

*Artigo Científico*

## ESTUDO DA APLICAÇÃO DO OCTABORATO DE SÓDIO COMO FONTE DE BORO NO TRATAMENTO TERMOQUÍMICO DE BORETAÇÃO POR ELETROEROSÃO NO AÇO ABNT 8620

**Study of the Application of Sodium Octaborate as a Boron Source in the Thermochemical Treatment of Boriding by EDM process in AISI 8620 Steel**

**Claudinei Alfredo do Nascimento<sup>1\*</sup>, Daniel de Moraes Lima<sup>1</sup>, Sinval Pedroso da Silva<sup>3</sup>, Bárbara Ellen Rodrigues Batista<sup>2</sup>, Ernane Rodrigues da Silva<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, Belo Horizonte, Minas Gerais, Brasil.

<sup>2</sup>Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais, Belo Horizonte, Minas Gerais, Brasil.

<sup>3</sup>Instituto Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, Minas Gerais, Brasil.

Submetido em: 30.11.2021; Aceito em: 22.08.2022; Publicado em: 28.10.2022.

**\*Autor para correspondência:** cadclau@gmail.com

**Resumo:** A boretação é um tratamento termoquímico aplicado 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 eletroerosão por penetração, em superfície do aço ABNT 8620, utilizando uma máquina adaptada. O eletrodo ferramenta utilizado foi o cobre eletrolítico. O octaborato de sódio foi diluído em água deionizada para formar a solução aquosa, aplicada como fluido dielétrico. A camada boretada foi avaliada por meio de microscopia ótica e ensaio de microdureza Vickers. A difusão do boro foi avaliada por difração de raio-x na superfície usinada e por espectroscopia de raios x por dispersão em energia (EDS) em equipamento de Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV). Após aplicação do processo de boretação por eletroerosão foi obtido o ganho de 134 %, aproximadamente, no valor de dureza na camada boretada em relação ao material base. As fases FeB e  $\text{Fe}_2\text{B}$  foram detectadas nos difratogramas de raio-x, bem como, a difusão do elemento boro observada por meio de EDS na seção transversal da peça próximo da subsuperfície.

**Abstract:** Boriding is a thermochemical treatment used in 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 process EDM, by penetration, in AISI 8620 steel surface, using an adapted EDM machine. The tool electrode used was electrolytic copper. Sodium octaborate was diluted in deionized water to form the aqueous solution, which acted as dielectric fluid. The boride layers was evaluated by optical microscopy and Vickers microhardness test. Boron diffusion was evaluated by x-ray diffraction on the machined surface and by energy dispersion x-ray spectroscopy (EDS) in Scanning Electron Microscopy (SEM) equipment. After the application of the EDM process, a gain of 134% was verified, approximately, in the hardness value of the boride layers in relation to the base material. The FeB and  $\text{Fe}_2\text{B}$  phases were detected in the X-ray diffractograms, as well as the diffusion of the boron element observed by means of EDS in the cross section of the piece close to the surface.

**Palavras-chave:** Boretação, aço ABNT 8620, Eletroerosão, Octaborato de boro.

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

## INTRODUÇÃO

De acordo com Türkmen *et al.* (2019) os processos termoquímicos como cementação, nitretação, carbo-nitretação, nitro-cementação e boretção são comumente usados como métodos de endurecimento superficial, para melhorar as propriedades de superfície em materiais ferrosos. 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 boretção 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.

Boretção 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 amostras 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).

De acordo com Raslan (2015) a usinagem por descargas elétricas (EDM – *Electrical Discharge Machning*), popularmente conhecido como eletroerosão é um processo de usinagem não convencional termo elétrico. A fonte de energia tem a sua origem em descargas elétricas geradas por canal de plasma. O plasma 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 adequados 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 a superfície do eletrodo. O efeito combinado de evaporação e fusão de material com turbulência do fluido dielétrico é responsável pela remoção de materiais. Os materiais empregados como eletrodos ferramenta são, normalmente, cobre e grafita. Segundo Santos *et al.* (2017a) o processo de remoção de material ocorre por meio da descarga de energia entre uma ferramenta e o eletrodo da peça, que são separados por uma pequena distância, o *gap*, (de 5 a 100 µm dependendo dos parâmetros elétricos), 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.

No entanto, os íons são mais pesados que os elétrons e a energia cinética resultante depende dos ajustes dos parâmetros no processo (SANTOS *et al.*, 2017b).

O EDM foi proposto inicialmente para o uso em usinagem de materiais condutores elétricos e duros. No entanto, ele ainda pode ser usado como um método adicional para introduzir elementos químicos na superfície da peça usinada. O requisito fundamental para o enriquecimento superficial por eletroerosão é: obter solução aquosa formada com o elemento que deseja-se implantar, íons do elemento são adicionados ao canal de plasma durante o processo. (SANTOS *et al.*, 2017a).

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 & 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 & 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 deseja-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, denominado por eles como NDE ao usinar a liga de titânio Ti6Al4V.

O objetivo deste trabalho de pesquisa foi avaliar a possibilidade de utilizar o octaboreto de sódio como fonte do elemento boro para aplicação do processo de eletroerosão por penetração como modificação superficial por implantação de boro no 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. O processo de boretação, nesse caso, será executado em meio líquido, formado por uma solução aquosa composta por água deionizada mais octaboreto de sódio em pó adicionado.

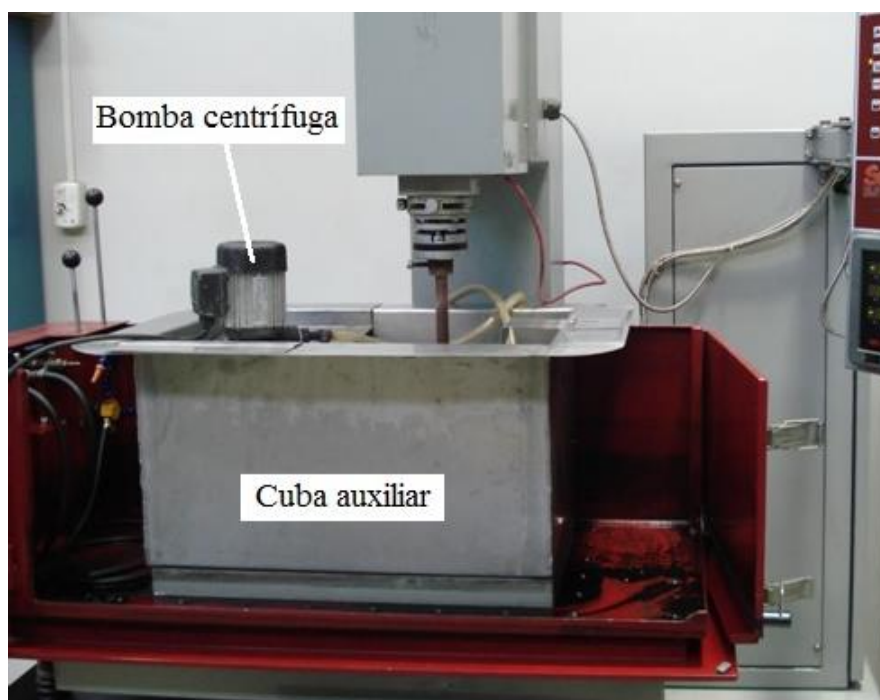
## MATERIAL E MÉTODOS

O trabalho de pesquisa foi executado na máquina de eletroerosão por penetração convencional, Eletroplus – modelo 540/SERVSPARK, adaptada para viabilizar a aplicação do processo de boretação por descargas elétricas. Aplicações idênticas foram executadas por outros pesquisadores (SANTOS *et al.*, 2017a; ELIAS *et al.*, 2019; SILVA *et al.*, 2020a), quando aplicaram procedimento experimental semelhante no processo de nitretação por descargas elétricas.

### Adaptações na máquina de eletroerosão

Uma cuba auxiliar, confeccionada em aço inoxidável austenítico foi posicionada no interior do tanque de trabalho da máquina. A cuba evita a contaminação do fluido dielétrico próprio da máquina, óleo hidrocarboneto, em testes com fluidos aquosos. Segundo Silva *et al.* (2020b) a adaptação da cuba auxiliar ao reservatório da máquina permite ao sistema funcionar em aberto favorecendo a alimentação do fluido dielétrico. Uma bomba centrífuga foi posicionada no interior da cuba auxiliar, com o objetivo de proporcionar a circulação do fluido dielétrico (a solução formada por água deionizada mais octaborato de sódio) por meio de jato, para limpeza da fenda de trabalho através da agitação do fluido dielétrico. A Figura 1 ilustra as adaptações.

**Figura 1.** Imagem da máquina de eletroerosão por penetração adaptada.



### Preparação dos eletrodos peça e ferramenta

As amostras, eletrodos peça, foram confeccionadas em aço ABNT 8620 por meio de torno CNC, com dimensões de 19 mm de diâmetro e 13 mm de comprimento. Cobre eletrolítico, no formato cilíndrico com diâmetro de 22 mm, foi usado com material dos eletrodos ferramenta, usinados em torno convencional com 30 mm de comprimento.

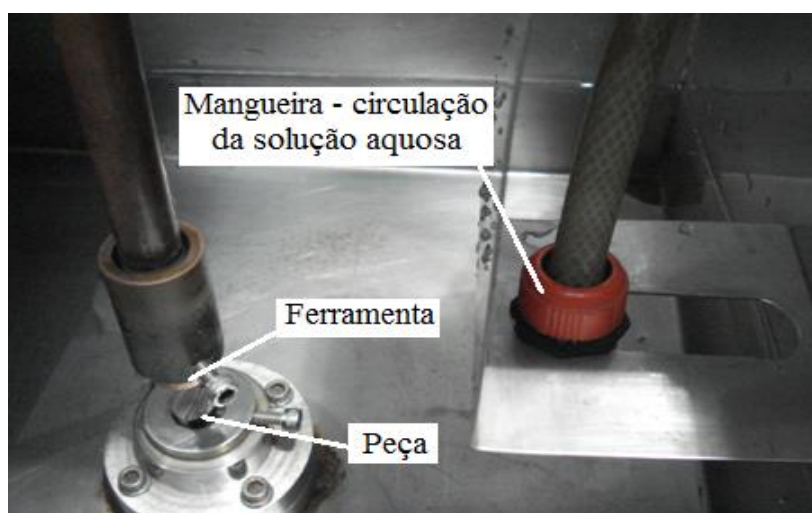
A Tabela 1 apresenta a composição química do aço ABNT 8620, aplicado na pesquisa.

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

Elemento químico	Valores (mínimo – máximo)
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

A Figura 2 apresenta imagem do interior da cuba auxiliar com um eletrodo de cobre fixado na porta ferramenta e uma amostra posicionada no suporte porta amostra. Também é possível visualizar a mangueira usada para agitar a solução aquosa por meio de jato.

**Figura 2.** Imagem do interior da cuba auxiliar com detalhe da montagem dos eletrodos ferramenta e peça, e ainda a mangueira usada para formação do jato.



### Preparação da solução aquosa usada como fluido dielétrico

A solução aquosa utilizada, 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, obtida da água potável com 160  $\mu\text{S}/\text{cm}$  de condutividade elétrica, disponibilizada pela companhia de abastecimento público da região metropolitana. A deionização da água foi possível devido a um aparelho deionizador portátil à base de resina. Após o processo de deionização, foi adicionado um quilograma de Octaborato de sódio ( $\text{Na}_2\text{B}_8\text{O}_{13}\cdot 4\text{H}_2\text{O}$ ), que diluído, formou a solução aquosa na concentração de 16,6 gramas por litro.

Para possibilitar a aplicação da máquina de eletroerosão no processo de boretação por descargas elétricas, alguns ajustes no painel de controle da EDM foram necessários. A Tabela 2 apresenta os parâmetros operacionais ajustados na máquina. A combinação adequada dos ajustes desses parâmetros proporciona um funcionamento estável, que possibilite a aplicação do processo de boretação combinada com a usinagem por descargas elétricas. O tempo de usinagem foi de 20 minutos.

**Tabela 2.** Parâmetros operacionais de EDM usados na boretação por descargas elétricas.

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

A Figura 3 ilustra o painel de controle da máquina. Os parâmetros de IV a VII, destacados na imagem, foram ajustados diretamente nos botões do painel da máquina EDM e suas unidades não são informadas no manual da máquina.

**Figura 3.** Imagem do painel de controle da máquina de EDM para aplicação do processo de boretação por descargas elétricas.



### Preparação das amostras para ensaios e análises

Um aparelho *cutoff* foi utilizado para seccionar as amostras (corpos de prova) preparadas por técnicas metalográficas após a boretação por descargas elétricas. No embutimento das amostras foi utilizada resina epóxi termo endurecedora. Essa resina possui baixa contração e boa aderência para minimizar abaulamento e preservar as bordas, evitando o desprendimento da camada refundida durante a preparação metalográfica da amostra. O reagente Nital 3% (3 ml de ácido nítrico –  $HNO_3$  – e 98 ml de álcool etílico) foi utilizado no ataque químico. As micrografias para avaliações das camadas refundida e intermediária, bem como mensuração da microdureza das mesmas, foram realizadas em microscópio ótico com micrômetro incorporado.

As imagens foram capturadas por meio de câmera digital acoplada aos equipamentos. A microdureza Vickers das camadas refundida e intermediária, e ainda o substrato foram mensuradas com auxílio de um microdurômetro Shimadzu modelo HMV-2T E com capacidade de carga de 10 a 100 gf. Para o ensaio, utilizou-se carga de 25 gf por 15 segundos. As indentações foram realizadas na seção transversal das amostras, em conjunto de cinco e espaçadas igualmente em torno de 20  $\mu\text{m}$ , partindo da sub-superfície para o interior da amostra. Um perfil de dureza, com o objetivo de acompanhar o seu decréscimo ao se afastar da superfície, também foi realizado. Incorporado ao durômetro, há um microscópio ótico software Easy Test HMV-AD que com auxílio de uma câmara digital, integrada ao equipamento, captura imagens.

A presença dos boretos de ferro foi verificada por difração de raios-x (DRX) convencional, Bragg-Brentano ou  $\theta$ - $2\theta$ . A Tabela 3 relaciona os parâmetros de varredura utilizados nessa técnica. Previamente à realização das análises de DRX, as amostras foram limpas com álcool em aparelho de ultrassom por 15 min.

**Tabela 3.** Parâmetros para o ensaio de DRX.

PARÂMETRO	ESPECIFICAÇÃO
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

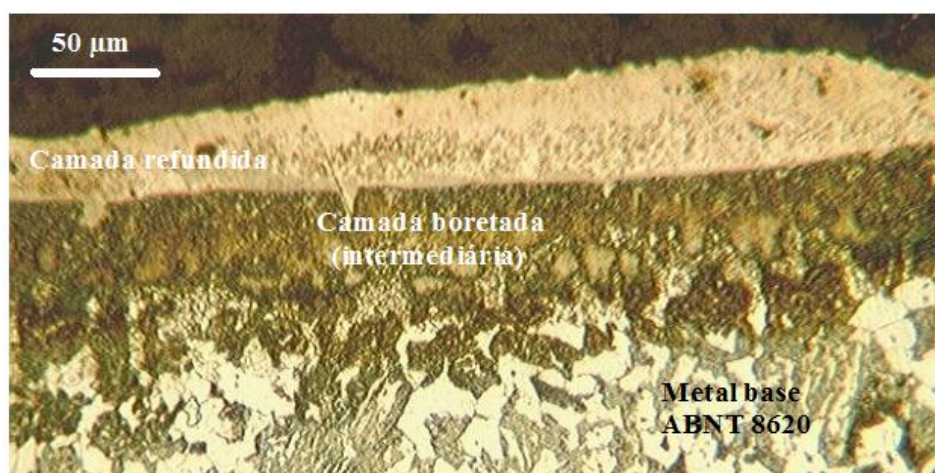
Imagens de Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) da seção transversal foram obtidas, com objetivo de avaliar as camadas. Foi utilizado o equipamento SSX-150 da marca Shimadzu. Análises de espectroscopia por energia dispersiva de raios X (EDS), para detectar a presença do elemento químico boro nas camadas refundida e borexada (intermediária), foram realizadas em regiões da seção transversal das amostras.

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

O primeiro problema que surgiu durante a aplicação do processo de boretação por eletroerosão com solução aquosa composta por octaborato de sódio adicionado à água deionizada foi a alta condutividade da solução. Apesar de utilizar água deionizada, ao adicionar o octaborato de sódio, a fonte de boro, a condutividade da solução atinge valores próximos de 7000  $\mu\text{S}/\text{cm}$ . Este problema já havia sido relatado por outros autores em suas pesquisas.

A Figura 4 ilustra imagem de microscopia ótica da seção transversal da amostra do aço ABNT 8620, borexada por eletroerosão com solução aquosa formada por octaborato de sódio adicionado a água deionizada. O cobre eletrolítico foi utilizado como eletrodo ferramenta.

**Figura 4.** Imagem de microscopia ótica da seção transversal do aço ABNT 8620 boretado por eletroerosão com eletrodo ferramenta de cobre. Ataque nital 3%.



Nota-se na imagem as camadas refundida e intermediária (camada boretada) semelhante ao que foi observado por Santos *et al.* (2016), no processo de nitretação por descargas elétricas. Observa-se uma uniformidade na camada intermediária, que foi obtida devido aos ajustes dos parâmetros de eletroerosão, parâmetros estes que possibilitaram o funcionamento estável do processo de usinagem combinado com o tratamento termoquímico de boretção.

A Tabela 4 apresenta os resultados de microdureza Vickers com carga de 25 gf a 15 segundos das camadas boretada (intermediária) e refundida, medidas na seção transversal da peça usinada com eletrodo ferramenta de cobre e do material de base ABNT 8620.

**Tabela 4.** Valores de microdureza Vickers do material-base (ABNT 8620) e das camadas boretada (intermediária) e refundida com eletrodo ferramenta de cobre.

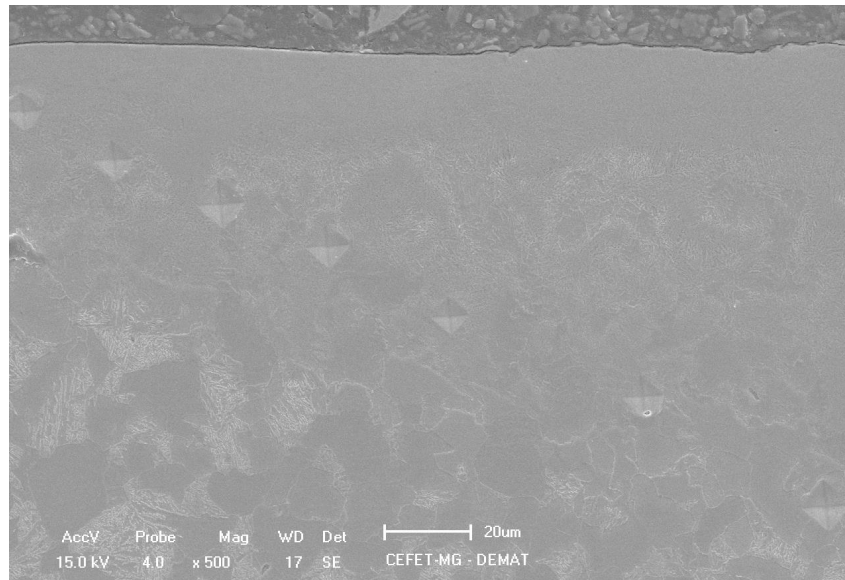
	Material base ABNT 8620	Camada boretada (intermediária)	Camada refundida
Dureza (HV)	250 ± 15	585 ± 17	633 ± 38
Aumento no valor da dureza HV	–	134 %	153 %

Observa-se o aumento de dureza maior que o dobro com ganhos percentuais de 134 % e 153 % na dureza das camadas boretada (intermediária) e refundida, respectivamente. De acordo com Ghanem *et al.* (2002) o aumento de dureza na camada refundida provém das mudanças metalúrgicas propiciado pelo aquecimento seguido do resfriamento brusco pelo fluido dielétrico, ou seja a solução aquosa usada no processo. Já o aumento de dureza proporcionado à camada intermediária foi possível pela difusão do boro, decomposto do ácido bórico, convertido do octaborato de sódio, por implantação iônica. Segundo Gunes *et al.* (2013a) o ganho de dureza na camada boretada pode ser atribuído às fases FeB e Fe<sub>2</sub>B que se formam durante o processo de boretção.

A Figura 5 ilustra imagem de MEV da seção transversal da amostra boretada por eletroerosão. Pode-se observar as endentações produzidas pelo ensaio de micro dureza Vickers.



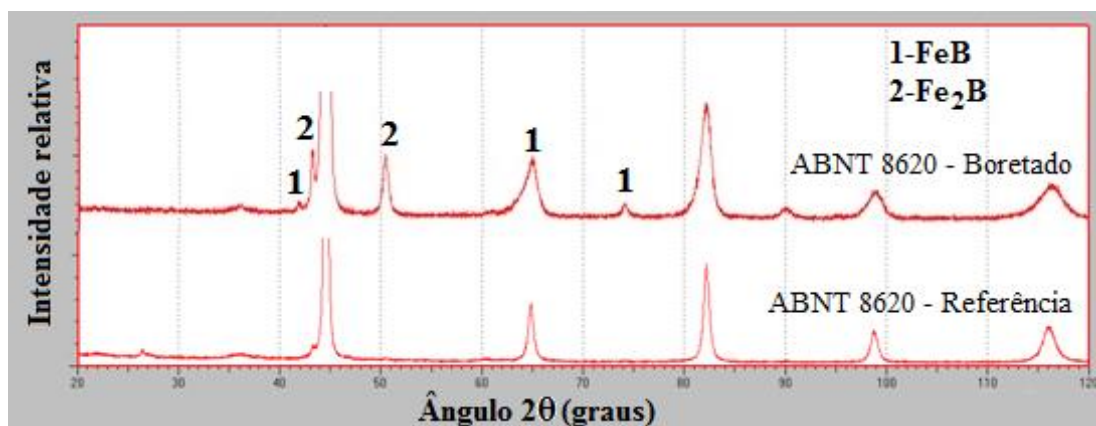
**Figura 5.** Imagem de MEV da seção transversal do aço ABNT 8620 boretado por eletroerosão ilustrando as indentações produzidas por microdureza Vickers.



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

A Figura 6 ilustra os difratogramas de raio-x da superfície da amostra usinada e boretada por eletroerosão e do aço ABNT 8620, como referência, sem tratamento.

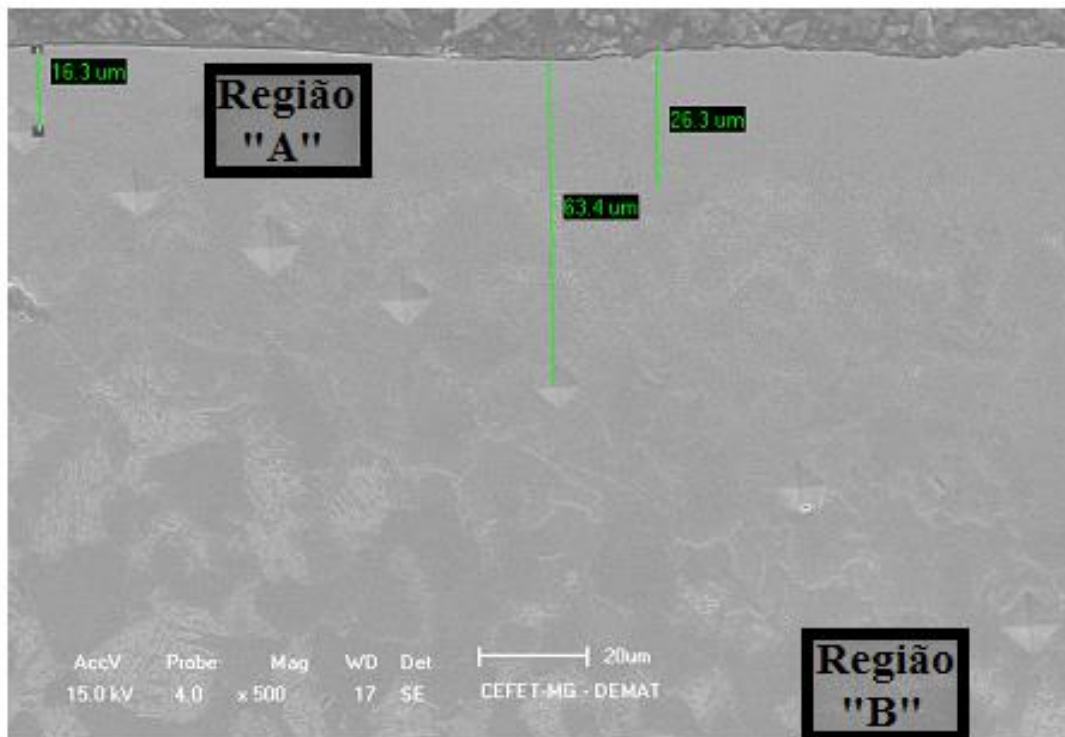
**Figura 6.** Difratogramas de raio-x da superfície da amostra boretada por eletroerosão com eletrodo ferramenta de cobre e do aço ABNT 8620 de referência.



No difratograma da amostra usinada por eletroerosão 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. (2013b) em sua pesquisa. 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. A camada boretada é formada pelos boretos de ferro das fases FeB e Fe<sub>2</sub>B. De acordo Yao *et al.* (2016), o formato dos picos alongados, observados no difratograma, caracterizando a presença dos boretos.

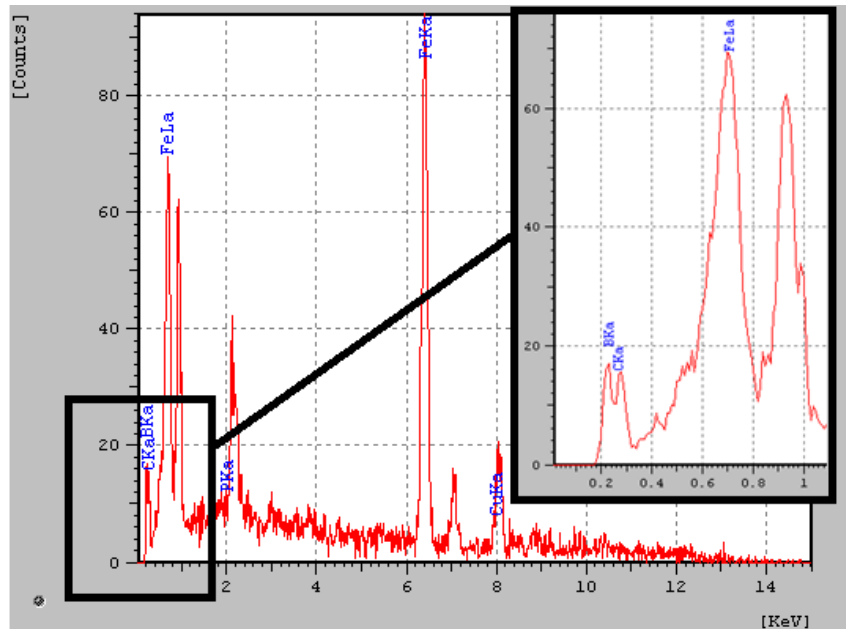
A Figura 7 ilustra imagem obtida por meio de MEV com destaque para a Região A, na subsuperfície (camada boretada) e Região B, no material base, onde foram realizadas as análises de Espectroscopia de raios X por dispersão em energia (EDS).

**Figura 7.** Imagem de MEV da seção transversal da amostra boretada por eletroerosão com eletrodo ferramenta de cobre. Em destaque as regiões onde foram realizadas as análises EDS.



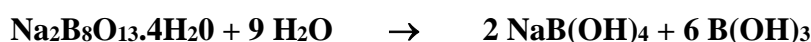
A Figura 8 apresenta o gráfico do espectro de EDS da Região A (camada boretada) indicada na imagem de MEV da figura 7.

**Figura 8.** Gráfico do espectro de EDS na Região A, indicada na imagem de MEV da Figura 7. Em destaque o trecho ampliado, indicado pelo retângulo.

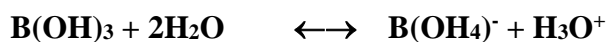


O elemento químico boro, foi detectado pela análise na superfície do aço ABNT 8620, devido a identificação do pico de boro no gráfico do espectro de EDS, semelhante ao observado por Joshi & Hosmani (2014), em seu trabalho de pesquisa. O processo de boretação por eletroerosão realizado na máquina de EDM 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:



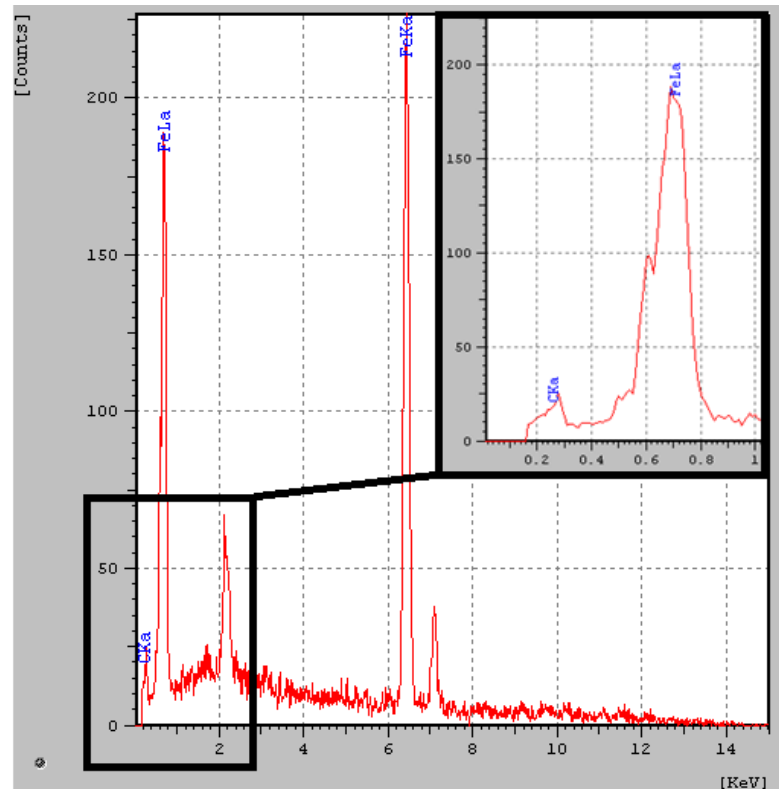
Nas soluções aquosas de octaborato de sódio estabelece-se equilíbrio químico, no qual o ácido bórico se liga às hidroxilas provenientes da auto-ionização das moléculas de água. O equilíbrio pode descrito segundo a equação:



O elemento químico boro se decompoe no canal de plasma para implantar-se na superfície do aço ABNT 8620.

A Figura 9 apresenta o gráfico do espectro de EDS da região B (metal base) indicada na imagem de MEV da figura 7.

**Figura 9.** Gráfico do espectro de EDS na Região B, indicada na imagem de MEV da Figura 7. Em destaque o trecho ampliado, indicado pelo retângulo.



Nota-se no gráfico do espectro de EDS ilustrado na figura 9 que não surgiu o pico de boro. Por se tratar do espectro da região B, destacada na Figura 7, material base, aço ABNT 8620, que não contém esse elemento químico em sua liga. A modificação superficial do aço ABNT 8620 por meio 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 nitretação por descargas elétricas utilizando ureia decomposta em água deionizada.

## CONCLUSÕES

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

As camadas refundida e boretada (intermediária) foram observadas por meio de imagens de microscopia ótica, com destaque para a uniformidade da camada boretada que diferencia da camada refundida, camada essa que se desprende da superfície da peça.

Ocorreu ganho percentual no valor da microdureza de 134% e 153 % na camada boretada e camada refundida, respectivamente, em relação ao material base.

A técnica de difração de raio-x detectou a presença de boretos de ferro na forma das fases FeB e Fe<sub>2</sub>B, que foram observados nos difratogramas.

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.

## AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, pelo apoio, ao ceder sua infraestrutura para realização dos experimentos.

## REFERÊNCIAS

- 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.
- 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.
- 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.
- 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.
- 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 1. **Protection of Metals and Physical Chemistry of Surfaces** **49** (5), 567–573, 2013b.
- JOSHI AA; HOSMANI SS. Pack-boronizing of AISI 4140 Steel: Boronizing mechanism and the role of container design. **Mater Manuf Process** **29**(9), 1062–1072, 2014.
- 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.
- NICESIO IC; SILVA SP; FREITAS FA; SANTOS RF; SILVA ER. Avaliação da qualidade da ureia no processo de nitretação por descargas elétricas. **Anais... 9º CONEM – Congresso Nacional de Engenharia Mecânica**, Fortaleza, 2016.
- 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 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.
- 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.
- 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. ASTM International** **6** (4), 492-509, 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 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 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.

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

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; KEDDAM 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.

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

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.

YAO Q; SUN J; FU Y; TONG W; ZHANG H. An evaluation of a borided layer formed on Ti6Al-4V alloy by means of SMAT and low-temperature boriding. **Materials (Basel)** **9** (12), 2016.

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.

