por descargas elétricas por penetração. Segundo Raslan (2015), 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 de implantação iônica, proposto pelo autor para produzir a nitretação por

descargas elétricas. No processo de implantação iônica por EDM, íons são acelerados e bombardeados com alta energia em direção a superfície, liberando átomos que reagem com espécies do plasma, formando fases com o nitrogênio do tipo Fe-N (SANTOS, 2013).

### 3.5. Aço ABNT 8620

Segundo An et al (2012) o aço ABNT 8620 é usado em hastes de sucção de campo petrolífero, por ser um aço relativamente barato. No entanto, sua capacidade operacional é baixa em condições de corrosão e desgaste consideráveis.

A Tabela 1 apresenta a composição química do aço ABNT 8620, aplicado na pesquisa.

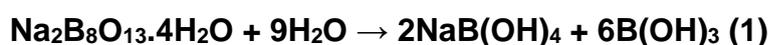
Tabela 1 – Composição química do aço ABNT 8620 utilizado na pesquisa (% em peso).

<b>Elemento químico</b>	<b>Valores (mínimo – máximo)</b>
C	0,18 - 0,23
Mn	0,70 - 0,90
P	0.030
S	0.040
Si	0,15 - 0,35
Cr	0,40 - 0,60
Mo	0,40 - 0,60
Ni	0,40 - 0,70
Fe	Balanço

Fonte: Interlloy (2023).

### 3.6. Octaborato dissódico tetrahidratado ( $\text{Na}_2\text{B}_8\text{O}_{13}\cdot 4\text{H}_2\text{O}$ )

O octaborato dissódico tetrahidratado ( $\text{Na}_2\text{B}_8\text{O}_{13}\cdot 4\text{H}_2\text{O}$ ), ou de forma resumida octaborato de sódio é comumente utilizado como fertilizante na agricultura. Ele é encontrado disposto na forma de líquido claro ou mais comum, na forma de pó, inodoro, não inflamável e de baixa toxicidade. Quando dissolvido em água o octaborato de sódio, resulta em tetrahidroxiborato mais ácido bórico conforme Equação (1):



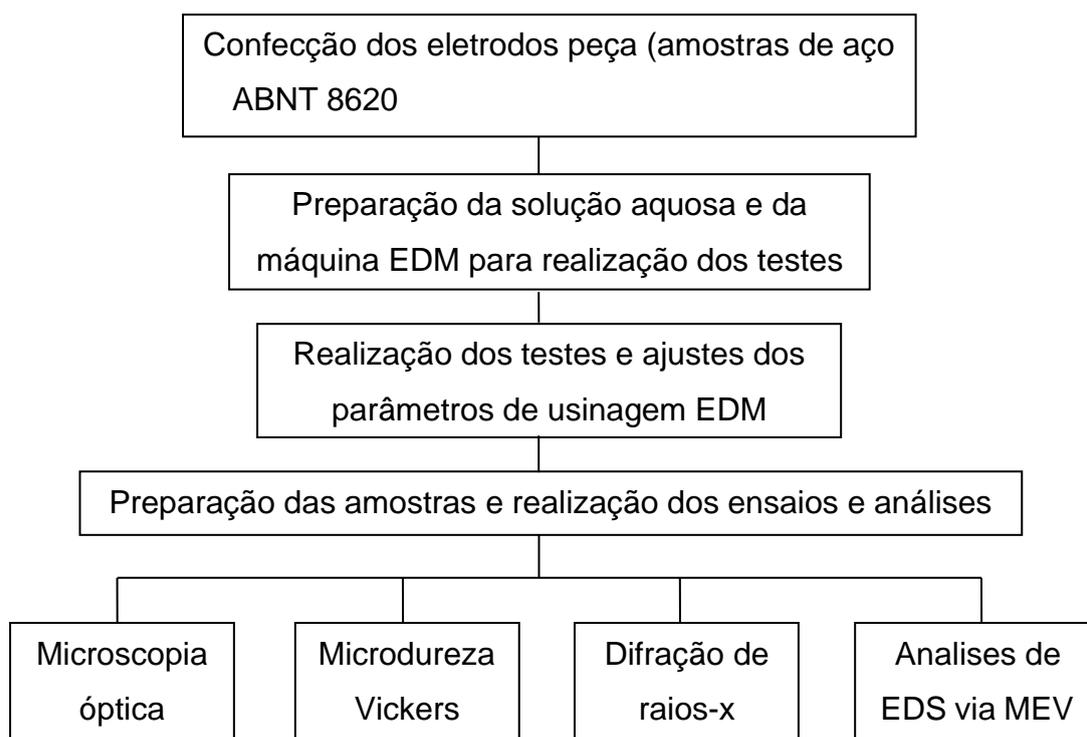
Segundo Briggs (2000) a solubilidade do composto de octaborato de sódio é de aproximadamente  $95 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$  de água a  $20 \text{ }^\circ\text{C}$ .

Türkmen e Yalamaç (2021) utilizaram pós de octaborato de sódio tetrahidratado ( $\text{Na}_2\text{B}_8\text{O}_{13}\cdot 4\text{H}_2\text{O}$ ) e misturas contendo ácido bórico ( $\text{H}_3\text{BO}_3$ ) na boretação convencional em caixa do aço SAE 1020. O tratamento de boretação foi realizado em forno mufla a  $850 \text{ }^\circ\text{C}$  por 4h. Uma camada próxima de  $65 \mu\text{m}$  de espessura com boretos de  $\text{Fe}_2\text{B}$  e  $\text{FeB}$  foi obtida com uma dureza mais externa da camada próxima de 1540 HV.

#### 4. METODOLOGIA

O trabalho foi realizado na máquina de Usinagem por Descargas Elétricas por penetração Eletroplus – modelo 540/Servspark –, adaptada para viabilizar a aplicação do processo EDM utilizando fluido não convencional, no caso desta pesquisa, uma solução aquosa contendo octaborato dissódico tetra hidratado ( $\text{Na}_2\text{B}_8\text{O}_{13}\cdot 4\text{H}_2\text{O}$ ) diluído em água deionizada. As adaptações são similares às utilizadas por outros pesquisadores (SANTOS et al, 2017; ELIAS et al, 2019; SILVA et al, 2020), quando aplicaram procedimento experimental semelhante no processo de Nitretação por Descargas Elétricas. O fluxograma da Figura 5 ilustra as etapas da pesquisa.

Figura 5 – Fluxograma das etapas da pesquisa.



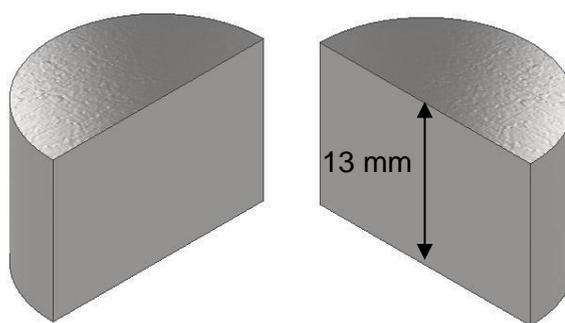
Fonte: o próprio autor.



## 4.2. Confeção dos eletrodos peça e ferramenta

Os eletrodos peça, usados como amostras, foram confeccionados em aço ABNT 8620 por meio de torno CNC, com dimensões de 19 mm de diâmetro por 13 mm de comprimento. Posteriormente as amostras foram cortadas com o aparelho *cut-off* no sentido axial, formando um conjunto de duas peças bipartidas, que se manteve com 19 mm por 13 mm. Tal procedimento evita o deslocamento da camada refundida, que seria provocado pelo corte, necessário para análise da seção transversal da amostra, que permite a visualização das camadas formadas no processo de usinagem por EDM. A Figura 7 ilustra o formato das amostras bipartidas.

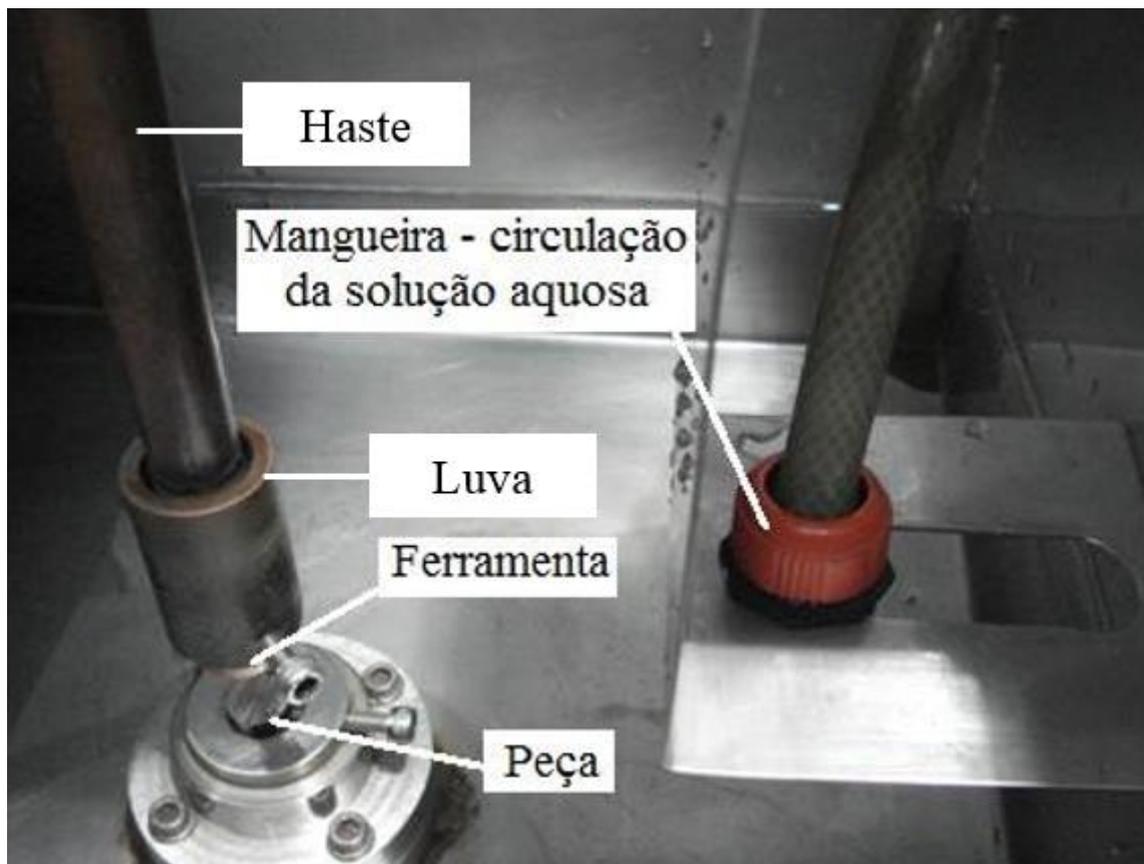
Figura 7 – Imagem da amostra bipartida do aço ABNT 8620.



Fonte: o próprio autor.

Os eletrodos ferramenta de cobre eletrolítico foram confeccionados em torno convencional no formato cilíndrico com diâmetro de 22 mm e 30 mm de comprimento. Foi utilizado um eletrodo ferramenta distinto por amostra em cada teste de usinagem por EDM. A Figura 8 ilustra imagem do interior da cuba auxiliar com eletrodo ferramenta e amostra, ambos posicionados para usinagem antes da adição da solução aquosa na cuba. O eletrodo ferramenta foi fixado por meio de parafuso de fixação na luva que forma conjunto com a haste, ambos de cobre. A amostra fica alojada em um furo cego com rebaixo, localizado no centro do suporte, em aço inoxidável, soldado no fundo da cuba auxiliar. Na Figura 8 também é possível observar o suporte para fixação da ponta de saída da mangueira ligada à bomba centrífuga, que atua com sistema de circulação por jato.

Figura 8 – Imagem do interior da cuba com eletrodos peça e ferramenta fixados.



Fonte: o próprio autor.

#### 4.3. Preparação da solução aquosa aplicada na EDM

A solução aquosa utilizada no processo de EDM não se comportou como fluido dielétrico, já que a adição do octaborato de sódio em pó tornou a mesma altamente condutora, aproximadamente  $7000 \mu\text{S}/\text{cm}$ . A solução foi preparada a partir de 30 litros de água deionizada, com  $0 \mu\text{S}/\text{cm}$  de condutividade elétrica, após a deionização da água potável com  $160 \mu\text{S}/\text{cm}$ , aproximadamente, disponibilizada pela companhia de abastecimento público. A deionização da água foi possível, devido ao aparelho deionizador portátil à base de resina. Após o processo de deionização, foram adicionadas 500 gramas de octaborato de sódio, que diluído, formou a solução aquosa na concentração de 16,67 gramas por litro.

#### 4.4. Aplicação do processo de usinagem por EDM

Para possibilitar a aplicação do processo na máquina de EDM alguns ajustes no painel de controle da máquina foram necessários. Um problema que surgiu devido a alta condutividade elétrica da solução aquosa foi monitorada, e verificada pelo condutivímetro, foi a necessidade de iniciar o processo de usinagem com o eletrodo afastado do nível máximo da solução, já que o procedimento não funcionava com o eletrodo ferramenta submerso no fluido. A Tabela 2 apresenta os parâmetros operacionais ajustados no painel da máquina.

A polaridade da máquina pode ser alterada por meio da conexão de cabos que partem do seu painel de controle. A combinação dos ajustes desses parâmetros proporciona funcionamento estável, que possibilita a aplicação deste tratamento superficial por descargas elétrica combinada com a eletroerosão. Com objetivo de ajustar os parâmetros, inicia-se o processo de usinagem e observa o erosímetro. O operador gira os botões para ajustes necessários, até que todas as luzes dos *led's* do erosímetro acendam, o que é uma indicação de estabilidade do processo de usinagem. O tempo de usinagem de cada amostra foi de 20 minutos. Foram usinadas cinco amostras bipartidas totalizando 10 amostras do aço ABNT 8620.

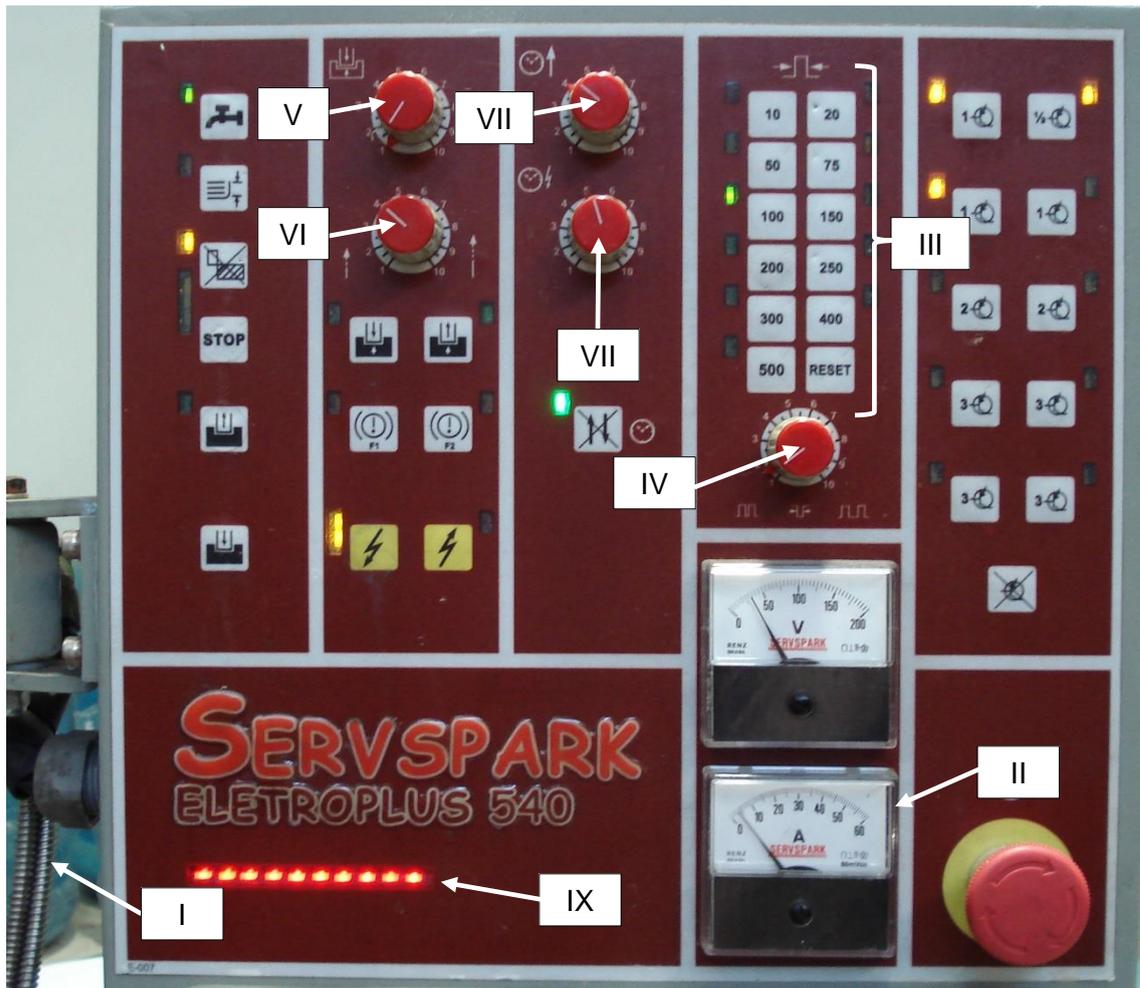
Tabela 2 – Parâmetros operacionais de EDM usados no processo de usinagem.

ITEM	PARÂMETRO	ESPECIFICAÇÃO
I	Polaridade do eletrodo ferramenta	Positiva
II	Corrente	40 A
III	Tempo de pulso ( $T_{ON}$ )	500 $\mu$ s
IV	Tempo de pausa ( $T_{OFF}$ )	1,5
V	Fenda de trabalho ( <i>Gap</i> )	1,0
VI	Afastamento periódico da ferramenta	5,0
VII	Velocidade do servo	5,0
VIII	Tempo de erosão	5,0
IX	Erosímetro	

Fonte: o próprio autor.

A Figura 9 ilustra o painel de controles da máquina de EDM. Os parâmetros **V, VI, VII e VIII**, destacado na imagem, são ajustados diretamente nos botões do painel e suas unidades não são informadas no manual do fabricante da máquina Servspark.

Figura 9 – Imagem do painel de controle da máquina de EDM.



Fonte: o próprio autor.

O ajuste ocorre durante os primeiros processos de usinagem observando-se as luzes do erosímetro. O fabricante da máquina informa no manual da Servspark que o valor 1,5 ajustado no botão de controle do Tempo de pausa ( $T_{OFF}$ ) corresponde a 15% do valor do Tempo de pulso ( $T_{ON}$ ), logo para esta pesquisa o valor de  $T_{OFF}$  foi  $75 \mu s$  ( $500 \times 0,15$ ).

#### 4.5. Preparação das amostras para ensaios e análises

Após a usinagem por EDM, as amostras foram submetidas a uma limpeza ultrassônica com o objetivo de remover detritos da superfície, gerados pelo processo de usinagem. Em seguida, as amostras foram preparadas por técnicas metalográficas, que consistem no embutimento de uma das metades das amostras bipartidas com resina epóxi termo endurecedora. Esta resina possui baixa contração e boa aderência para minimizar o abaulamento e preservar as bordas, evitando o desprendimento da camada refundida durante a preparação metalográfica da amostra. Após embutimento as amostras foram lixadas com lixas de 180, 220, 360, 400, 500, 600 e 1200 mesh, na sequência. Depois elas foram polidas com pasta diamantada, de 3 e 1  $\mu\text{m}$  em politrizes manuais, antes do ataque químico com o reagente nital 3% (3 ml de ácido nítrico –  $\text{HNO}_3$  – e 98 ml de álcool etílico) para possibilitar a visualização das camadas subsuperficiais. As imagens das camadas foram obtidas por microscópio óptico Fortel por meio de câmera digital acoplada. A microdureza Vickers das camadas refundida e intermediária, e ainda, do material base foram mensuradas com auxílio de microdurômetro Shimadzu modelo HMV-2TE com capacidade de carga variando de 10 a 100 gf. Para o ensaio, utilizou-se a carga de 25 gf por 15 segundos de tempo de permanência. As endentações foram realizadas na seção transversal das amostras, em conjunto de cinco e espaçadas igualmente em torno de 20  $\mu\text{m}$ , partindo da superfície para o interior da amostra. Um perfil de dureza, com o objetivo de acompanhar o decréscimo ao se afastar da superfície, também foi realizado. Um microscópio óptico incorporado ao microdurômetro captura as imagens, com o auxílio da câmera digital integrada, com o uso do *software Easy Test* HMV-AD.

A amostra utilizada para análise de DRX foi limpa com álcool por meio de aparelho de ultrassom por 15 minutos. A difração de raios-x convencional, Bragg-Brentano ou  $\theta$ - $2\theta$  foi usada para detectar a possível presença de boretos de ferro na superfície usinada.

A Tabela 3 relaciona os parâmetros de varredura utilizados nesse ensaio.

Tabela 3 – Parâmetros usados no ensaio de difração de raios-x.

<b>PARÂMETRO</b>	<b>ESPECIFICAÇÃO</b>
Radiação	CuK $\alpha$
Tensão	40 kV
Corrente	30 mA
Tipo de varredura	$\theta - 2\theta$
Ângulo inicial de varredura ( $2\theta$ )	20°
Ângulo final de varredura ( $2\theta$ )	120°
Modo de varredura	Tempo fixo
Passo de amostragem	0,04°
Tempo de varredura por ponto	1 s

Fonte: o próprio autor.

Imagens de Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) da seção transversal das amostras bipartidas foram obtidas, com objetivo de auxiliar na avaliação da espessura das camadas subsuperficiais. Foram realizadas análises de Espectroscopia por Energia Dispersiva (*EDS – Energy Dispersive Spectroscopy*), com o objetivo de detectar a presença do elemento químico boro nas camadas refundida e intermediária na região da seção transversal das amostras. O equipamento SSX-150 da fabricante Shimadzu foi utilizado nas análises de EDS e captura das imagens de MEV.

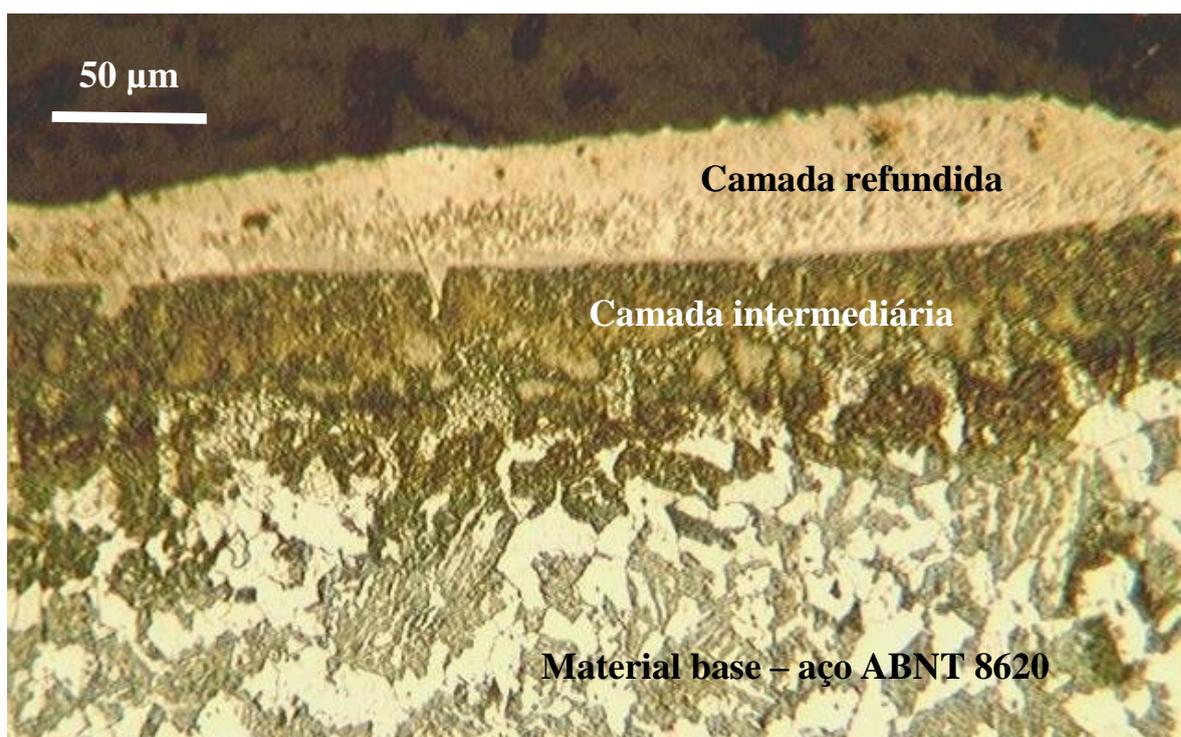
## 5. RESULTADOS

Este capítulo apresenta os resultados obtidos do processo de usinagem por descargas elétricas por penetração do aço ABNT 8620 aplicando solução aquosa contendo octaborato de sódio e as discussões dos mesmos.

### 5.1. Avaliação camadas subsuperficiais

A Figura 10 ilustra imagem de microscopia óptica da seção transversal da amostra usinada por EDM com eletrodo ferramenta de cobre eletrolítico.

Figura 10 – Imagem de microscopia óptica da seção transversal da amostra. Ataque Nital 3%.



Fonte: o próprio autor.

Observa-se na imagem que as camadas refundidas e intermediária se destacam na superfície usinada do material base, o aço ABNT 8620. Resultados semelhantes foram obtidos por Santos et al (2016) e Silva (2020), quando aplicaram o processo de EDM para nitretar a superfície dos aços ABNT 4140 e H13, respectivamente. Nota-se uma uniformidade da camada intermediária que foi obtida devido aos ajustes dos parâmetros no painel da máquina. Tais parâmetros

possibilitaram o funcionamento estável, que foi observado através do erosímetro do painel de controle da máquina durante o processo de usinagem combinado com o tratamento por plasma eletrolítico.

A Tabela 4 relaciona os valores médios das espessuras das camadas refundida e intermediária.

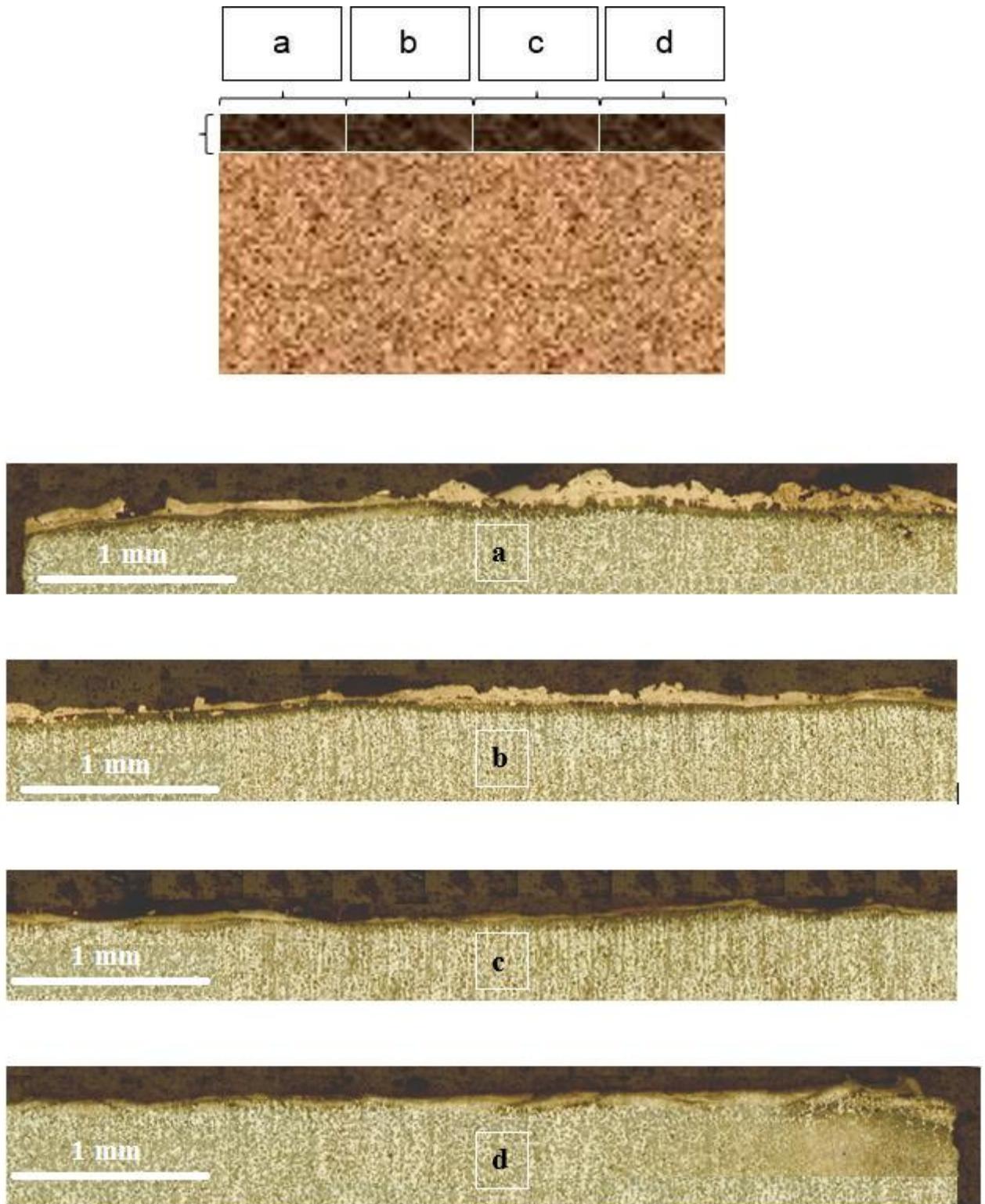
Tabela 4 – Valores médios das espessuras das camadas refundida e intermediária.

<b>Região</b>	<b>Camada intermediária</b>	<b>Camada refundida</b>
<b>Espessura – valor médio ± Desvio Padrão (µm)</b>	31 ± 6	35 ± 20

Fonte: o próprio autor.

A camada refundida apresenta valor médio de espessura de 35 µm com desvio padrão de 20 µm, devido ao fato da alta dispersão dos valores mínimos e máximos das espessuras encontradas que variaram de 0 a 82 µm, respectivamente. O valor 0 µm se deve ao fato da camada refundida sofrer o deslocamento em alguns trechos, mesmo aplicando a resina termo endurecida no processo de embutimento e o pré corte longitudinal tornando as amostras bipartidas. Uma explicação para este fato se deve às tensões térmicas que surgem na camada refundida devido ao choque térmico sofrido pela mesma. Já a camada intermediária apresentou valor médio de 31 µm na espessura com desvio padrão de 6 µm mantendo-se uniforme ao longo da seção transversal da amostra usinada com octaborato de sódio, isso pode ser observado em detalhes na Figura 11.

Figura 11 – Imagem de microscopia óptica da seção transversal da superfície usinada da amostra embutida com 4 regiões (a, b, c, d) em destaque. Ataque Nital 3%.



Fonte: o próprio autor.

## 5.2. Mensuração da microdureza Vickers das camadas refundida e intermediária

A Tabela 5 relaciona o resultado de microdureza Vickers, com carga de 25 gf a 15 segundos de tempo de permanência, das camadas refundida e intermediária da seção transversal da amostra usinada por EDM com eletrodo ferramenta de cobre eletrolítico em solução aquosa contendo octaborato de sódio, e também do material base, o aço ABNT 8620.

Tabela 5 – Microdureza Vickers do aço ABNT 8620: camadas refundida e intermediária.

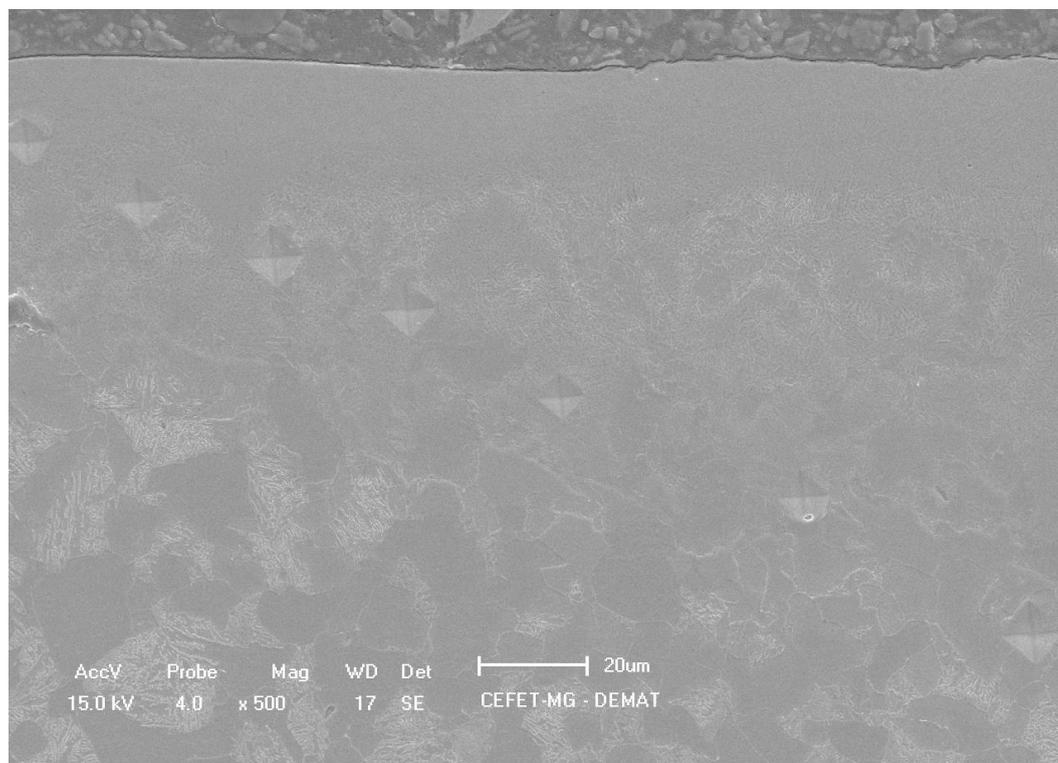
	<b>Material base Aço ABNT 8620</b>	<b>Camada intermediária</b>	<b>Camada refundida</b>
<b>Dureza (HV) ± Desvio Padrão</b>	250 ± 15	585 ± 17	633 ± 38
<b>Aumento percentual no valor de HV</b>		134%	153%

Fonte: o próprio autor.

Observa-se o aumento nos valores médios de microdureza com ganhos percentuais de 134% e 153% nas camadas intermediária e refundida, respectivamente. De acordo com Ghanem et al (2002) o aumento no valor da dureza da camada refundida provém das mudanças metalúrgicas, propiciado pelo aquecimento, seguido do resfriamento brusco provocado pelo fluido, neste caso, a solução aquosa usada no processo. Já o aumento no valor da microdureza na camada intermediária foi possível, provavelmente, devido à implantação do elemento boro, decomposto do ácido bórico, convertido do octaborato dissódico tetra hidratado, implantado na superfície pelo mecanismo gerado pelo canal de plasma eletrolítico. Segundo Gunes et al (2013) o ganho no valor de dureza na camada boreta pode ser atribuído às fases FeB e Fe<sub>2</sub>B que se formam durante o processo de boretação dos aços.

A Figura 12 ilustra imagem de MEV da seção transversal da amostra usinada por EDM. Pode-se observar o perfil de dureza, demonstrado pelas indentações, com o objetivo de acompanhar o decréscimo no valor da microdureza Vickers ao se afastar da superfície.

Figura 12 – Imagem de MEV da seção transversal da amostra ilustrando as endentações produzidas pelo ensaio de microdureza Vickers.



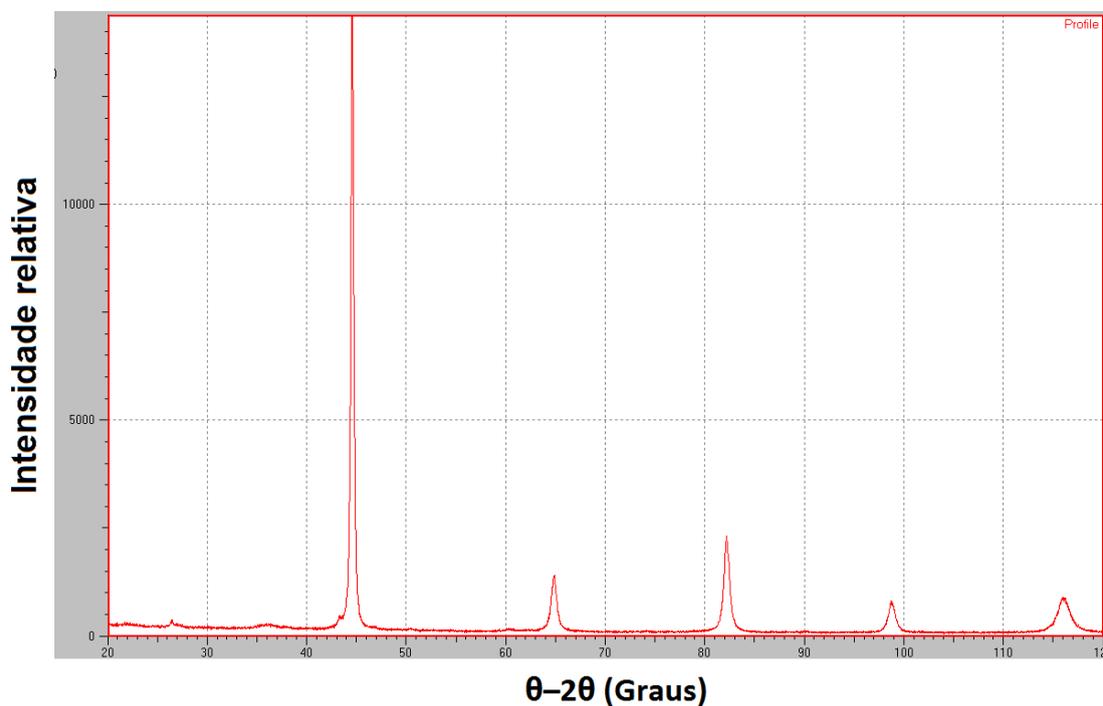
Fonte: o próprio autor.

Observa-se a diferença entre o tamanho das indentações obtidas no ensaio de microdureza com destaque para as duas indentações no metal base, cujo tamanho é maior que o das demais, nas camadas refundidas e intermediária. Essa variação no tamanho das endentações foi observada também por Lou et al (2009), como resultado do processo de boretação. O aumento no valor da dureza está relacionado com a camada boretada que se formou, observado por Ulutan et al (2010), em sua pesquisa.

### 5.3. Avaliação da presença das fases FeB e Fe<sub>2</sub>B e do elemento boro

A Figura 13 ilustra o difratograma de raios-x obtido na superfície da amostra de aço ABNT 8620 usinada por descargas elétricas com fluido formado por octaborato de sódio diluído em água deionizada. O cobre eletrolítico foi utilizado como eletrodo ferramenta.

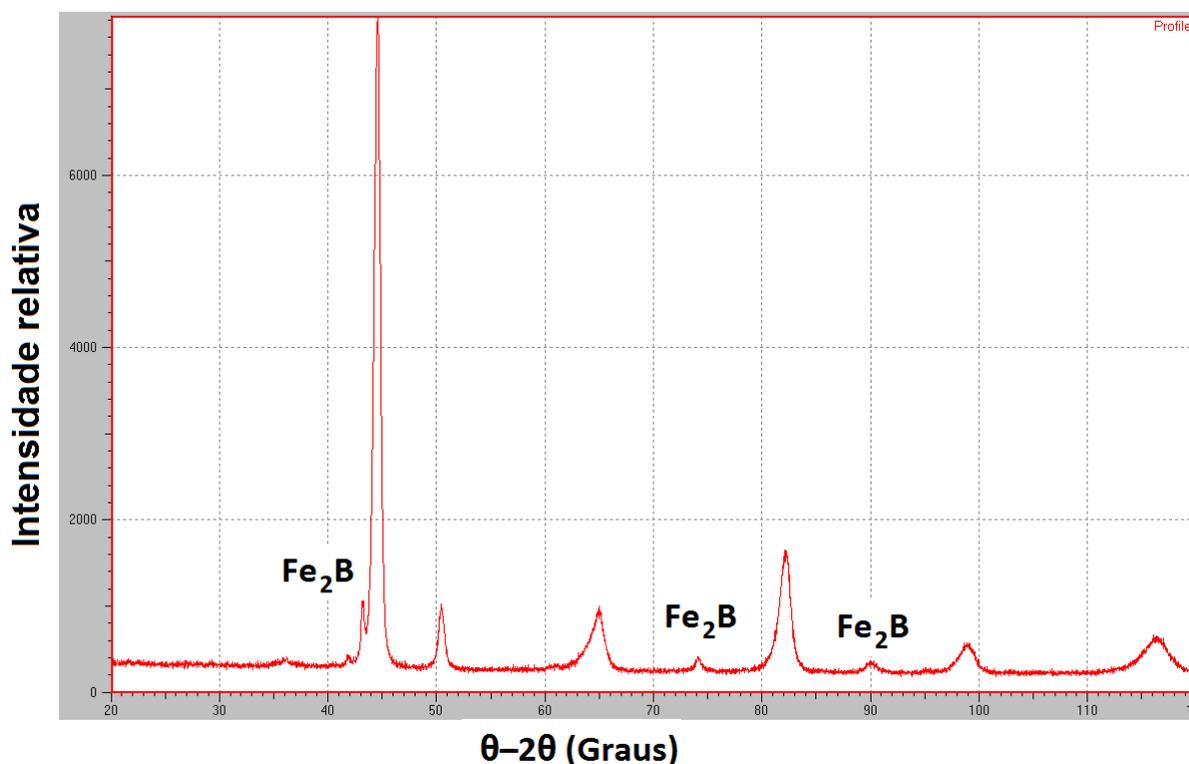
Figura 13 – Difratogramas de raios-x da superfície da amostra do aço ABNT 8620 usinada por EDM com solução aquosa contendo octaborato de sódio.



Fonte: o próprio autor.

A Figura 14 ilustra o difratograma de raios-x da superfície do aço ABNT 8620 como referência, a título de comparação com a amostra usinada por EDM.

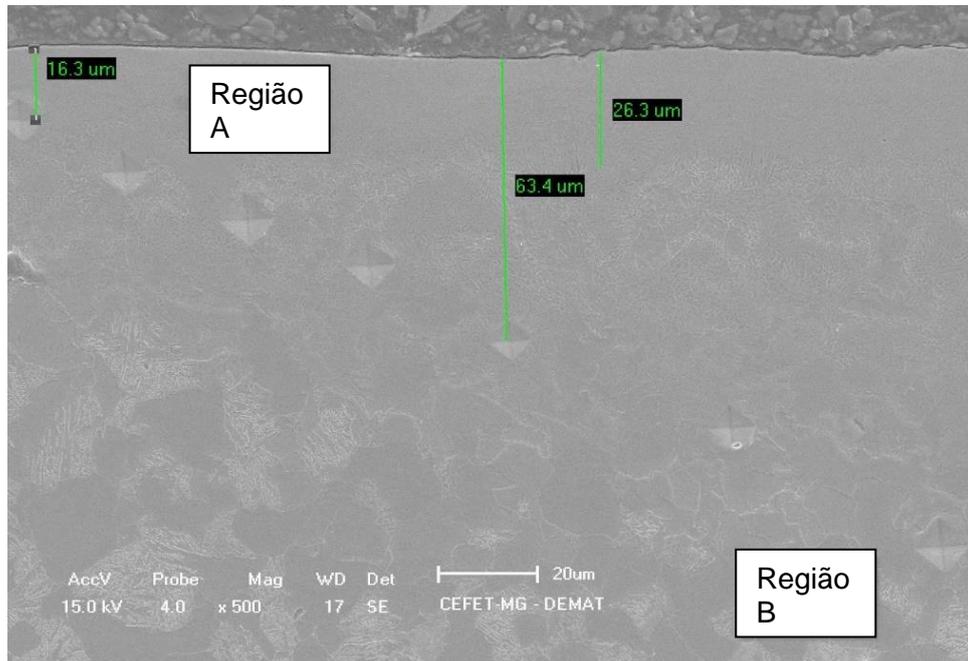
Figura 14 – Difratograma de raios-x da amostra do aço ABNT 8620 referência.



No difratograma da amostra usinada por descargas elétricas é possível observar os picos de boreto de ferro formados, em relação ao aço ABNT 8620 de referência, semelhantes aos observados por Gunes et al (2013) em sua pesquisa. Segundo Kayali camada boretada é formada pelos boretos de ferro das fases FeB e Fe<sub>2</sub>B . O mecanismo de colisão dos íons e elétrons causa ruptura da solução aquosa, com energia suficiente para decompor os constituintes presentes na mistura (água deionizada e octaborato de sódio) e possibilitar a implantação do boro por meio do canal de plasma. Segundo Yao et al (2016), o formato dos picos alongados, observados no difratograma, caracterizando a presença dos boretos.

A Figura 15 ilustra imagem obtida por meio de MEV com destaque para a Região A, na subsuperfície (camada refundida) e Região B, no material base, onde foram realizadas as análises de Espectroscopia de raios-x por dispersão em energia (EDS).

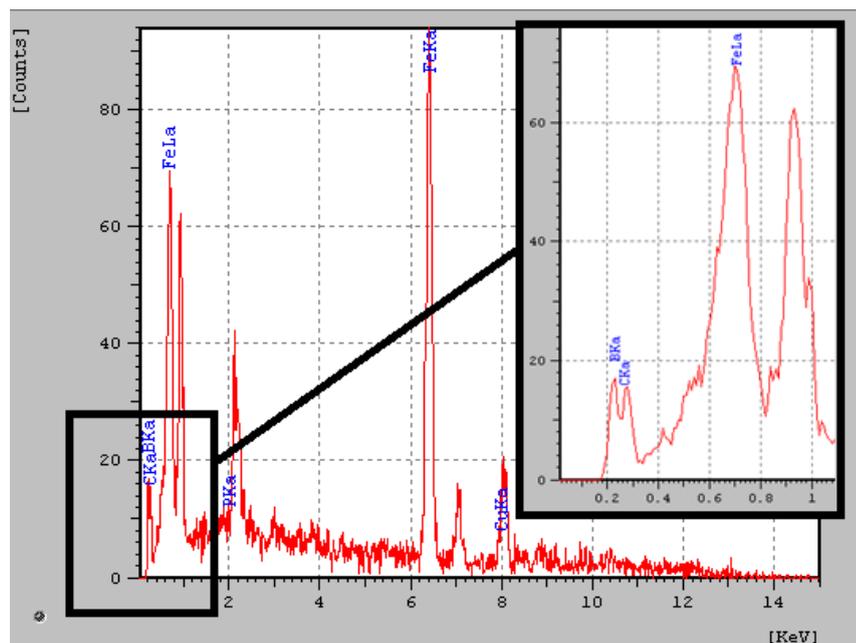
Figura 15 – Imagem de MEV da seção transversal da amostra usinada. Região A (camada refundida) e B (Material base) onde foram realizadas as análises EDS.



Fonte: o próprio autor.

A Figura 16 apresenta o gráfico do espectro de EDS da Região A (camada refundida) indicada na imagem de MEV da Figura 15.

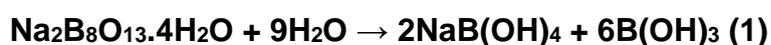
Figura 16 – Gráfico do espectro de EDS na Região A, indicada na imagem de MEV da Figura 15. Em destaque o trecho ampliado, indicado pelo retângulo.



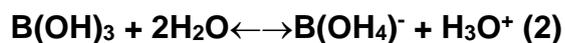
Fonte: o próprio autor.

O elemento químico boro, foi detectado pela análise na superfície do aço ABNT 8620, devido a identificação do pico de boro no gráfico do espectro de EDS, semelhante ao observado por Joshi e Hosmani (2014), em seu trabalho de pesquisa. O processo de boretação por eletroerosão em máquina de EDM é possível, semelhante ao que foi observado por dos Santos et al (2017), ao utilizar o equipamento para nitretar o aço ABNT 4140.

O octaborato de sódio se converte em ácido bórico quando dissolvido em água de acordo com a Equação (1):

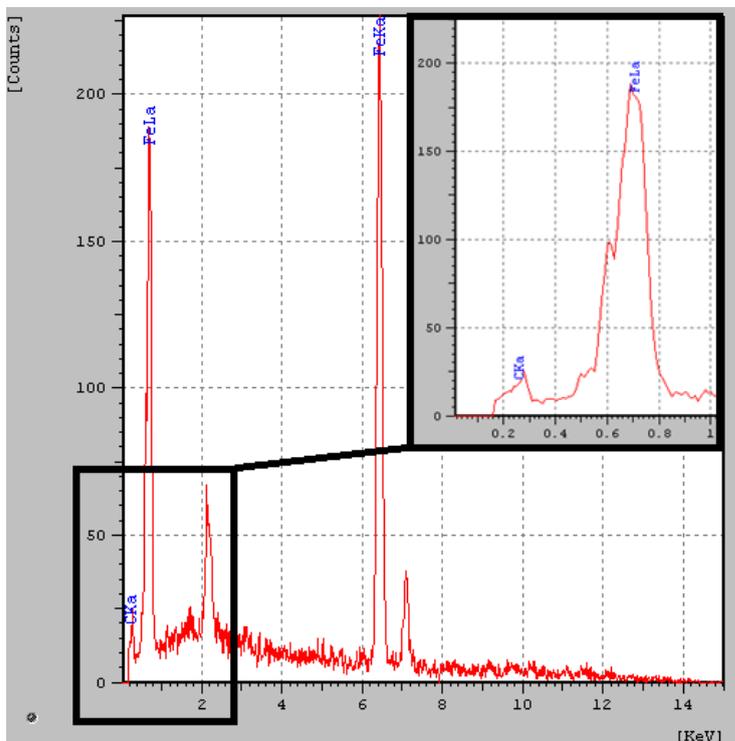


Nas soluções aquosas de octaborato de sódio estabelece-se equilíbrio químico onde o ácido bórico se liga às hidroxilas provenientes da auto-ionização das moléculas de água. O equilíbrio pode ser descrito segundo a Equação (2):



O elemento químico boro se decompõe no canal de plasma para implantar-se na superfície do aço ABNT 8620. A Figura 17 apresenta o gráfico do espectro de EDS da região B (material base) indicada na imagem de MEV da Figura 15.

Figura 17 – Gráfico do espectro de EDS na Região B, indicada na imagem de MEV da Figura 15. Em destaque o trecho ampliado, indicado pelo retângulo.



Fonte: o próprio autor.

Nota-se no gráfico do espectro de EDS ilustrado na Figura 17 que não surgiu o pico de boro. Por se tratar do espectro da região B, destacada na Figura 15, material base, o aço ABNT 8620, que não contém esse elemento químico em sua liga. A modificação superficial do aço ABNT 8620 por meio de máquina de eletroerosão por penetração foi possível, devido à reação química do aço com o elemento químico boro, decomposto do octaborato de sódio na água deionizada, semelhante ao observado por Yan et al (2005) quando aplicou o processo de nitreção por descargas elétricas utilizando ureia decomposta em água destilada.

## 6. CONCLUSÕES

O procedimento experimental adotado nesse trabalho de pesquisa possibilitou a formação de uma superfície boretada no aço ABNT 8620 por meio do processo de eletroerosão, utilizando máquina de usinagem por descargas elétricas, por penetração convencional.

As camadas refundida e intermediária foram observadas por meio de imagens de microscopia ópticas, com destaque para a uniformidade da camada intermediária que se diferencia da camada refundida que desprende da superfície da amostra.

As camadas subsuperficiais formadas na superfície da amostra apresentaram espessuras de  $31 \pm 6 \mu\text{m}$  e  $35 \pm 20 \mu\text{m}$  nas camadas intermediária e refundida, respectivamente.

Ocorreram ganhos nos valores de microdureza, de 134% e 153% nas camadas intermediária e refundida, respectivamente, em relação ao material base.

A técnica de difração de raio-x detectou a presença de boretos de ferro na forma da fase  $\text{Fe}_2\text{B}$ , observada no difratograma.

O octaborato de sódio diluído em água deionizada alimentou o canal de plasma com o elemento químico boro, que foi detectado por meio do espectro de EDS obtido por MEV, realizado na camada boretada, observada na seção transversal do aço ABNT 8620 usinada por EDM.

## 7. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- Investigar o desempenho do aço ABNT 8620 usinado por EDM com solução aquosa contendo octaborato de sódio e utilizando sistema tribológico como pino sobre disco.
- Avaliar a resistência a fadiga do aço ABNT 8620 usinado por plasma eletrolítico com solução aquosa contendo octaborato de sódio.
- Realizar comparativo entre as propriedades tribológicas do aço ABNT 8620 usinado por EDM com solução aquosa contendo octaborato de sódio contra boretação convencional.
- Realizar estudos utilizando outras fontes de boro e/ou aditivos.

## REFERÊNCIAS

- ALVES, JR; RODRIGUES, JA. Nitretação dos aços assistida por plasma. *Metalurgia, ABM*, v. 47, n 398, 1991.
- AMORIM, FL; TORRES, RD; LAURINDO, CAH; REOLON, LW. Performance and Surface Integrity of Wire Electrical Discharge Machining of Thin Ti6Al4v Plate Using Coated and Uncoated Wires. *Materials Research*. v. 22, n. 3, 2019.
- AN, J; Li, C; Wen, Z; Yang, YL; Sun, SJ. A study of boronizing of steel AISI 8620 for sucker rods. *Metal Science and Heat Treatment* 53, (11–12), 2012.
- BARBALHO, Eduardo de Castro. Efeitos da adição do SiC ao fluido dielétrico na camada nitretada do aço AISI 4140 após nitretação por PMEDM/ Eduardo de Castro Barbalho, 2021.
- BENEDICT, G. F. *Nontraditional Manufacturing Processes*. New York: Marcel Dekker, 1987.
- BRIGGS, M. Óxidos de boro, ácido bórico e boratos. *Enciclopédia Kirk-Othmer de Tecnologia Química*. doi:10.1002/0471238961.0215181519130920.a01., 2011.
- CAMARGO, BC; Costa, HL; Raslan, AA. 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.
- CHAPMAN, B. *Glow Discharge Processes – Sputtering and plasma etching*. Canada: John Wiley & Sons, Inc, 1980.
- EL-HOFY, H. A. *Advanced Machining Processes: Nontraditional and Hybrid Machining Processes*. Reino Unido: McGraw Hill LLC, 2005.
- ELIAS, Cristiano. Nitretação por descargas elétricas no aço ABNT 4340 com pó de carbeto de silício adicionado ao fluido dielétrico/ Cristiano Elias, 2019.
- ELIAS, L; ELIAS, C; BATISTA, BER; SILVA, ER. Nitretação por descargas elétricas do ferro fundido nodular. *Revista Perspectivas da Ciência e Tecnologia* 11, 141-154, 2019.
- FERNANDES, Laura de Sousa Ramos. Nitretação por descargas elétricas da liga alumínio-silício / Laura de Sousa Ramos Fernandes, 2020.
- FRIDMAN, A. *Plasma Chemistry*. New York: Cambridge University Press, 2008.
- GHANEM, F; Braham, C; Fitzpatrick, ME; Sidhom H. Effect of near-surface residual stress and microstructure modification from machining on the fatigue endurance of a tool steel. *J Mater Eng Perform*, 11 631–639, 2002.

GUITRAU, E. B. *The Electrical Discharge Machining Handbook*. Cincinnati, USA: Hanser Gardner Publications, 1997. 306p.

GUNES, I. Wear Behaviour of Plasma Paste Boronized of AISI 8620 Steel with Borax and B<sub>2</sub>O<sub>3</sub> Paste Mixtures. *Journal of Materials Science and Technology* 29(7), 662- 668, 2013.

GUNES, I; TAKTAK, S; BINDAL, C; YALCIN, Y; ULKER, S; KAYALI, Y. Investigation of diffusion kinetics of plasma paste borided AISI 8620 steel using a mixture of B<sub>2</sub>O<sub>3</sub> paste and B<sub>4</sub>C/SiC. *Sadhana* 38 (3), 513–526, 2013a.

GUNES, I; ULKER, S; TAKTAK, S. Kinetics of Plasma Paste Boronized AISI 8620 Steel in Borax Paste Mixtures<sup>1</sup>. *Protection of Metals and Physical Chemistry of Surfaces*, 49 (5), 567–573, 2013b.

GUPTA, P; TENHUNDFELD, G; DAIGLE, EO; RYABKOV, D. Electrolytic plasma technology: Science and engineering—An overview. *Surface & Coatings Technology*, v. 201, p. 8746–8760, 2007.

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

JOSHI, A. A.; Hosmani S.S. Pack-boronizing of AISI 4140 Steel: Boronizing mechanism and the role of container design. *Mater Manuf Process*, 29(9), 1062–1072, 2014.

JUMBAD, VR; Chel, A; Verma, U; Kaushik, G. Application of Electrolytic Plasma Process in Surface Improvement of Metals: A Review. *Letters in Applied NanoBioScience*, v. 9, n. 3, p. 1249 – 1262, 2020.

KAYALI, Yusuf. Investigation of diffusion kinetics of borided AISI P20 steel in microwave furnace, 2015.

KHALAF, MK; Chiad, BT; Al-Zubaydi, TL; Alani, ZT. Surface Modification of Ti-6Al- 4V Alloy by Glow Discharge-Plasma Nitriding. *Iraqi Journal of Physics*, v. 9, n.16, p. 34-40, 2011.

KAOUKA, A., O. Allaoui e M. Keddam. *Matériaux & Techniques*, 101 7 (2013) 705. Publicado online: 21 de fevereiro de 2014. DOI: 10.1051/mattech/2014003., 2013.

KULKA, M. Trends in thermochemical techniques of boriding, *Current Trends in Boriding*, Engineering Materials, Springer, Cham, Switzerland (2019), pp. 17-98., 2019.

KUMAR, S; Singh, R; Singh, TP; Sethi, BL. Surface modification by electrical discharge machining: A review. *Journal of Materials Processing Technology*, v. 209, n. 8, p. 3675-3687, 2009.

LIMA, Victor Souza Esteves. Nitretação por descargas elétricas do aço AISI 4340 de forma a uniformizar a camada nitretada / Victor Souza Esteves Lima, 2018.

LOU, DC; Solberg, JK; Akselsen, OM; Dahl, N. Microstructure and property investigation of paste boronized pure nickel and Nimonic 90 superalloy. *Mater Chem Phys*, 115(1), 239–244, 2009.

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.

MEHTA, MG; PATEL, NK. Temperature and Thermal Stress Analysis of Electrical Discharge Machining - A Review. *International Journal of Engineering Research & Technology*, v. 3, p. 1691-1697, 2014.

MURTA, Rafael Morais Ataíde. Avaliação da camada nitretada por descargas elétricas na liga de titânio Ti-6Al-4V / Rafael Morais Ataíde Murta, 2017.

NASCIMENTO NETO, Eneas Ramos. Utilização de plasma na remoção de óleo da superfície de alumínio / Eneas Ramos Nascimento Neto – Campinas, SP, 2006.

NICESIO, Isa Carla. Nitretação por descargas elétricas do aço AISI 4140 utilizando diferentes categorias de ureia / Isa Carla Nicesio, 2017.

NOVAKOVA, A. A., Sizov, I. G., Golubok, D. S., Kiseleva, T. Y., & Revokatov, P. O. Electron-beam boriding of low-carbon steel. *Journal of Alloys and Compounds*, 383(1-2), 108–112. doi:10.1016/j.jallcom.2004.04.017, 2004.

OLIVEIRA, Lucas Ferreira Barbosa e. Ativação da Superfície da liga Ti-6Al-4V através de Eletroerosão / Lucas Ferreira Barbosa e Oliveira, 2019.

ÖZERKAN, H.B. Usinagem simultânea e liga superficial do aço AISI 1040 por usinagem por eletroerosão com pós de óxido de boro. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 32(9), 4357–4364. doi:10.1007/s12206-018-0834-0, 2018.

QUIRINO, Cid Clay Aparecido. Avaliação da microestrutura e propriedades mecânicas dos aços ABNT 4140 e H13 após processo de nitretação por descarga elétrica / Cid Clay Aparecido Quirino. Belo Horizonte, 2017.

RASLAN, AA. 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, Roberta Nunes Nery dos. Nitretação por EDM da liga Ti-6Al-4V com adição de carbeto de silício em pó / Roberta Nunes Nery dos Santos, 2019.

SANTOS, RF; SILVA, ER; SALES, WF; RASLAN, AA Influence of the Electrode Material on the Nitriding of Medium Carbon Steel Using Sink Electrical Discharge Machining, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 90, 2002-2007, 2017b.

SANTOS, RF; SILVA, ER; SALES, WF; RASLAN, AA. 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, RF; SILVA, ER; SALES, WF; RASLAN, AA. 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.

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

ŞEŞEN, FE; Özgen, ÖS; Şeşen, MK. A Study on Boronizing Kinetics of an Interstitial- Free Steel. *Materials Performance and Characterization*, in: *ASTM International* 6 (4), 492-509, 2017.

SILVA, IC; Jiménez, MF; Bárcenas, DB; Ramírez, HB; Adame; JA; Trinidad, JM; Campaña, JAM. Evolution of boride layers during a diffusion annealing process. *Surface and Coatings Technology* 309, 155-163, 2017.

SILVA, JZ; Keddam, M; Domínguez, MO; Espinosa, MCE; Sodi, FC; Peña, JO; Dios, LDF; Vargas, OAG. Kinetics of Formation of Fe<sub>2</sub> B Layers on AISI S1 Steel. *Materials Research* 21(5), 01-10, 2018.

SILVA, SP; Abrão, AM; Silva. ER; Camara, MA. Surface modification of AISI H13 steel by die-sinking electrical discharge machining and TiAlN coating: A promising hybrid technique to improve wear resistance. *Wear* 462-463, 01-12, 2020a.

SILVA, SP; ABRÃO, AM; WEIDLER, PG; SILVA, ER; CÂMARA, MA. 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, SS. 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.

PEDROSO DA SILVA, S., Abrão, A. M., Rodrigues da Silva, E., & Câmara, M. A. Surface modification of AISI H13 steel by die-sinking electrical discharge machining and TiAlN coating: A promising hybrid technique to improve wear resistance. *Wear*, 203509. doi:10.1016/j.wear.2020.203509, 2020.

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

STEVENS, L. Improvement of Surface Quality in Die Sinking EDM. 1988. 181f. Tese de Doutorado – Department of Mechanical Engineering, K. U. Leuven, Belgium, 1988.

TABUR, M; Izciler, M; Gul, F; Karacan, I. Abrasive wear behavior of boronized AISI 8620 steel. *Wear* 266, 1106–1112, 2009.

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

TÜRKMEN, İ; Yalamaç, E; Keddari, M. Investigation of tribological behaviour and diffusion model of Fe<sub>2</sub>B layer formed by pack-boriding on SAE 1020 steel. *Surface & Coatings Technology* 377, 01-12, 2019.

ULUTAN, M; Celik, ON; Gasan, H; Er, U. Effect of different surface treatment methods on the friction and wear behavior of AISI 4140 steel. *J Mater Sci Technol* 26(3), 251–257, 2010.

USLU, I., Comert, H., Ipek, M., Ozdemir, O., & Bindal, C. Avaliação dos boretos formados no aço AISI P20. *Materiais e Design*, 28(1), 55– 61. doi:10.1016/j.matdes.2005.06.013., 2007.

YAN, BH; Tsai, HC; Huang, FY. The effect in EDM of a dielectric of a urea solution in water on modifying the surface of titanium. *International Journal of Machine Tools & Manufacture* 45, 194–200, 2005.

YAO, Q; Sun, J; Fu, Y; Tong, W; Zhang, H. An evaluation of a borided layer formed on Ti-6Al-4V alloy by means of SMAT and low-temperature boriding. *Materials (Basel)*, 9 (12), 2016.

YONG-AK SONG, Wilfried Koenig. Experimental Study of the Basic Process Mechanism for Direct Selective Laser Sintering of Low-Melting Metallic Powder, *CIRP Annals*, Volume 46, Issue 1, 1997, Pages 127-130, ISSN 0007-8506, [https://doi.org/10.1016/S0007-8506\(07\)60790-2.](https://doi.org/10.1016/S0007-8506(07)60790-2.), 1997.

ZAGONEL, L. F. C.A. Figueroa, R. Droppa, F. Alvarez. Influence of the process temperature on the steel microstructure and hardening in pulsed plasma nitriding, *Surface and Coatings Technology*, Volume 201, Issues 1–2, 2006, Pages 452-457, ISSN 0257-8972, <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2005.11.137.>, 2006.