

MICROESTRUTURA E PROPRIEDADES MECÂNICAS DO AÇO SAE 4140 APÓS BORETAÇÃO TERMOQUÍMICA

Luciana Leite Silveira^a

Anderson Geraldo Marenha Pukasiewicz^b

Paulo Soares^a

Ricardo D. Torres^a

^aPontifícia Universidade Católica do Paraná

^bUniversidade Tecnológica Federal do Paraná

luciana.lsilveira@gmail.com

ricardo.torres@pucpr.br

Resumo. A redução do desgaste abrasivo e o aumento da resistência superficial dos aços pode ser feita através de tratamento termoquímico de boretção, de forma a possibilitar um aumento de dureza e propriedades superficiais. Este trabalho estudou a boretção termoquímica do aço SAE/AISI 4140, ou ainda DIN 42CrMo4, é um aço médio carbono e de baixa liga com grande aplicação nas indústrias automotiva, aeroespacial e de manufatura. O objetivo desse trabalho foi o de estudar o efeito da quantidade de boro da mistura boretante (1,47, 4,95 e 9,30% de B) e do tempo de boretção (1, 2 e 4 horas) na morfologia e propriedades mecânicas das camadas de boretos. Os resultados mostram a formação de camadas com morfologia de dentes-de-serra em todas as condições. Camadas monofásicas (Fe_2B) foram geradas com a menor quantidade de boro, e o aumento do tempo de boretção levou ao crescimento das camadas em todas as condições. Camadas polifásicas (Fe_2B e FeB) foram observadas para as amostras com maior quantidade de boro (9,30%), assim como aumento de dureza e módulo de elasticidade devido à presença de FeB . Para a quantidade média, 4,95% de B, foi observada uma camada polifásica somente para a boretção durante 2 horas.

Palavras-chave: Boretção Termoquímica. Aço SAE/AISI 4140. Quantidade de Boro.

1. INTRODUÇÃO

O desgaste abrasivo é um dos principais mecanismos de redução da vida útil de máquinas no ambiente industrial. Ele ocorre através do contato entre superfícies, tendo como consequência remoção de material superficial e geração de partículas soltas, que causam ruídos e danos que se estendem a outros componentes de uma mesma máquina. Existem diferentes métodos de aumentar a resistência ao desgaste de um aço, como por exemplo o aprimoramento de suas propriedades superficiais. A medida de proteção preferida contra abrasão é o uso de materiais mais duros, que por sua vez devem possuir tenacidade à fratura suficiente, para que não ocorra fratura frágil sob carregamento supercrítico (Mang, Bobzin, and Bartels 2010).

Boretção é um tratamento termoquímico superficial de endurecimento que pode ser aplicado a uma grande variedade de materiais ferrosos e não-ferrosos (Sinha 1991). Isto é possível devido ao número atômico muito pequeno do boro, sendo feita a difusão em materiais tais como aço, ligas de níquel, de titânio e materiais de transição (Petrova, Suwattananont, and Samardzic 2008). O processo envolve a difusão de boro em superfícies metálicas para o aumento da dureza e resistência ao desgaste. Técnicas boretantes incluem boretção em pó (*powder-pack boriding*) (Aichholz et al. 2018; Carrera-Espinoza et al. 2016; Krelling et al. 2017; Yang et al. 2016), deposição de vapor químico (CVD) (Johnston, Baker, and Catledge 2016), boretção a plasma (Makuch et al. 2017) e em leito fluidizado (Anthymidis et al. 2002; Anthymidis, Stergioudis, and Tsipas 2002).

Para a boretção ocorre o aquecimento do material numa faixa entre 700 e 1000 °C, preferencialmente durante 1 a 12 horas, em contato com um meio boretante (Sinha 1991), como pó sólido (Aichholz et al. 2018; Carrera-Espinoza et al. 2016; Krelling et al. 2017; Yang et al. 2016), pasta (Campos et al. 2005; Keddah and Taktak 2017), líquido (Allaoui, Bouaouadja, and Saindarnan 2006; Sen, Sen, and Bindal 2005) ou gás (Kulka, Makuch, and Poplawski 2014; Makuch and Kulka 2014). No processo de boretção, os átomos de boro difundem na superfície da peça e formam boretos com o material base. A espessura da camada boretada é determinada através da temperatura de processamento e da duração do tratamento, assim como da composição química do aço (Carbucicchio and Palombarini 1984; Yu et al. 2005).

Dentre os processos de boretção, o processo de boretção em pó (do inglês *pack-boriding*) apresenta a configuração mais simples, porém exige maiores temperaturas e tempos de boretção (Li et al. 2018). O processo é normalmente feito utilizando misturas comerciais, porém alguns autores já estudaram a boretção do aço com diferentes composições (Jain and Sundararajan 2002; Kul et al. 2016; Martini et al. 2004; Martini, Palombarini, and Carbucicchio 2004; Türkmen and Yalamaç 2018; Yang et al. 2016).

As camadas de boretos nos aços e ligas podem possuir uma única fase (Fe_2B) ou duas fases (FeB e Fe_2B). A fase FeB é considerada rica em boro comparado com a fase Fe_2B . Porém a formação de uma fase única de Fe_2B é mais desejável, pois, ainda que a fase FeB , rica em boro, possua maior dureza, ela é também mais frágil (Sinha 1991).

Concentrações mais altas de boro livre, originados de uma maior quantidade de boro, resultam na formação de FeB e Fe_2B , enquanto concentrações mais baixas de boro livre resultarão em apenas crescimento de Fe_2B . Os seguintes processos físico-químicos podem ocorrer (Yu et al. 2005):



Uma quantidade mais baixa de boro favorecerá a formação de Fe_2B , enquanto uma quantidade mais alta de boro também formará FeB (Spence and Makhoulf 2005), como mostrado nas Equações (1) e (3). A transformação de fase $\text{FeB} \rightarrow \text{Fe}_2\text{B}$ (Equação 5) ocorre pelo prolongamento do processo de boretação sob uma condição de depleção de boro.

Um dos maiores desafios da boretação é a definição dos parâmetros apropriados para a obtenção da microestrutura apropriada para oferecer adequada resistência ao desgaste. No presente trabalho, uma mistura comercial (de composição química de 5% de B_4C , 5% de KBF_4 e 90% de SiC) foi utilizada como base para o desenvolvimento de duas novas composições para a mistura do pó utilizado no processo de boretação. As novas composições foram criadas variando-se a quantidade de B_4C para 1% e 10%. Além disso, o tempo de boretação foi variado em 1, 2 e 4 horas. Dessa forma, foi conduzida uma investigação da influência da composição química da mistura e do tempo de boretação na microestrutura e propriedades mecânicas do aço SAE 4140.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

2.1. Materiais e processo de boretação

O material escolhido para a confecção dos corpos de prova foi o aço SAE 4140, de composição química 0,38-0,43% C, 0,75-1,00% Mn, máx. 0,03% P, máx. 0,04% S, 0,15-0,35% Si, 0,80-1,10% Cr, 0,15-0,25% Mo. O material foi utilizado em discos de diâmetro de 1 polegada (25,4 mm) e 5 mm de espessura. Os corpos-de-prova foram submetidos a lixamento com lixas de granulometria de 320 a 800 mesh. Após o lixamento, as amostras foram limpas com álcool, para remoção das impurezas superficiais.

A composto boretante foi feito com 3 diferentes compostos químicos: o carbeto de boro (B_4C) age como fonte de boro; o tetrafluoroborato de potássio (KBF_4) como ativador do processo de boretação; e o carbeto de silício (SiC) como diluente. Os compostos utilizados foram utilizados na forma de pó, com granulometria inferior a 100 μm . Os pós dos compostos B_4C e SiC foram fornecidos pela companhia Fiven Brasil (Barbacena – MG) e o composto KBF_4 foi adquirido da empresa Merck S.A. Foram estudadas três misturas boretantes, caracterizadas pela variação dos compostos B_4C e SiC , como pode ser observado na Tabela 1. Foi estudado o efeito da quantidade de boro nas características das camadas boretadas: na morfologia, espessura, fases formadas e propriedades mecânicas.

Tabela 1 – Composição e quantidade de boro dos compostos boretantes.

Mistura	Quantidade de boro	Composição química (% em peso)
1% de B_4C	1,47 % de B	6,5 g B_4C (1%), 32,5 g KBF_4 (5%), 611 g SiC (94%)
5% de B_4C	4,95 % de B	32,5 g B_4C (5%), 32,5 g KBF_4 (5 wt.%), 585 g SiC (90%)
10% de B_4C	9,30 % de B	65 g B_4C (10%), 32,5 g KBF_4 (5%), 552,5 g SiC (85%)

A preparação dos compostos é feita pelas seguintes etapas:

- Pesagem dos diferentes produtos químicos nas proporções indicadas na Tabela 1 em uma balança;
- Mistura dos componentes em um misturador Y por 1 hora e 50 minutos em um torno, a uma rotação de 35 rpm;
- Mistura dos compostos em um misturador com esferas de alumina de diâmetro de 25 mm por 1 hora.

Em seguida, os compostos boretantes são adicionados a um cadinho de aço inoxidável juntamente com quatro corpos-de-prova de aço SAE 4140. Abaixo e acima dos corpos-de-prova foi colocada uma camada de no mínimo 25 mm de espessura de composto boretante, cobrindo totalmente os corpos-de-prova. O cadinho é então fechado e colocado dentro de um forno de resistência elétrica e aquecido até a temperatura de 900 °C, a uma taxa de aquecimento de 60 °C/min, à pressão atmosférica. O processo teve variação do tempo de boretação, contado a partir do momento que o forno atinge a temperatura de 900 °C. Os períodos de boretação foram de 1 hora, 2 horas e 4 horas, para cada uma das composições da mistura boretante, totalizando 9 ensaios. Cada composição de mistura boretante resultou em uma diferente quantidade de

boro, ou seja, quanto de boro é ofertado durante o processo para a boretção, como mostra a Tabela 1. Em seguida, o cadinho foi removido do forno e as amostras são removidas do cadinho e resfriadas ao ar. As camadas boretadas foram caracterizadas quanto a microestrutura e morfologia, espessura, fases presentes e propriedades mecânicas e resistência ao desgaste.

2.2. Análise da Morfologia das Camadas Boretadas

Para a análise da morfologia das camadas boretadas foi feita análise em Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV) modelo Tescan Vega 3. Foram realizadas imagens de modo a avaliar a forma, espessura, e defeitos presentes nas camadas boretadas. Para as análises, os corpos-de-prova foram cortados transversalmente e embutidos em baquelite. Após o embutimento, foi realizado lixamento nas granulometrias de 320 a 1200 mesh e então polimento com suspensão de alumina 1 μm e 0,3 μm até a obtenção de uma superfície livre de riscos. Foi realizado então o ataque químico da superfície das amostras, com o uso de uma solução de Nital 2%.

2.2. Análise das Fases Presentes e Dureza das Camadas Boretadas

Para a caracterização das amostras, os corpos-de-prova foram lixados nas granulometrias de 320 a 2500 mesh e então polidos com suspensão de alumina 1 e 0,3 μm e pasta de diamante até a obtenção de uma superfície de rugosidade R_a inferior a 0,1 μm . A identificação das fases presentes nas camadas boretadas (FeB e Fe_2B) foi realizada pelo método de Difração de Raios-X (DRX), em equipamento Shimadzu XRD7000, com um alvo de Cobre e um comprimento de onda $K\alpha$ de 1,54 nm, tensão de trabalho de 40 kV e corrente de 30 mA. Utilizou-se uma velocidade de escaneamento de $1^\circ/\text{min}$, passo de $0,02^\circ$ e grau de incidência de 2° , adequado para a análise de filmes finos. A análise foi feita na faixa de varredura de 35° a 85° . Os dados obtidos foram analisados através do *software* “Match” versão 3.3.

Os ensaios de dureza instrumentada foram realizados com o intuito de determinar a dureza H (em GPa e HV) e o módulo de elasticidade reduzido E (GPa) das camadas boretadas. Foram realizados ensaios na superfície das amostras com um equipamento de medição de ultra micro dureza (do inglês *dynamic ultra micro hardness tester*), modelo Shimadzu DUH-211S, com um indentador Berkovich, segundo a norma ASTM E2546-15 (International 2015). As propriedades mecânicas foram obtidas pela análise dos dados de deslocamento de carga utilizando o método de Oliver e Pharr (Oliver and Pharr 1992), utilizando carga de 500 mN e calculando a média de dezesseis indentações. Os valores de dureza e de módulo de elasticidade foram obtidos diretamente do Software do equipamento.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Tabela 2 apresenta a nomenclatura, os resultados de espessura, dureza e módulo de elasticidade das camadas obtidas na boretção termoquímica do aço SAE 4140 com as misturas de 1%, 5% e 10% de B_4C e 1, 2 e 4 horas de tratamento.

Tabela 2 – Nomenclatura, quantidade, tempo de boretção, espessura, dureza e modulo de elasticidade das amostras boretadas.

Amostra	(% de B)	Tempo de boretção (horas)	Espessura (μm)	Dureza (GPa)	Módulo de Elasticidade – E (GPa)
1%B ₄ C_1	1,47	1	26 $\pm$ 3 (Fe_2B)	16,3 $\pm$ 0,4	309 $\pm$ 4
1%B ₄ C_2		2	39 $\pm$ 2 (Fe_2B)	17,2 $\pm$ 0,8	321 $\pm$ 7
1%B ₄ C_4		4	56 $\pm$ 8 (Fe_2B)	17,5 $\pm$ 0,4	328 $\pm$ 6
5%B ₄ C_1	4,95	1	29 $\pm$ 4 (Fe_2B)	16,9 $\pm$ 0,4	314 $\pm$ 3
5%B ₄ C_2		2	52 $\pm$ 2 (Fe_2B)	16,7 $\pm$ 0,7	320 $\pm$ 7
5%B ₄ C_4		4	63 $\pm$ 11 (Fe_2B)	17,1 $\pm$ 0,5	328 $\pm$ 6
10%B ₄ C_1	9,30	1	33 $\pm$ 2 (Fe_2B)	17,9 $\pm$ 0,7	319 $\pm$ 7
10%B ₄ C_2		2	62 $\pm$ 2 (Fe_2B) 11 $\pm$ 2 (FeB)	19,1 $\pm$ 0,7	365 $\pm$ 10
10%B ₄ C_4		4	89 $\pm$ 11 (Fe_2B) 23 $\pm$ 7 (FeB)	19,5 $\pm$ 0,4	374 $\pm$ 11

A Figura 1 apresenta as imagens obtidas por MEV das camadas obtidas na boretção termoquímica do aço SAE 4140 com as misturas de 1%, 5% e 10% de B_4C e 1, 2 e 4 horas de tratamento. As três condições resultaram em uma morfologia típica de dentes-de-serra, como mostra a Figura 1.

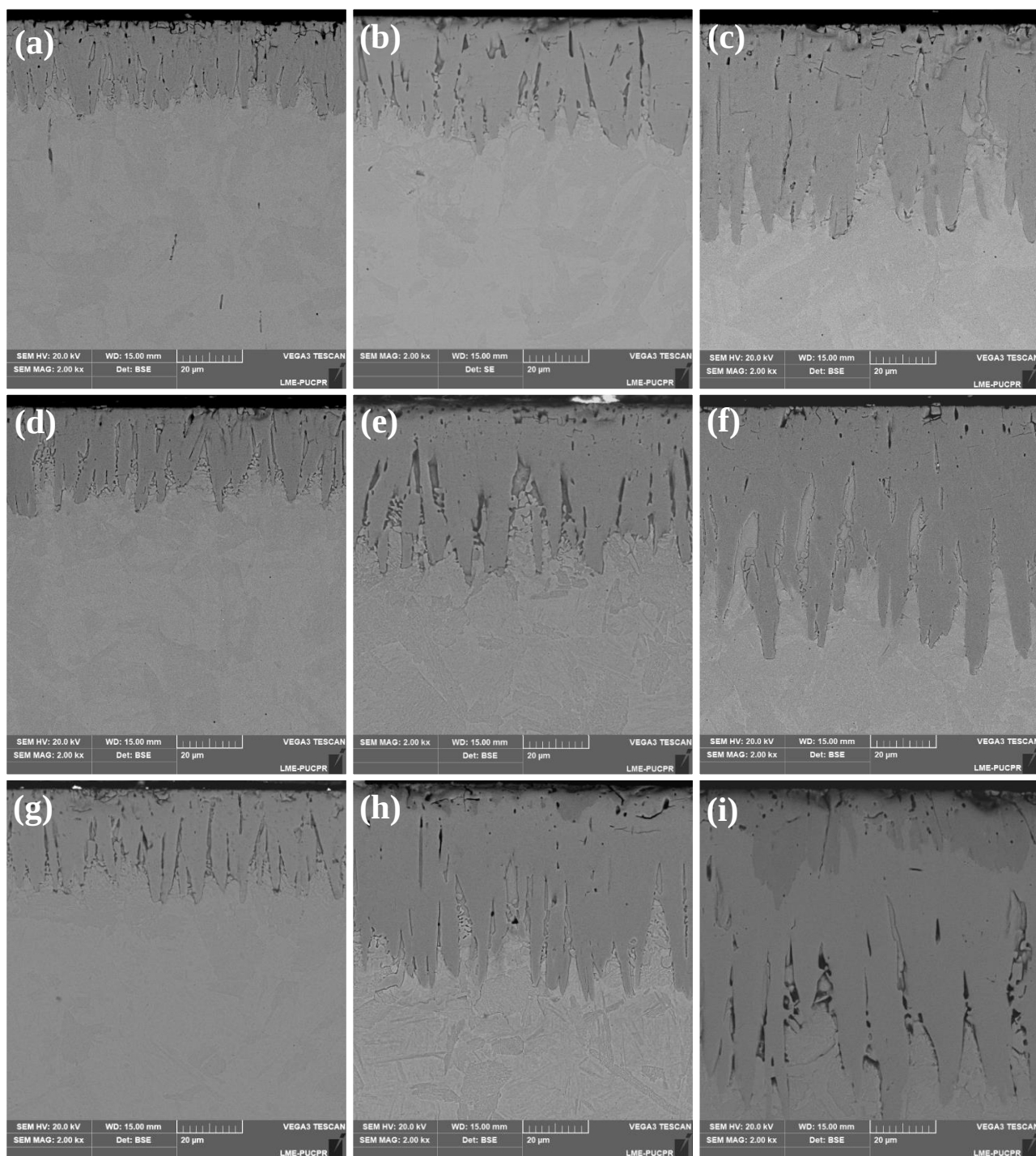


Figura 1. Imagens transversais das camadas boretadas em MEV, 2000x: (a) 1%B₄C_1, (b) 1%B₄C_2, (c) 1%B₄C_4, (d) 5%B₄C_1, (e) 5%B₄C_2, (f) 5%B₄C_4, (g) 10%B₄C_1, (h) 10%B₄C_2 e (i) 10%B₄C_4.

A espessura das camadas de boretos variou com o tempo de tratamento e com a quantidade de boro da mistura. Com uma hora de tratamento, não houve diferença significativa de espessura da camada de boretos para os três potenciais de boro, como mostra a Tabela 2 e Figura 2 (a). Com duas horas de tratamento, verificou-se diferença significativa da espessura das camadas, de forma que quanto maior a quantidade de boro da mistura, maior a espessura resultante. Com quatro horas de tratamento, essa diferença ficou ainda mais expressiva para uma quantidade de 9,30% de B (composição de 10% de B₄C). Uma maior quantidade significa uma maior disponibilidade de boro na superfície do aço, o que possibilitou uma camada de 89 µm para a amostra 10%B₄C_4. Porém, não houve diferença significativa entre as espessuras das camadas no tratamento de 4 horas para as amostras 1%B₄C_4 e 5%B₄C_4.

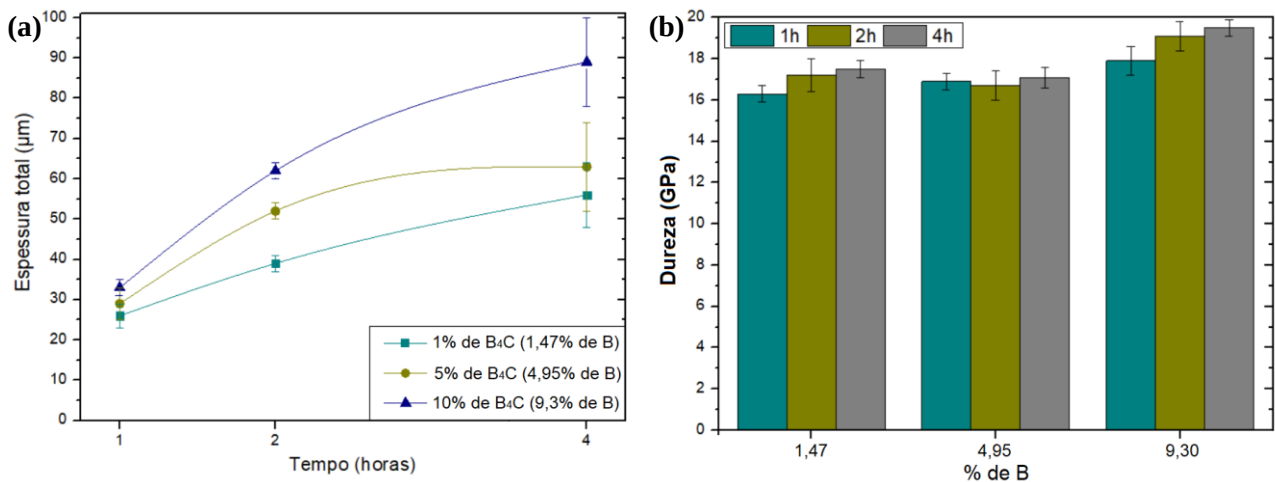


Figura 2. (a) Espessura (μm) e (b) dureza (GPa) das amostras boretadas com 1, 2 e 4 horas.

Os padrões de difração de raios-X (DRX) das camadas de boretos são apresentados na Figura 3:

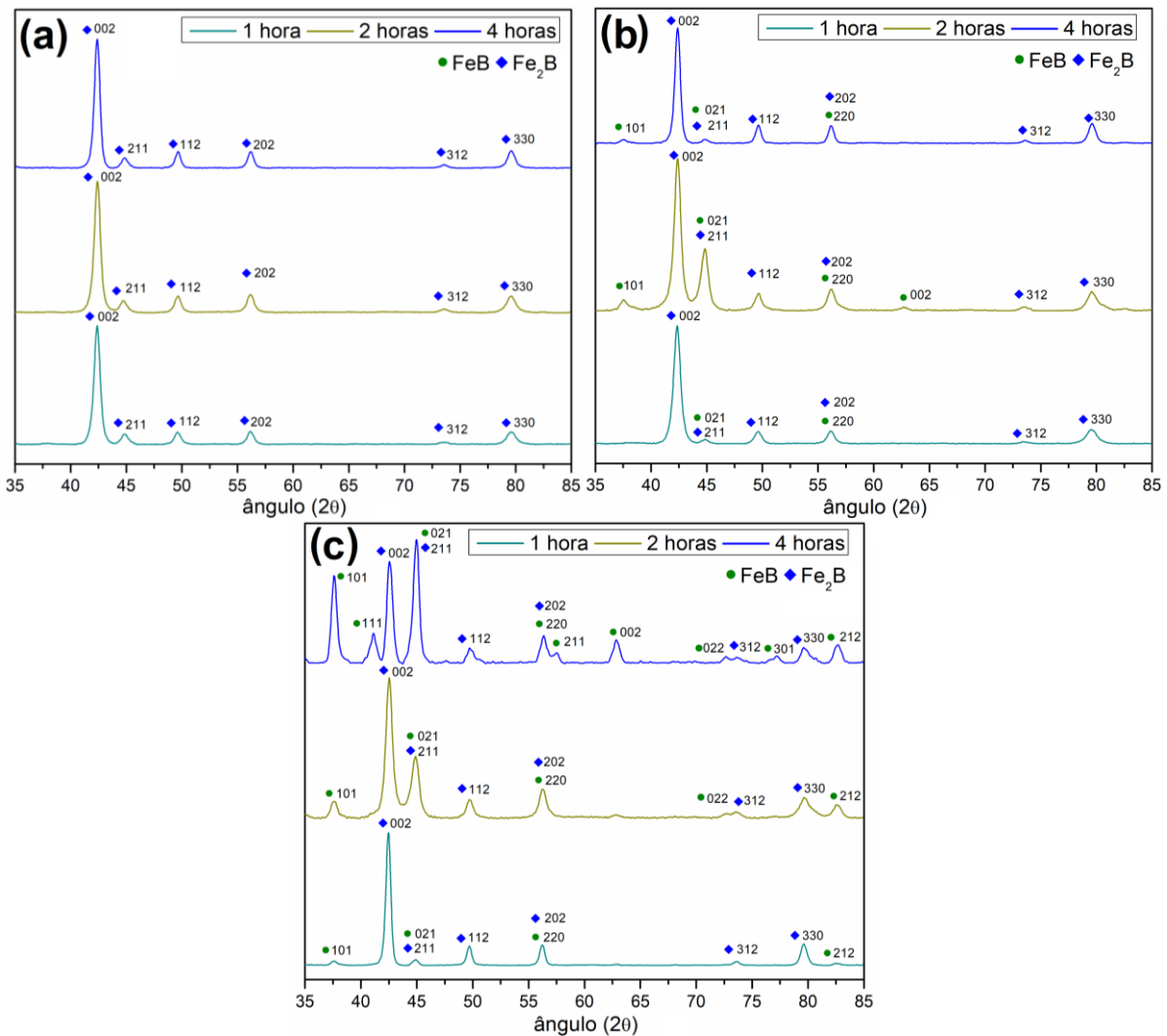


Figura 3. Padrões de difração DRX (a) 1% de B₄C (1,47% de B), (b) 5% de B₄C (4,95% de B) e (c) 10% de B₄C (9,30% de B).

Os padrões de difração de raios-X (DRX), na Figura 3 (a), mostram que 1,47% de B resultou em camadas monofásicas de Fe₂B, independentemente do tempo de boretação, o que pode ser também observado nas imagens das amostras transversais feitas em MEV, Figuras 1 (a), (b) e (c). Além disso, uma maior dureza e módulo de elasticidade foram

observados com o aumento do tempo de boretação de 1 para 2 horas, como mostram a Tabela 2 e Figura 2 (b), porém de 2 a 4 horas não houve aumento significativo de dureza e módulo.

Com o aumento da quantidade de boro para 4,95%, uma camada monofásica de Fe_2B foi observada para a boretação com 1 hora, Figura 3 (b), porém o difratograma aponta a formação de FeB nas amostras boretadas com 2 e 4 horas. Porém, as imagens feitas em MEV, Figura 1 (e) e (f), não possibilitam a visualização da camada de FeB , indicando que esta teria uma espessura muito pequena ou irregular. Isso resultou em uma dureza e módulo de elasticidade muito semelhantes às amostras boretadas com 1% de B_4C , como mostram a Tabela 2 e Figura 2 (b). Com um maior tempo de boretação, 4 horas, a camada de FeB formada durante as 2 horas de ensaio é então transformada em Fe_2B , mecanismo descrito por Yu et al. (2005) na Equação 5, e observado na redução dos picos de FeB no difratograma na Figura 3 (b). Isso ocorreu devido à redução do boro disponível na superfície do aço, de forma que o crescimento da camada de Fe_2B no tratamento de 4 horas originou-se dessa transformação de fases, o que explica as espessuras, dureza e módulo de elasticidade semelhantes nas amostras 1%B₄C_4 e 5%B₄C_4.

A maior quantidade de boro, 9,30 % de B, resultou em camadas bifásicas, Fe_2B e FeB , para os três tempos de boretação, o que confirma que a variação da quantidade de boro, como comentado anteriormente por Spence, Makhlof (2005), possui direta influência sobre as fases formadas. Além disso, a boretação com 9,30 % de B resultou em maior dureza e módulo de elasticidade dentre as amostras, como mostram a Tabela 2 e Figura 2 (b). Com o tratamento de 1 hora, porém, essa camada ainda não era espessa e homogênea o suficiente para ser observada em MEV, Figura 1 (g). Com o aumento do tempo de boretação, em 2 e 4 horas, houve crescimento das camadas de FeB e Fe_2B , possibilitando que a camada de FeB fosse visualizada em MEV, Figuras 1 (h) e (i), além de aumentar significativamente a dureza e módulo de elasticidade superficial das amostras. Isso indica que a disponibilidade de boro continuou alta o suficiente na mistura para possibilitar o crescimento da camada bifásica, de forma que se alcançou a maior espessura de camada dentre as amostras boretadas.

4. CONCLUSÕES

Este trabalho conseguiu controlar a microestrutura da camada boretada por meio do controle da composição e quantidade de boro da mistura boretante. A menor quantidade de boro (1,47% de B) resultou em camadas monofásicas (Fe_2B) em todas as condições. Uma maior quantidade de boro (9,30% de B) resultou em formação de camadas polifásicas (Fe_2B e FeB) em todas as condições, resultando em um aumento de dureza superficial. A quantidade intermediária de boro (4,95% de B) resultou em camada monofásica para a boretação com 1 hora e polifásica para os processos de boretação com 2 e 4 horas. Com 4 horas, há uma transformação de fase FeB em Fe_2B para essa amostra, devido à redução do boro disponível na mistura, e resultando em uma redução dos picos da fase FeB no difratograma desta amostra.

5. AGRADECIMENTOS

Este estudo foi financiado pela CAPES (Código Financeiro 001) e agência FINEP sob o contrato 01.10.0634. Os autores agradecem à empresa Fiven Brazil, pelo fornecimento do material e por apoiar esta pesquisa.

6. REFERÊNCIAS

- Aichholz, S. A. da Costa, M. Sostag Meruvia, P. C. Júnior Soares, and R. Diego Torres. 2018. "Tribocorrosion Behavior of Boronized AISI 4140 Steel." *Surface and Coatings Technology* 352: 265–72.
- Allaoui, O., N. Bouaouadja, and G. Sainderran. 2006. "Characterization of Boronized Layers on a XC38 Steel." *Surface and Coatings Technology* 201(6): 3475–82.
- Anthymidis, K. G., G. Stergioudis, and D. N. Tsipas. 2002. "Boride Coatings on Non-Ferrous Materials in a Fluidized Bed Reactor and Their Properties." *Science and Technology of Advanced Materials* 3(4): 303–11.
- Anthymidis, K. G., P. Zinoviadis, D. Roussos, and D. N. Tsipas. 2002. "Boriding of Nickel in a Fluidized Bed Reactor." *Materials Research Bulletin* 37(3): 515–22.
- Campos, I. et al. 2005. "Effect of Boron Paste Thickness on the Growth Kinetics of Fe_2B Boride Layers during the Boriding Process." *Applied Surface Science* 243(1–4): 429–36.
- Carbucicchio, M., and G. Palombarini. 1984. "Iron-Boron Reaction Products Depending on the Base Alloy Composition." *Journal of Materials Science Letters* 3: 1046–48.
- Carrera-Espinoza, R. et al. 2016. "Tribological Behavior of Borided AISI 1018 Steel under Linear Reciprocating Sliding Conditions." *Wear* 362–363: 1–7.
- International, ASTM. 2015. "ASTM E2546-15 - Standard Practice for Instrumented Indentation Testing." *ASTM Book of Standards* 1: 1–23.
- Jain, Vipin, and G. Sundararajan. 2002. "Influence of the Pack Thickness of the Boronizing Mixture on the Boriding of Steel." *Surface and Coatings Technology* 149(1): 21–26.
- Johnston, Jamin M., Paul Baker, and Shane A. Catledge. 2016. "Improved Nanostructured Diamond Adhesion on Cemented Tungsten Carbide with Boride Interlayers." *Diamond and Related Materials* 69: 114–20.

- <http://dx.doi.org/10.1016/j.diamond.2016.08.006>.
- Keddam, Mourad, and Sukru Taktak. 2017. "Characterization and Diffusion Model for the Titanium Boride Layers Formed on the Ti6Al4V Alloy by Plasma Paste Boriding." *Applied Surface Science* 399: 229–36. <http://dx.doi.org/10.1016/j.apsusc.2016.11.227>.
- Krelling, A. P., C. E. da Costa, J. C. G. Milan, and E. A. S. Almeida. 2017. "Micro-Abrasive Wear Mechanisms of Borided AISI 1020 Steel." *Tribology International* 111: 234–42. <http://dx.doi.org/10.1016/j.triboint.2017.03.017>.
- Kul, M. et al. 2016. "Effect of Boronizing Composition on Boride Layer of Boronized GGG-60 Ductile Cast Iron." *Vacuum* 126: 80–83.
- Kulka, M., N. Makuch, and M. Popławski. 2014. "Two-Stage Gas Boriding of Nisil in N₂-H₂-BCl₃ Atmosphere." *Surface and Coatings Technology* 244: 78–86.
- Li, Ping et al. 2018. "Surface Characterization and Diffusion Model of Pack Borided TB2 Titanium Alloy." *Ceramics International* 44(15): 18429–37.
- Makuch, N. et al. 2017. "Growth Kinetics and Some Mechanical Properties of Two-Phase Boride Layers Produced on Commercially Pure Titanium during Plasma Paste Boriding." *Thin Solid Films* 626: 25–37. <http://dx.doi.org/10.1016/j.tsf.2017.02.033>.
- Makuch, N., and M. Kulka. 2014. "Microstructural Characterization and Some Mechanical Properties of Gas-Borided Inconel 600-Alloy." *Applied Surface Science* 314: 1007–18.
- Mang, T., K. Bobzin, and T. Bartels. 2010. *Industrial Tribology: Tribosystems, Friction, Wear and Surface Engineering, Lubrication*. Wiley.
- Martini, C., G. Palombarini, and M. Carbucicchio. 2004. "Mechanism of Thermochemical Growth of Iron Borides on Iron." *Journal of Materials Science* 39(3): 933–37.
- Martini, C., G. Palombarini, G. Poli, and D. Prandstraller. 2004. "Sliding and Abrasive Wear Behaviour of Boride Coatings." *Wear* 256(6): 608–13.
- Oliver, W. C., and G. M. Pharr. 1992. "An Improved Technique for Determining Hardness and Elastic Modulus Using Load and Displacement Sensing Indentation Experiments." *Journal of Materials Research* 7(6): 1564–83.
- Petrova, R. S., N. Suwattananont, and V. Samardzic. 2008. "The Effect of Boronizing on Metallic Alloys for Automotive Applications." *Journal of Materials Engineering and Performance* 17(3): 340–45.
- Sen, Saduman, Ugur Sen, and Cuma Bindal. 2005. "The Growth Kinetics of Borides Formed on Boronized AISI 4140 Steel." *Vacuum* 77(2): 195–202.
- Sinha, Anil Kumar. 1991. "Boriding (Boronizing) of Steels." In *ASM Handbook. Volume 4: Heat Treating*, Materials Park, Oh, USA: ASM International, 978–1000.
- Spence, T. W., and M. M. Makhlof. 2005. "Characterization of the Operative Mechanism in Potassium Fluoborate Activated Pack Boriding of Steels." *Journal of Materials Processing Technology* 168(1): 127–36.
- Türkmen, İlyas, and Emre Yalamaç. 2018. "Growth of the Fe₂B Layer on SAE 1020 Steel Employed a Boron Source of H₃BO₃ during the Powder-Pack Boriding Method." *Journal of Alloys and Compounds* 744: 658–66.
- Yang, Haopeng, Xiaochun Wu, Guanghui Cao, and Zhe Yang. 2016. "Enhanced Boronizing Kinetics and High Temperature Wear Resistance of H13 Steel with Boriding Treatment Assisted by Air Blast Shot Peening." *Surface and Coatings Technology* 307: 506–16.
- Yu, L. G., X. J. Chen, K. A. Khor, and G. Sundararajan. 2005. "FeB/Fe₂B Phase Transformation during SPS Pack-Boriding: Boride Layer Growth Kinetics." *Acta Materialia* 53(8): 2361–68.

6. RESPONSABILIDADE PELAS INFORMAÇÕES

Os autores são os únicos responsáveis pelas informações contidas neste trabalho.