

Artigo Científico

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

Evaluation of ABNT P20 Steel Machined by EDM with tetrahydrate sodium octaborate aqueous solution as boron source

João Paulo Moreira Santos Barbosa^{1*}, Anderson Edson da Silva¹, Sinval Pedroso da Silva², Ernane Rodrigues da Silva¹

¹Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, Belo Horizonte, Minas Gerais, Brasil.

²Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Minas Gerais (IFMG), Belo Horizonte, Minas Gerais, Brasil.

Submetido em: 22.07.2022; Aceito em: 15.03.2023; Publicado em: 03.04.2023.

***Autor para correspondência:** jpbarbosa87@gmail.com

Resumo: Este trabalho apresenta um estudo da usinagem do aço ABNT P20 realizado em uma máquina de Usinagem por Descargas Elétricas por Penetração (S-EDM) adaptada, utilizando cobre eletrolítico como eletrodo ferramenta e octaborato de sódio tetra hidratado ($\text{Na}_2\text{B}_8\text{O}_{13}\cdot 4\text{H}_2\text{O}$) como fonte de boro, diluído em água deionizada. As amostras foram preparadas com o uso de técnicas metalográficas para caracterização das camadas refundida e intermediária, que foram formadas após o processo. Para medição da espessura das camadas e verificação de alterações microestruturais e morfológicas, foram obtidas imagens utilizando microscopias óptica e eletrônica de varredura. A dureza das camadas foi medida por meio de ensaios de microdureza Vickers, e a presença de boretos foi verificada por meio de difração de raios X (DRX). Após a realização do processo S-EDM, foi verificado aumento de 112% e 92%, aproximadamente, no valor médio de microdureza Vickers das camadas refundida e intermediária, respectivamente, em relação ao material-base, fato que pode ser justificado pela presença das fases FeB e Fe₂B obtidas por DRX.

Palavras-chave: Aço ABNT P20, Boretção, Camada boretada, Usinagem por Descargas Elétricas por Penetração, Octaborato de sódio tetra hidratado.

Abstract: This work presents a study of ABNT P20 steel machining realized in an adapted die sinking EDM machine using electrolytic copper as tool electrode and tetrahydrate sodium octaborate ($\text{Na}_2\text{B}_8\text{O}_{13}\cdot 4\text{H}_2\text{O}$) as a source of boron, diluted in deionized water. The samples were prepared using metallographic techniques to characterize the recast and intermediate layers, which were formed after the process. To measure the thickness layers and verify microstructural and morphological alterations, images were obtained using optical and scanning electron microscopy. The layer hardness was measured through the Vickers microhardness test and the presence of borides was verified through x-ray diffraction tests (XRD). After carrying out the S-EDM process, increase of approximately 112% and 92% was verified in the average Vickers microhardness value of the recast and intermediate layers, respectively, in relation to the base material, a fact that can be explained by the presence of the phases FeB and Fe₂B obtained by XRD.

Keywords: AISI P20 steel, Boriding, Borided layer, S-EDM process, Disodium octaborate.

INTRODUÇÃO

A boretção é um processo termoquímico no qual ocorre a difusão de átomos de boro provindos de uma fonte que contém o elemento. O átomo de boro é relativamente pequeno comparado com alguns elementos químicos, como exemplo o ferro e, portanto, ele pode difundir intersticialmente no substrato, reagindo com alguns elementos do material a ser boretado, formando compostos intermetálicos denominados boretos (BRAKMAN *et al.*, 1989). A camada boretada apresenta elevada dureza, com boa resistência ao desgaste e baixo coeficiente de atrito, possui também resistência a corrosão e oxidação. Boretos de ferro, como FeB e Fe₂B, são comuns de serem formados no tratamento de materiais ferrosos. A boretção geralmente produz camadas com resistência tribológica superior aos tratamentos de superfície convencionais como nitretação, cementação e carbonitretação. Dependendo da liga ferrosa submetida ao processo, podem ser obtidas durezas próximas ou até superiores a 2000 HV (GÖK *et al.*, 2017).

Segundo Kulka (2019), existem diversas classificações na literatura para os processos de boretção, porém, o autor propõe uma classificação atualizada para boretção 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 ou gasosos. Na boretção física por implantação, átomos de boro, são acelerados por um canhão implantador em direção a superfície do material a ser boretado, geralmente, utilizado na fabricação de componentes eletrônicos semicondutores. Nos métodos de alta energia, existe a boretção por feixe de elétrons, que de acordo com a tecnologia empregada, podem ser aplicados também o laser ou plasma, boretando por refusão de boro a superfície do material, formando boretos refundidos ou difundidos de elevada dureza. Ambos os métodos de implantação iônica de boro e os métodos que envolvem alta energia exigem tecnologia avançada para serem utilizados, logo, tem baixa aplicabilidade e alto custo, quando comparado aos outros meios de boretção sólida, líquida ou gasosa (KULKA, 2019) e (NOVAKOVA *et al.*, 2004).

O plasma contém espécies neutras e eletricamente carregadas de elétrons, íons positivos, íons negativos, átomos e moléculas. Por ser 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 1 ilustra esquematicamente as prováveis reações físico químicas que ocorrem na superfície do substrato e na interface plasma metal.

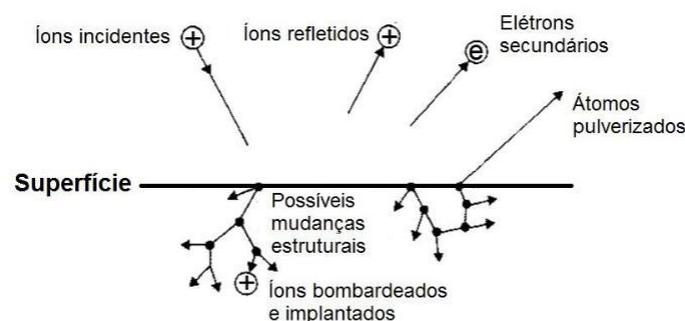


Figura 1. Interação dos íons e elétrons do plasma com a superfície catódica (CHAPMAN, 1980).

A Usinagem por Descargas Elétricas (EDM – *Electrical Discharge Machining*), conhecido popularmente por eletroerosão, é um processo de usinagem não convencional, cuja fonte de energia é provida de descargas elétricas geradas no canal de plasma (RASLAN, 2015). De acordo com König (2013), a teoria termoelétrica é a que melhor explica o processo, no qual assume que o calor gerado pela descarga elétrica na região próxima ao canal de plasma funde o material, que é removido e ejetado da poça fundida. A descarga elétrica ocorre durante quatro etapas sucessivas: A primeira, de ignição, Figura 2(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, os elétrons colidem com átomos neutros do dielétrico e formam íons positivos, íons negativos e elétrons secundários. Na segunda fase, Figura 2(b), ocorre a formação do canal de plasma, no qual 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 2(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. Na última fase, Figura 2(d), de 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).

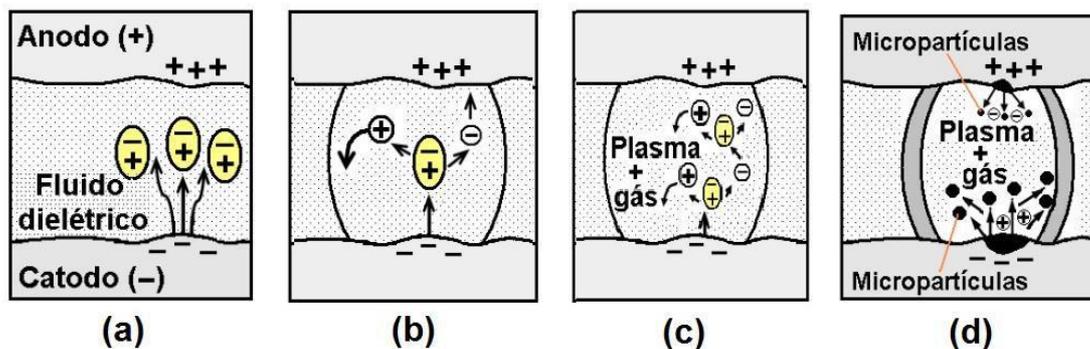


Figura 2. Fases da descarga elétrica e formação do canal de plasma no processo EDM (STEVENS, 1998).

Embora sejam escassos na literatura, estudos de boretação por EDM, Özerkan (2018) relata ter tratado a superfície do aço ABNT 1040 com o emprego da usinagem por eletroerosão, 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 EDM, podem formar camadas de liga homogênea. 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 de trabalho. 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 (S-EDM). 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. No processo de implantação iônica por EDM, íons são acelerados e bombardeados em direção a superfície, com alta energia, liberando átomos da superfície que reagem com espécies do plasma, formando fases com o nitrogênio do tipo Fe-N (SANTOS, 2013).

O aço ABNT P20 possui grande utilização, principalmente na indústria de ferramentaria e fabricação de moldes de injeção de polímeros ou fundição de alumínio. Muitas das vezes estes seguimentos industriais tem grande demanda na fabricação de peças pelo processo de usinagem por EDM. Adicionalmente, boa parte desses componentes necessitam ser submetidos a algum tratamento de endurecimento superficial, como por exemplo, a boretação (DOSSETT & TOTTEN, 2014). Assim, Kayali (2015), de forma similar a Morón *et al.* (2020), realizou boretação em caixa do aço AISI P20. Como fonte de boro, pó de Ekabor II foi utilizado e, após o decorrer do tempo da boretação, a amostra foi retirada do forno e resfriada ao ar livre possuindo uma camada polifásica com espessura variando de 26 a 143 μm .

Este trabalho tem por objetivo realizar a usinagem do aço ABNT P20 em máquina de EDM por penetração adaptada, utilizando octaborato de sódio tetra hidratado ($\text{Na}_2\text{B}_8\text{O}_{13}\cdot 4\text{H}_2\text{O}$) como fonte de boro, diluído em água deionizada, em substituição ao fluido dielétrico convencional. A novidade consiste em um processo de usinagem por EDM em simultaneidade ao endurecimento superficial do aço, com o emprego de fonte de boro no fluido, visando contribuir para a produtividade com redução de custos operacionais relacionados ao tempo e valor gasto com tratamentos adicionais de endurecimento superficial convencionais. Apesar da boretação e nitretação por descargas elétricas serem estudos distintos, trabalhos como o de Raslan *et al.* (2012), Silva *et al.* (2020a), foram utilizados como referência nesta pesquisa, pois o mecanismo de nitretação por descargas elétricas estudado pelos autores, é o que mais se assemelha para fundamentar o processo de endurecimento superficial proposto neste trabalho.

Para o processo de EDM, foram preparadas três amostras (eletrodos peça), com diâmetro de 19 mm e espessura de 15 mm, obtidas a partir de barras de aço ABNT P20 trefilado. Posteriormente, cada amostra foi cortada ao meio, no sentido axial, antes da realização da usinagem por EDM, visando facilitar a análise metalográfica de cada uma das metades da amostra bipartida. Os eletrodos ferramenta foram confeccionados com diâmetro de 22 mm e comprimento 30 mm, à partir de barra de cobre eletrolítico. Ambos os eletrodos, peça e ferramenta, foram usinados em torno convencional. Foi utilizado um eletrodo ferramenta distinto para a usinagem de cada amostra.

MATERIAIS E MÉTODOS

Para o processo de EDM, foram preparadas três amostras (eletrodos peça), com diâmetro de 19 mm e espessura de 15 mm, obtidas a partir de barras de aço ABNT P20 trefilado. Posteriormente, cada amostra foi cortada ao meio, no sentido axial, antes da realização da usinagem por EDM, visando facilitar a análise metalográfica de cada uma das metades da amostra bipartida. Os eletrodos ferramenta foram confeccionados com diâmetro de 22 mm e comprimento 30 mm, a partir de barra de cobre eletrolítico. Ambos os eletrodos, peça e ferramenta, foram usinados em torno convencional. Foi utilizado um eletrodo ferramenta distinto para a usinagem de cada amostra.

Para obtenção da solução aquosa, utilizada em substituição ao dielétrico convencional na usinagem por EDM, foi dissolvido 500 gramas de octaborato de sódio tetrahidratado ($\text{Na}_2\text{B}_8\text{O}_{13} \cdot 4\text{H}_2\text{O}$) em 30 litros de água deionizada, preparada em um deionizador portátil a base de resina, resultando em concentração de $16,7 \text{ g.L}^{-1}$. De acordo com Schubert (2003) e Shen (2021) o octaborato de sódio tetrahidratado, é comumente utilizado como fertilizante na agricultura, e é encontrado disposto na forma de líquido claro ou mais comum na forma de pó levemente amarelado, é inodoro, não inflamável, de baixa toxicidade e ponto de fusão de $813 \text{ }^\circ\text{C}$.

Para a realização do processo de usinagem nas amostras, foi utilizada uma máquina de eletroerosão por penetração Eletroplus – 540/SERVSPARK, adaptada conforme trabalhos de nitretação por descargas elétricas realizado por Santos *et al.* (2016) e Silva *et al.* (2020a). Todas as adaptações que foram realizadas na máquina, como a inclusão de uma cuba auxiliar no interior do reservatório original, para execução dos testes, não afetam ou danificam nenhum componente original da mesma. Assim, uma cuba auxiliar contendo a solução de octaborato de sódio tetrahidratado, diluído em água deionizada, foi posicionada no interior do reservatório original de trabalho da máquina, evitando contaminação do fluido dielétrico da própria máquina ou mesmo a corrosão de componentes. A cuba auxiliar foi fabricada com chapa de aço inoxidável austenítico AISI 304 com 1 mm de espessura e dimensões internas de 335 mm de altura, 400 mm de largura e 600 mm de comprimento, projetada para trabalhar com volume de até 80 litros. Uma bomba com vazão de 51 L.min^{-1} , pressão de 2 m.c.a. (metros de coluna d'água), acoplada com motor elétrico de 0,16 CV, 3100 RPM, foi instalada na cuba auxiliar, e conectada a uma mangueira com extremidade de saída fixa em um suporte, instalado no interior da cuba, ocorrendo assim agitação e homogeneização da solução aquosa durante os testes. A Figura 3 ilustra a máquina de eletroerosão por penetração (S-EDM) com a cuba auxiliar que foi utilizada nos testes.

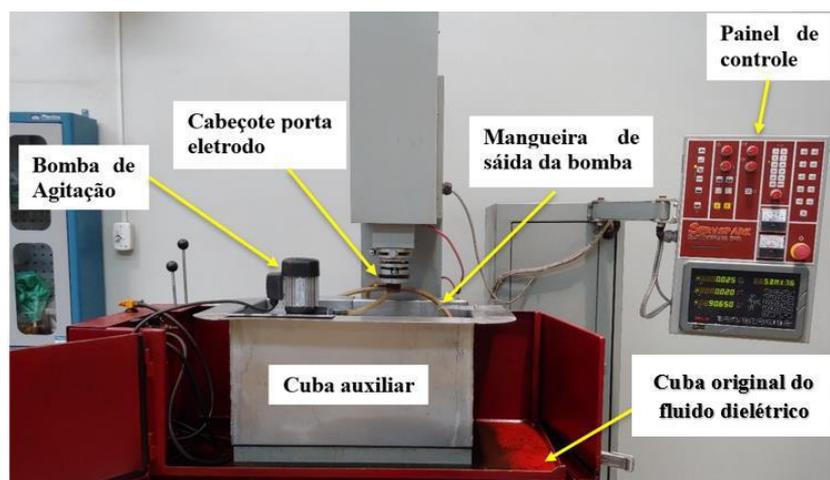


Figura 3. Máquina de EDM adaptada que foi utilizada nos testes.

A amostra bipartida foi colocada em um suporte de fixação (porta amostras) de aço inoxidável AISI 304, soldado no fundo da cuba auxiliar, contendo um furo central para alojar a amostra e um parafuso lateral utilizado para fixá-la. O eletrodo ferramenta foi fixado em um suporte (porta eletrodo), com o mesmo sistema de fixação, por parafuso lateral. A Figura 4 mostra, em detalhes, o interior da cuba auxiliar com eletrodo ferramenta e a amostra bipartida, montados em seus respectivos suportes de fixação.

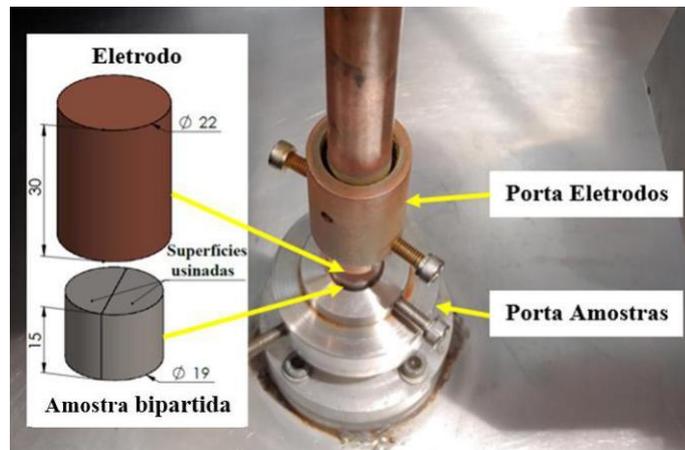


Figura 4. Eletrodo e amostra bipartida montados nos respectivos suportes no interior da cuba auxiliar.

A amostra bipartida foi usinada por EDM durante 10 minutos, utilizando os parâmetros ajustados, conforme relação na Tabela 1, e com base nos experimentos de Raslan *et al.* (2012).

Tabela 1. Parâmetros e especificação empregados no processo EDM ajustados na máquina.

PARÂMETRO	ESPECIFICAÇÃO
Polaridade do eletrodo ferramenta	Positiva
Corrente	40 A
Tempo de pulso (T_{ON})	500 μ s
Tempo de pausa (T_{OFF})	1,5*
Fenda de trabalho (<i>Gap</i>)	1,0*
Afastamento periódico da ferramenta	5,0*
Velocidade do servossistema	5,0*
Tempo de erosão	5,0*

*O número informado não possui unidade de medida correlacionada.

Após a usinagem, as amostras foram submetidas a limpeza ultrassônica com o objetivo de remover resíduos desprendidos da superfície. As amostras foram embutidas com resina epóxi termoendurecível, posteriormente foram lixadas com o uso de lixas 180, 220, 400, 600, 1200 mesh e polidas com pasta diamantada de 3 e 1 μm . Para visualização das camadas foi realizado ataque químico utilizando o reagente Nital 3%. As imagens das camadas foram obtidas por microscópio óptico Fortel por meio de câmera digital acoplada. O ensaio de microdureza Vickers (HV) foi realizado utilizando microdurômetro com carga de 25 gf por 15 segundos de tempo de permanência. Medições foram realizadas na camada refundida, camada intermediária e material base (substrato das amostras), por meio de imagens obtidas com auxílio de uma câmera digital incorporada ao microscópio óptico e ao microdurômetro. Para detectar a possível presença dos boretos de ferro, foi realizada difração de raios X (DRX) convencional, Bragg-Brentano ou θ - 2θ . A Tabela 2 relaciona os parâmetros de varredura utilizados nessa técnica. Antes da realização das análises de DRX, as amostras foram limpas com álcool em aparelho de ultrassom por 15 minutos.

Tabela 2. Parâmetros utilizados no ensaio de DRX.

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

RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Figura 5 ilustra uma imagem de microscopia óptica da seção transversal da amostra de aço ABNT P20, após o processo de EDM com o uso de eletrodo ferramenta de cobre eletrolítico, utilizando solução de octaborado de sódio diluído em água deionizada como fluido.



Figura 5. Imagem da seção transversal da amostra após usinagem por EDM do aço ABNT P20.

É possível observar na Figura 5 a existência de uma camada refundida e camada intermediária, ou seja, a camada boretada. O resultado é semelhante ao que foi observado por Santos *et al.* (2016), quando aplicaram procedimento similar, ao nitretarem por descargas elétricas o aço ABNT 4140. A camada refundida apresentou regiões com deslocamento, conforme pode-se observar na Figura 5. De acordo com Yadav *et al.* (2002) a ação térmica do processo de EDM afeta a integridade da superfície do componente usinado. Pramanik *et al.* (2017), descrevem que a formação da camada refundida se deve ao fato da alta temperatura do processo de EDM, que funde o metal durante a série de descargas elétricas produzidas pelo processo. Esse mecanismo seguido do resfriamento rápido gera tensões térmicas que produzem micro trincas na camada refundida. Devido a este fato, em geral, a superfície da peça deve ser polida, com objetivo de reduzir as tensões térmicas, eliminar micro trincas e conseqüentemente a camada refundida.

A Figura 6 ilustra imagem de microscopia eletrônica de varredura (MEV) da seção transversal da amostra usinada por EDM com solução de octaborado de sódio em água deionizada.

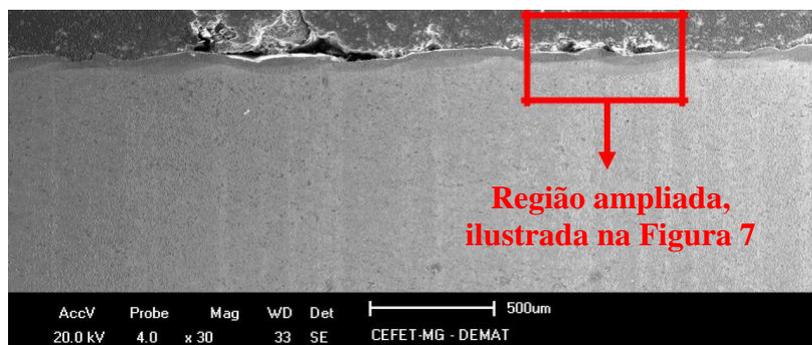


Figura 6. Imagem de MEV da seção transversal da amostra de aço ABNT P20 usinada por EDM.

Nota-se a formação das camadas refundida e intermediária (boretada) que atingem toda extensão da superfície da amostra. Observa-se uniformidade na camada intermediária, que foi possível obter com base nos devidos ajustes dos parâmetros de EDM, os quais resultaram em funcionamento estável do processo de usinagem, combinado com o tratamento termoquímico de boretção.

A Figura 7 ilustra uma imagem de microscopia eletrônica de varredura da região delimitada pelo retângulo indicado na Figura 6.

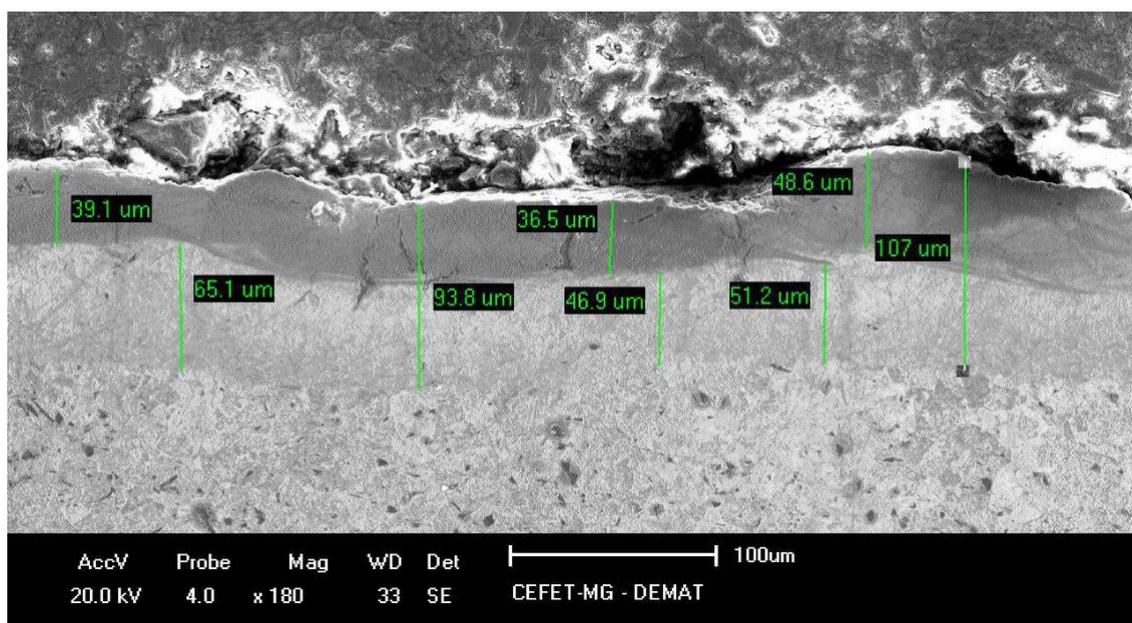


Figura 7. Imagem de MEV da região delimitada pelo retângulo em destaque na Figura 6.

Observa-se a indicação dos valores de espessuras das camadas, medidos em trechos distintos, no total de 10 medições. A camada intermediária (boretada) apresentou valor de espessura média de $52 \pm 4\mu\text{m}$, já a camada refundida valor de espessura média de $47 \pm 22\mu\text{m}$. A alta variação do desvio padrão da camada refundida deve-se a variação dos valores, na faixa entre $20\mu\text{m}$ e $85\mu\text{m}$.

A Tabela 3 apresenta os resultados de 10 medições de microdureza Vickers (25 gf e tempo de permanência de 15 segundos) das camadas intermediária (boretada) e refundida, realizadas na seção transversal da amostra, bem como, no material-base, o aço ABNT P20.

Tabela 3. Valores de microdureza Vickers do material-base e das camadas refundida e intermediária (boretada)

Região	Dureza (HV)	Aumento no valor da Dureza em relação ao aço ABNT P20
Material base (aço ABNT P20)	324 \pm 3	–
Camada refundida	686 \pm 28	112%
Camada intermediária (boretada)	621 \pm 31	92%

Observa-se aumento de dureza de aproximadamente 112% e 92% nas camadas refundida e intermediária, respectivamente. Este resultado é corroborado com os dados de Özerkan (2018), que obteve aumento da dureza superficial na boretção por EDM do aço ABNT 1040 (941 HV na camada refundida, 413 HV na camada intermediária e 200 HV do material-base), após utilizar pós de óxido de boro B_2O_3 misturado em querosene, em substituição ao dielétrico convencional. Segundo Ghanem *et al.* (2002) as mudanças metalúrgicas provocadas pelo aquecimento, seguido do resfriamento brusco, promovido pelo fluido dielétrico, neste caso, a solução aquosa, proporciona o aumento de dureza na camada refundida. Já o aumento de dureza na camada intermediária foi possível pela difusão do boro, por implantação iônica a plasma, decomposto do ácido bórico formado depois da diluição do octaborado de sódio na água deionizada. De acordo com Uslu *et al.* (2007), o aumento de dureza na camada boretada em relação ao material-base, pode ser atribuído a formação das fases FeB e Fe_2B obtidas durante o processo de boretção. A Figura 8 ilustra imagem da seção transversal da amostra após o processo de usinagem por eletroerosão utilizado neste trabalho, onde é possível observar indentações produzidas pelo ensaio de microdureza Vickers.

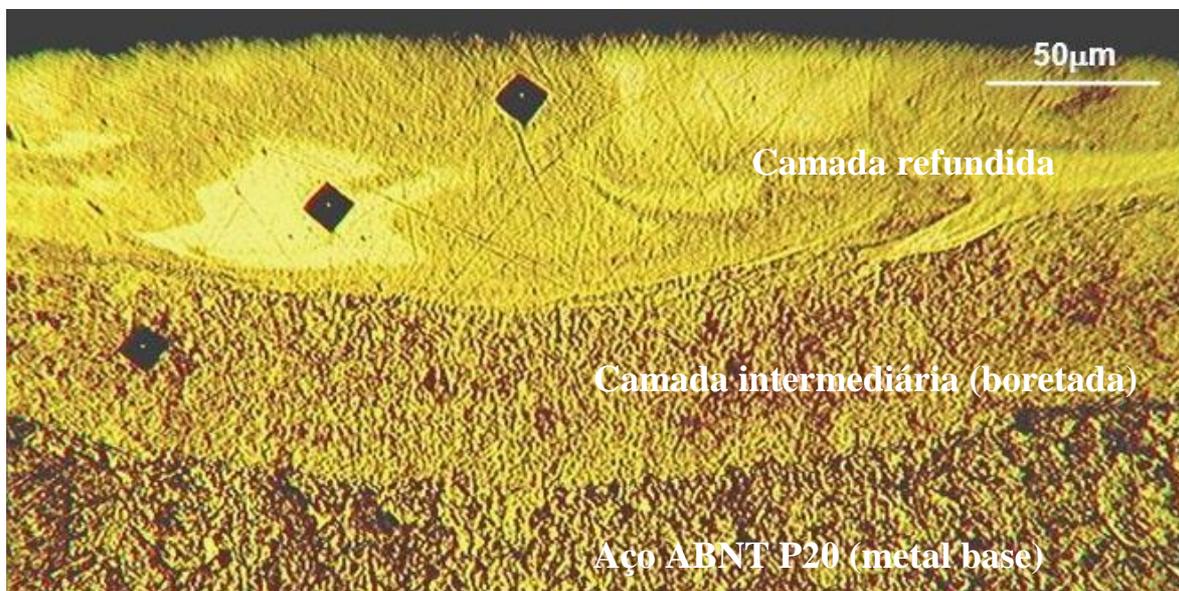


Figura 8. Imagem de microscopia óptica da seção transversal da amostra do aço ABNT P20 usinado por EDM com indentações produzidas por ensaio de microdureza Vickers.

Nota-se, na imagem, as camadas refundida e intermediária (boretada) semelhante ao que foi observado por Santos *et al.* (2016), no processo de nitretação por descargas elétricas.

A Figura 9 apresenta o difratograma de raios X da superfície boretada por EDM e do material-base (ABNT P20), utilizado como referência.

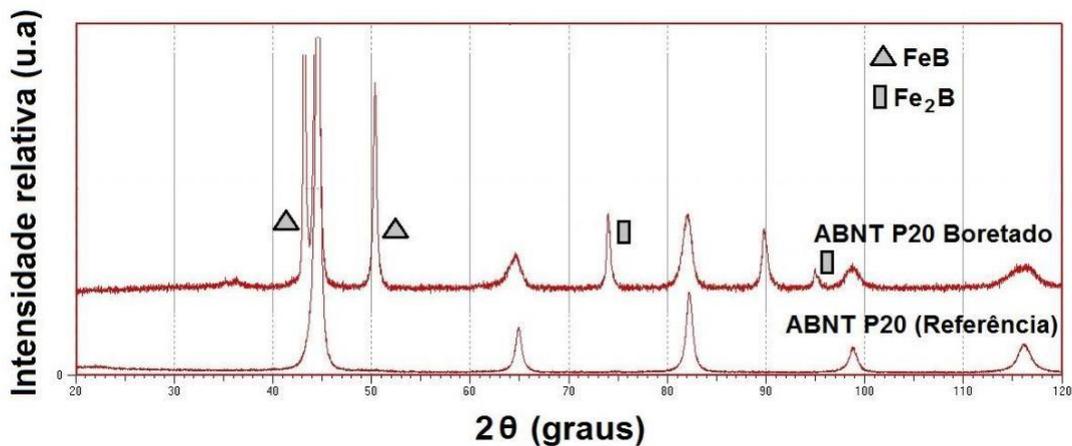


Figura 9. Difratoograma de raios X da superfície da amostra do aço ABNT P20 boretado por EDM com eletrodo ferramenta de cobre eletrolítico e do aço ABNT P20 (material base, referência).

É possível observar na Figura 9, para a amostra boretada, os picos de boretado de ferro FeB e Fe₂B formados, os quais foram identificados por comparação e uso das cartas-padrões obtidas do banco de dados de estrutura cristalina inorgânica (ICSD): $\theta = 44,68^\circ$ e $\theta = 50,66^\circ$ (76-0092), $\theta = 74,35^\circ$ (75-1062) e $\theta = 94,62^\circ$ (36-1392). Estas fases obtidas estão em conformidade com Kayali (2015), que descreveu que as camadas boretadas consistem principalmente das fases FeB e Fe₂B como resultado da difusão de átomos de boro para a rede metálica.

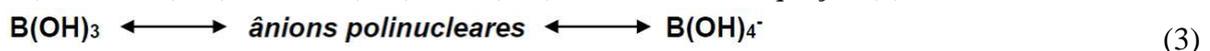
O Octaborato de sódio tetra hidratado dissolvido em água resulta em tetrahidroxiborato mais ácido bórico conforme mostra a Equação (1).



Nas concentrações de boro menor que $0,025 \text{ mol.L}^{-1}$ ($\text{B} < 0,025 \text{ M}$) ocorre equilíbrio químico onde o ácido bórico se liga às hidroxilas provenientes da autoionização das moléculas de água, observado na Equação (2).



Já para concentrações de boro maior que $0,025 \text{ mol.L}^{-1}$ ($\text{B} > 0,025 \text{ M}$), o equilíbrio se estabelece entre o ácido bórico e ânions polinucleares mais complexos, como $\text{B}_3\text{O}_3(\text{OH})_4^-$, $\text{B}_4\text{O}_5(\text{OH})_4^{2-}$, $\text{B}_3\text{O}_3(\text{OH})_5^{2-}$, $\text{B}_5\text{O}_6(\text{OH})_4^-$ e $\text{B}(\text{OH})_4^-$, conforme a Equação (3).



Íons metálicos como Na⁺ e outros promovem a formação dos pares cátion [metálico] + ânion [boratos]. A solução de octaborato de sódio tetra hidratado diluído em água deionizada eleva a presença de cátions Na⁺ que deslocam do equilíbrio em favor da dissociação, o que diminui a concentração de ácido bórico molecular (indissociado) e aumenta a concentração de íons de boro dissolvidos no meio aquoso. Segundo Türkmen e Yalamaç (2021) foi possível realizar a boretagem do aço SAE 1020 utilizando misturas contendo ácido bórico (H₃BO₃) ou Octaborato de sódio (Na₂B₈O₁₃) como fonte de boro. O tratamento de boretagem foi realizado em forno de mufla a 850°C a atmosfera ambiente por 4 h, com camada de aproximadamente 65 μm de espessura e boretos de Fe₂B e FeB identificados. Os autores acrescentam que apesar da escassez de trabalhos envolvendo o uso de materiais e métodos alternativos na boretagem como o octaborato de sódio (Na₂B₈O₁₃), como fonte de boro, o procedimento foi efetivo na boretagem do aço SAE 1020.

A modificação superficial por EDM é possível devido à presença de elementos químicos presentes no fluido (SILVA *et al.*, 2020b), no caso desta pesquisa, a solução aquosa. O requisito fundamental para o enriquecimento por implantação de íons pelo processo de EDM é aplicar solução aquosa contendo o elemento que se deseja implantar. Os íons do elemento químico são incorporados ao canal de plasma, possibilitando a implantação do mesmo (SANTOS *et al.*, 2017). A hipótese de haver fases contendo boro nas camadas refundida e intermediária é pertinente, já que existe uma fonte do elemento químico, ácido bórico proveniente da solução formada pelo octaborato de sódio tetra hidratado diluído em água deionizada. A energia produzida pelo mecanismo de colisões causa ruptura do dielétrico e decompõe os constituintes presentes na mistura. Devido a alta energia cinética que adquirem, os íons de boro implantam-se na superfície do aço ABNT P20, conforme representação esquemática ilustrada na Figura 10.

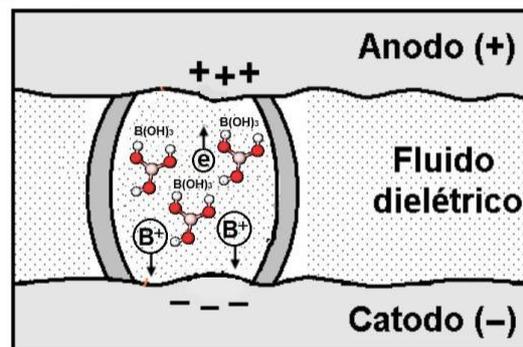


Figura 10. Representação esquemática proposta para a configuração do canal de plasma durante o processo de EDM com uso do fluido formado por octaborato de sódio tetra hidratado diluído em água deionizada.

CONCLUSÕES

Com base na metodologia adotada e nos resultados obtidos neste trabalho, destaca-se as conclusões:

Por meio das imagens de microscopia óptica e eletrônica de varredura, foi possível observar as camadas refundida e boretada (intermediária), sendo que a camada intermediária possui espessura média de $52\mu\text{m}$, a qual difere da camada refundida que se deslocou da superfície da amostra em algumas regiões.

Foi possível obter aumento de aproximadamente 92% e 112% no valor de microdureza Vickers da camada intermediária e refundida, respectivamente, em relação ao material-base.

As fases FeB e Fe₂B formadas, indicadas pelos picos surgidos no difratograma de raios X, justificam o aumento de dureza, indicando que ocorreu a boretação no aço ABNT P20 usinado por eletroerosão com máquina S-EDM adaptada, e com o emprego de solução aquosa contendo octaborato de sódio tetra hidratado, fonte de boro, que incorporou ao canal de plasma e superfície do aço ABNT P20.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, pela disponibilidade de infraestrutura para realização dos experimentos.

REFERÊNCIAS

- BRAKMAN, CM; GOMMERS, AWJ; MITTEMEIJER, EJ. Boriding of Fe and Fe-C, Fe-Cr, and Fe-Ni alloys; boride-layer growth kinetics. **Journal of Materials Research**, v. 4, n. 6, p. 1354-1370, 1989.
- CHAPMAN, B. **Glow discharge process – sputtering and plasm etching**. New York, John Wiley & Sons, 1980.
- DA 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**, v. 462, p. 203509, 2020a.
- DA SILVA, SP. *et al.* Investigation of nitride layers deposited on annealed AISI H13 steel by die-sinking electrical discharge machining. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 109, n. 7-8, p. 2325-2336, 2020b.
- DOSSETT, JL; TOTTEN, GE. **Heat Treating of Irons and Steels**. ASM HANDBOOK V. 4, 2014.
- 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. **Journal of materials engineering and performance**, v. 11, p. 631-639, 2002.
- GÖK, MS. *et al.* Dry sliding wear behavior of borided hot-work tool steel at elevated temperatures. **Surface and Coatings Technology**, v. 328, p. 54-62, 2017.
- KAYALI, Y. Investigation of diffusion kinetics of borided AISI P20 steel in micro-wave furnace. **Vacuum** 121, 129-134, 2015.
- KÖNIG, W. **Fertigungsverfahren 3: Abtragen und Generieren**. Springer-Verlag, 2013.
- KULKA, M. **Current trends in boriding**. Cham: Springer International Publishing, 2019.
- MORÓN, RC. *et al.* Friction and reciprocating wear behavior of borided AISI H13 steel under dry and lubricated conditions. **Journal of Materials Engineering and Performance**, v. 29, n. 7, p. 4529-4540, 2020.
- NASCIMENTO NETO, ER. **Utilização de plasma na Remoção de Óleo da Superfície de Alumínio**. Campinas. Dissertação de Mestrado - Faculdade de Engenharia Química, Universidade Estadual de Campinas, 2006.
- NOVAKOVA, AA. *et al.* Electron-beam boriding of low-carbon steel. **Journal of alloys and compounds**, v. 383, n. 1-2, p. 108-112, 2004.
- ÖZERKAN, HB. Simultaneous machining and surface alloying of AISI 1040 steel by electrical discharge machining with boron oxide powders. **Journal of Mechanical Science and Technology**, v. 32, p. 4357-4364, 2018.
- PRAMANIK, A. *et al.* Fatigue life of machined components. **Advances in Manufacturing**, v. 5, p. 59-76, 2017.
- RASLAN, AA; SILVA, ER; SANTOS, RF. **Método de nitretação através da usinagem com descargas elétricas – NDE**. Uberlândia, MG, 2012.
- 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. **Nitretação por EDM do aço AISI 4140**. Tese de Doutorado - Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2013.
- 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**, v. 45, p. 303-306, 2016.
- 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**, v. 90, p. 2001-2007, 2017.
- SCHUBERT, DM. Borates in industrial use. **Group 13 Chemistry III: Industrial Applications**, p. 1-40, 2003.
- SHEN, KK. Boron-Based Flame Retardants in Non-Halogen Based Polymers. **Non-Halogenated Flame Retardant Handbook**, p. 309-336, 2021.
- STEVENS, L. **Improvement of Surface Quality in Die-sinking EDM**. Leuven. Doctorate degree thesis - Department of Mechanical Engineering. Katholieke Universiteit Leuven. 1998.
- TÜRKMEN, I; YALAMAÇ, E. Effect of Alternative Boronizing Mixtures on Boride Layer and Tribological Behaviour of Boronized SAE 1020 Steel. **Metals and Materials International**, p. 1-15, 2021.
- USLU, I. *et al.* Evaluation of borides formed on AISI P20 steel. **Materials and Design** 28, 55-61, 2007.
- YADAV, V; JAIN, VK; DIXIT, PM. Thermal stresses due to electrical discharge machining. **International Journal of Machine Tools & Manufacture**, v. 42, n. 8, p. 877-888, 2002.

ISSN 1984-5693
Vol.15, 2023,
<http://dx.doi.org/10.22407/1984-5693.2023.v15.p.e20231501>



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



© Publicação de acesso livre, sob licença e condições de Creative Commons Attribution (CC BY NC) license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>).