

INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DO RIO
GRANDE DO SUL - CAMPUS FELIZ

DÉBORA STEFANI MACIEL

**EFEITOS DA ADIÇÃO DE CARBETO DE SILÍCIO E DE ALUMÍNIO NA
BORETAÇÃO DE AÇO BAIXO CARBONO**

FELIZ

2022

DÉBORA STEFANI MACIEL

**EFEITOS DA ADIÇÃO DE CARBETO DE SILÍCIO E DE ALUMÍNIO NA
BORETAÇÃO DE AÇO BAIXO CARBONO**

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao curso de bacharelado em Engenharia Química do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Sul, como requisito parcial para obtenção do título de Bacharela em Engenharia Química.

Orientadora: Cíntia Gabriely Zimmer

Feliz

2022

DÉBORA STEFANI MACIEL

**EFEITOS DA ADIÇÃO DE CARBETO DE SILÍCIO E DE ALUMÍNIO NA
BORETAÇÃO DE AÇO BAIXO CARBONO**

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao curso de bacharelado em Engenharia Química do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Sul, como requisito parcial para obtenção do título de Bacharela em Engenharia Química.

BANCA EXAMINADORA

Prof. André Zimmer

Prof. Daiane Romanzini

ORIENTADORA

Prof. Cíntia Gabriely Zimmer

Feliz, 12 de julho de 2022.

AGRADECIMENTOS

Não seria possível começar esses agradecimentos de outra forma, pois devo à minha família minha eterna gratidão, não só por terem me apoiado durante toda essa jornada, mas por terem me dado o suporte emocional nos momentos mais difíceis. Mais especificamente, agradeço à minha mãe, Ivani Stefani e irmã, Daiane Stefani Maciel, por terem me motivado em toda a caminhada, vocês foram a minha rocha e o motivo de eu ter chegado até aqui. Agradeço ao meu namorado, Ismael José Kuhn, por toda a compreensão, por me ajudar das mais diversas formas e por estar comigo nos momentos mais difíceis. Agradeço ao meu dindo, Leonardo Ademir Stefani, por todo o apoio e motivação, sem ti, eu nunca teria dado o primeiro passo. Por fim, agradeço à minha avó querida, Maria Brochier Stefani, por sempre estar presente ao meu lado, me motivando e me ensinando a ver as coisas de forma mais otimista.

Agradeço também aos meus colegas de curso e amigos que durante esses 5 anos caminharam ao meu lado.

Gostaria de agradecer a todos os professores da instituição, mais especificamente à minha orientadora, Cíntia Gabriely Zimmer, por estar ao meu lado durante muito tempo, sendo professora, orientadora e amiga, sem você certamente minha jornada acadêmica seria completamente diferente. Cíntia, gostaria que soubesse que fostes mais que uma professora, fostes minha inspiração, obrigada por todos esses anos de parcerias e por todo o tempo que dedicastes a mim.

Gostaria de agradecer aos colaboradores do IFRS campus Feliz, que de alguma forma, contribuíram com o meu desenvolvimento ao longo dos anos.

É muito melhor lançar-se em busca de conquistas grandiosas, mesmo expondo-se ao fracasso, do que alinhar-se com os pobres de espírito, que nem gozam muito nem sofrem muito, porque vivem numa penumbra cinzenta, onde não conhecem nem vitória, nem derrota. - Theodore Roosevelt

RESUMO

A utilização de tecnologias que aumentam a durabilidade dos componentes metálicos, de modo a satisfazer as necessidades desejadas, está sendo cada vez mais requisitada no meio industrial. Para minimizar custos com manutenção e substituição de peças dos equipamentos, muitas vezes são realizados tratamentos termoquímicos com o intuito de melhorar as características superficiais dos componentes metálicos, contudo sem perder a tenacidade. Dentre esses tratamentos, pode-se citar a boretação, que consiste na difusão de boro através da matriz metálica, formando uma camada extremamente dura, capaz de aumentar a vida útil dos metais revestidos. O presente trabalho, tem como objetivo avaliar os efeitos da adição de carbeto de silício e alumínio na composição do banho boretante para o tratamento de aços baixo carbono. Os tratamentos termoquímicos ocorreram pela imersão de corpos de prova de aço baixo carbono em banho termo reativo constituído por bórax e testados com dois agentes redutores diferentes, o alumínio e o carbeto de silício. Avaliou-se diferentes proporções na composição do banho, sob temperatura de 950°C, durante 4 horas. Após o tratamento, as amostras foram preparadas metalograficamente e analisadas via análise microestrutural, microdureza, e rugosidade da camada formada. Verificou-se que o alumínio na proporção de 30 % é mais eficiente como aditivo no banho boretante.

Palavras-chave: Boretção. Aço baixo carbono. Dureza.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1- Formação de uma mono camada de Fe_2B com morfologia tipo dentes de serra, em tratamento de aço baixo-carbono.....	7
Figura 2- Formação de uma camada bifásica de boretos, constituída por Fe_2B e FeB , no aço M2.	8
Figura 3- Influência dos elementos de liga na formação da camada de boretos.	8
Figura 4- Tratamento com 70% bórax e 30% carbeto de silício	14
Figura 5- Tratamento com 70% bórax e 30% alumínio	15
Figura 6- Tratamento com 90% bórax e 10% carbeto de silício	16
Figura 7- Tratamento com 90% bórax e 10% alumínio	16
Figura 8- Tratamento com 75% bórax, 10% carbeto de silício e 15% alumínio	17
Figura 9- Tratamento com 75% bórax e 15% carbeto de silício e 10% alumínio	18
Figura 10- Perfil de dureza das amostras tratadas.....	19

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	1
1.1 Objetivos	2
1.1.1 Objetivo geral	2
1.1.2 Objetivos específicos	3
2 REVISÃO DA LITERATURA	4
2.1 Tratamento termoquímico	4
2.2 Boretação	4
2.3 Formação da camada	6
2.4 Fatores que influenciam na difusão	9
3 MATERIAIS E MÉTODOS	10
3.1 Materiais	10
3.2 Métodos	10
3.2.1 Boretação líquida	11
3.2.2 Determinação da variação da rugosidade	12
3.2.3 Preparo metalográfico	12
3.2.4 Microscopia óptica	12
3.2.5 Microdureza Vickers	12
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES	14
5 CONCLUSÕES	21
REFERÊNCIAS	22

1 INTRODUÇÃO

O aumento da competitividade do mercado atual traz consigo a busca incessante por materiais e componentes metálicos que tenham um melhor custo-benefício, unindo o valor do componente com suas características e sua durabilidade. Segundo Gentil (2011), processos que possam comprometer a durabilidade de materiais metálicos, afetando sua funcionalidade, causam prejuízos econômicos.

Portanto, a escolha dos materiais adequados para a fabricação dos componentes metálicos é fundamental, assim, deve-se pensar em alguns requisitos básicos que unem o desempenho do material para a função desejada, a disponibilidade desse no mercado, as suas propriedades e os custos de processo (RIBEIRO et al., 2018).

Muitas vezes, materiais com baixo custo não possuem todas as propriedades requeridas. Segundo Perini e Vilanova (2019), a boretação é capaz de conferir excelentes propriedades aos metais tratados, fato que justifica o aprofundamento do estudo das variáveis desse processo.

Pensando em escolher um metal abundante no mercado e que também tenha um preço de venda competitivo, o presente trabalho optou por utilizar aço baixo-carbono, e através do tratamento de boretação, conferir a esse aço um aumento da sua dureza superficial, gerando uma maior resistência ao desgaste desses componentes, aumentando assim o seu desempenho.

Aços baixo carbono são amplamente utilizados em componentes metálicos, entretanto, por ser considerado um aço suscetível às diversas formas de desgaste, faz-se necessário a aplicação de estudos relacionados à engenharia de superfície, que tem como principal objetivo melhorar as características desse metal (TLILI et al., 2016).

Dentro dessa área, pode-se estudar diferentes revestimentos e métodos capazes de proteger a superfície metálica, de modo a aumentar sua durabilidade. Os revestimentos podem ser depositados diretamente na superfície metálica, como tintas e esmaltes, ou esses revestimentos podem ser formados sobre a superfície, sendo

obtidos através de reações químicas que ocorrem entre o material e a superfície, como ocorre nos tratamentos de cromatização, fosfatização e a boretação (GENTIL, 2011).

Segundo Prince et al., (2018), os revestimentos podem ser formados sobre a superfície por meio do processo difusivo, que é um tipo de tratamento termoquímico onde ocorre a migração de um elemento químico, como boro, nitrogênio ou carbono, na superfície metálica.

Portanto, uma das formas de proteger as ligas de aço contra a corrosão associada ao desgaste abrasivo é a boretação, classificada como um processo termoquímico de endurecimento superficial que consiste na difusão de átomos de boro para dentro da matriz metálica original. A boretação também confere outras propriedades ao material, como redução do atrito e da aderência (SCARPIM, A. H. T.; FILHO, 2016).

A boretação pode ser realizada através de três diferentes vias, sendo elas: boretação gasosa, líquida ou sólida. As principais diferenças estão no estado físico dos reagentes e nos equipamentos usados (COSTA; MEI, 1988).

1.1 Objetivos

Os tópicos a seguir descrevem o principal propósito do presente trabalho, bem como as pequenas etapas que permitirão a realização deste.

1.1.1 Objetivo geral

O presente estudo tem como objetivo avaliar os efeitos da adição de carbeto de silício e alumínio na composição do banho boretante no tratamento de aços baixo carbono.

1.1.2 Objetivos específicos

- a) Avaliar os efeitos da composição do banho de sal, através de alteração nos percentuais de carbeto de silício e de alumínio, no aço 1020 e analisar as mudanças na rugosidade da camada formada;
- b) Analisar os efeitos da adição de carbeto de silício e de alumínio na microestrutura da camada formada;
- c) Avaliar a microdureza da camada formada em cada uma das diferentes composições de banho estudadas.

2 REVISÃO DA LITERATURA

O presente capítulo tem a finalidade de apresentar todos os conteúdos necessários para um que haja uma boa compreensão do tema, bem como, fornecer o embasamento teórico necessário para o desenvolvimento deste trabalho.

2.1 Tratamento termoquímico

Segundo Costa e Mei (1998), tratamentos termoquímicos referem-se aos processos que tem como objetivo a adição de carbono, nitrogênio ou boro, através do processo difusivo, para a superfície do aço. A difusão desses elementos ocorre com maior eficiência em temperaturas elevadas, que variam entre 500 a 1000°C.

Os tratamentos termoquímicos são amplamente utilizados quando o objetivo principal for o aumento da dureza superficial do metal base ao mesmo tempo em que o núcleo se mantém dúctil. O aumento da dureza superficial gera um aumento na resistência ao desgaste do material (COSTA; MEI, 1998).

Dentre os tratamentos existentes que visam o endurecimento superficial, pode-se citar a cementação, nitretação, cianetação, carbonitretação e boretação, tendo como característica a difusão de carbono, nitrogênio, cianeto, carbono e nitrogênio, e boro, respectivamente (COSTA; MEI, 1998).

A efetividade do tratamento termoquímico depende do potencial de disponibilização do elemento no meio. Pode ocorrer por via sólida, líquida ou gasosa, dependendo do estado do reagente no momento do tratamento. Além da disponibilidade do elemento, também deve-se considerar a capacidade de absorção do elemento químico no metal, que varia com a solubilidade e difusividade do elemento no aço (COSTA; MEI, 1998).

2.2 Boretção

A boretação é caracterizada pelo enriquecimento da superfície do aço através da difusão de átomos de boro, gerando uma camada de boretos de ferro. Essa camada pode ser constituída apenas por Fe₂B (monocamada) ou por uma dupla

camada, constituída por Fe_2B e FeB . Essas camadas possuem microdureza extremamente elevada, grande resistência a corrosão por ácidos inorgânicos como o ácido clorídrico, sulfúrico e fosfórico, pode ser aplicada em aço carbono, baixa liga (exceto aços com liga de alumínio ou os que possuem mais de 1 % de silício), ferramenta e inoxidável (COSTA; MEI, 1988).

A boretação é um tratamento superficial que pode ser feito por diversas vias: sólida, em pasta, líquida, gasosa e plasma. A boretação sólida é considerado o meio de tratamento mais utilizado, devido à facilidade de manuseio, segurança e possibilidade de alteração na composição da mistura de pó boretante, esse pó é constituído por três componentes, a fonte de boro, o diluente e o ativador (SINHA, 1991).

Como fonte de boro, comumente utiliza-se carboneto de boro, ferrobora ou boro amorfo. Como diluente inerte, pode-se utilizar substâncias como carboneto de silício ou alumina. Nesse processo existe a necessidade da utilização de ativadores, que podem ser cloreto de amônio, carbonato de sódio, tetrafluoroborato de potássio, entre outros. Também pode-se optar por utilizar um pó boretante comercial, como o Ekabor, por exemplo. O pó deve ser descartado após 5 ou 6 ciclos. Tem como vantagem a simplicidade do processo, é um método seguro que utiliza equipamentos simples, a principal desvantagem da Boretação sólida é o alto custo dos compostos de boro (SINHA, 1991; SILVA; MEI, 2010).

A boretação em pasta é utilizada quando é necessário tratar peças grandes ou quando se deseja realizar a Boretação parcial do componente. Nesse processo, uma pasta composta por uma mistura de pó boretante com um agente de ligação, como nitrocelulose dissolvida em acetato de butila, por exemplo, é aplicada repetidamente sobre a superfície que deve ser tratada, por meio de escovação ou pulverização e em seguida, as amostras são tratadas em forno com atmosfera protetora, que pode ser argônio ou nitrogênio (SINHA, 1991).

A boretação líquida é realizada a partir de um banho de sal fundido, composto por uma fonte de boro e um agente redutor, que podem ser, por exemplo, bórax e B_4C ou alumínio. A temperatura do tratamento em ligas ferrosas pode variar entre 800°C à 1050°C (SINHA, 1991; COSTA; MEI, 1988). Também pode ocorrer por meio eletrolítico, onde o componente ferroso se comporta como o cátodo e um anodo de

grafite são imersos em bórax eletrolítico fundido, em temperatura à cima de 900°C por 4 horas, mediante o emprego de uma corrente de 0,15 A/cm². Os componentes tratados são resfriados ao ar. Esse método, produz uma camada fina e uniforme, em aços baixo carbono, em pouco tempo. Quando deseja-se tratar aços de alta liga ou de maior espessura, é necessário um tempo maior (SINHA, 1991).

A grande vantagem da boretação líquida é a simplicidade do processo e a utilização de sais não tóxicos. As principais limitações é a dificuldade de remoção do excesso de sal do componente tratado, difícil automação do processo e tempo longo de tratamento (SINHA, 1991; SILVA; MEI, 2010).

A boretação gasosa utiliza misturas de diborano, boro haleto ou gás composto orgânico de boro. Devido ao alto custo de processamento, esse tratamento é aplicado apenas para o tratamento de titânio e suas ligas, tem como principal dificuldade os altos custos de processo e a grande toxicidade dos componentes gasosos, além do alto risco de explosão (SINHA, 1991; SILVA; MEI, 2010).

Por fim, tem-se a boretação a plasma, que é o processo que utiliza um plasma formado por diborano e gás hidrogênio ou tetracloreto de boro e os gases hidrogênio e argônio. Pode ser aplicado em uma vasta variedade de aços em temperaturas baixas (600°C), e tem como principais vantagens a facilidade de controle do processo, que permite ajustar a composição e a profundidade da camada formada, além da redução de temperatura de tratamento, que gera economia de energia e de consumo de gás. Entretanto, esse processo não possui aplicação industrial devido a extrema toxicidade da atmosfera gasosa utilizada no processo (SINHA, 1991).

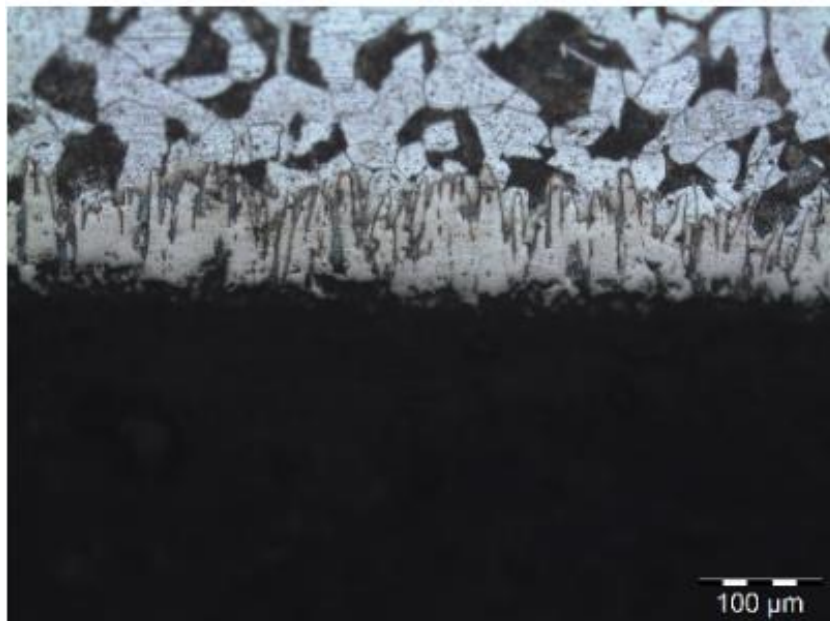
2.3 Formação da camada

Como mencionado anteriormente, a camada pode ser monofásica, formada por Fe₂B ou bifásica, formada por FeB e Fe₂B. A formação de uma monocamada costuma ser mais desejável devido a sua maior tenacidade. Uma camada constituída pelas duas fazes se torna mais frágil, uma vez que sua tenacidade é aproximadamente quatro vezes menor em relação à monocamada (OZBEK; BINDAL, 2002; SEN; SEN, 2003).

A formação de uma camada monofásica ou bifásica está diretamente relacionada com os elementos de liga do material e com a composição do banho boretante. A difusão do boro resulta em uma camada com morfologia “dentes de serra”, Figura 1, característica para metais como ferro puro, aços baixo carbono e aços baixa liga. Quando o tratamento é realizado em aços mais ligados ou com maior teor de carbono, existe a formação de uma mais regular e lisa, Figura 2. Isso ocorre pois o aumento de carbono ou de elementos de liga dificultam o crescimento da camada, Figura 3, pois agem como uma barreira para a difusão (SINHA, 1991).

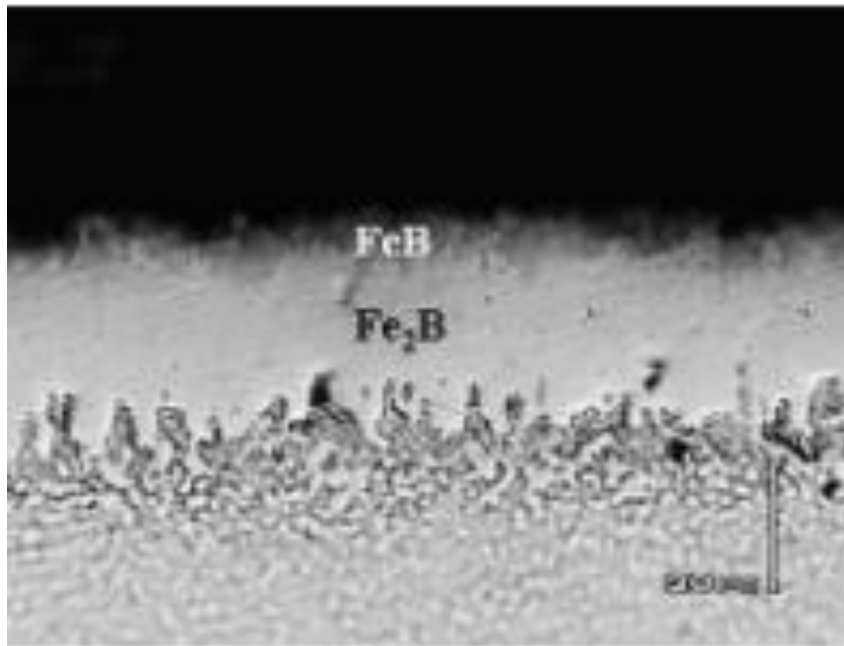
Segundo Mariani (2014), a boretação pode produzir um aumento de até oito vezes na dureza superficial do metal tratado, quando comparado ao mesmo metal sem o tratamento.

Figura 1- Formação de uma mono camada de Fe_2B com morfologia tipo dentes de serra, em tratamento de aço baixo-carbono.



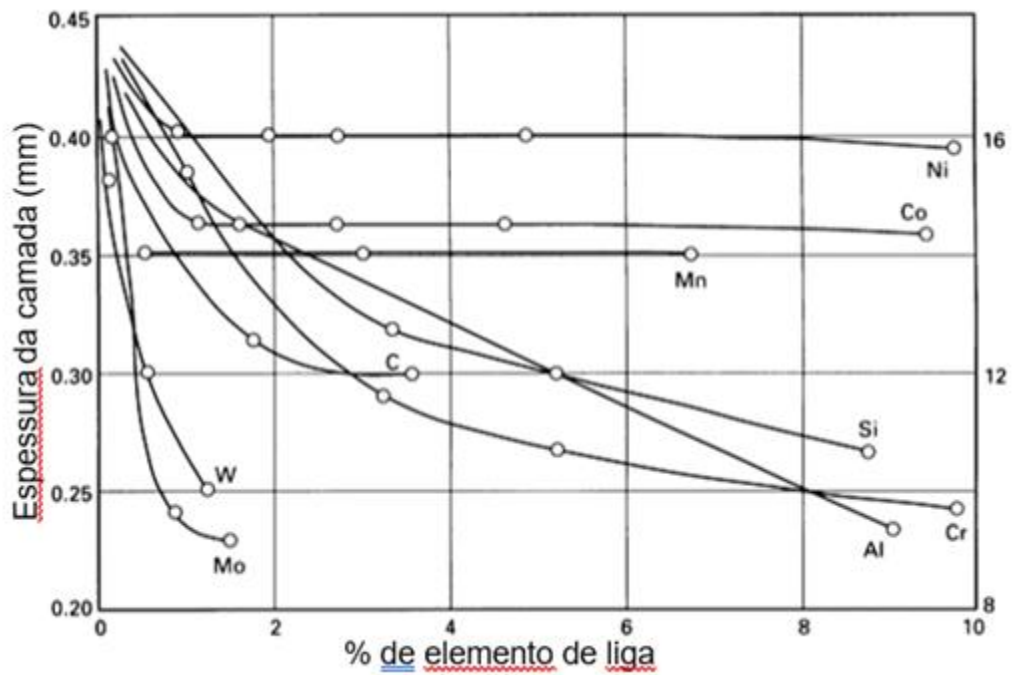
Fonte: POLLNOW et al., (2017).

Figura 2- Formação de uma camada bifásica de boretos, constituída por Fe_2B e FeB , no aço M2.



Fonte: CAMPOS et al., (2007).

Figura 3- Influência dos elementos de liga na formação da camada de boretos.



Fonte: SINHA (1991).

2.4 Fatores que influenciam na difusão

A velocidade da difusão está diretamente relacionada com a temperatura do processo. O coeficiente de difusão (D) pode ser relacionado com a temperatura de acordo com a equação de Arrhenius,

$$D = D_0 \exp\left(-\frac{Q}{RT}\right)$$

onde Q é a energia de ativação (cal/mol ou J/mol); R é a constante dos gases e T é a temperatura em K; D₀ é o valor do coeficiente de difusão quando a temperatura tende ao infinito. Os valores de D₀ e Q são tabelados.

Quando a temperatura de um material está elevada o suficiente para que a energia térmica dos átomos supere a barreira da energia de ativação, o fluxo de átomos se torna mais elevado, fazendo com que a difusão ocorra com maior facilidade. Outro fator, além da temperatura, que influencia fortemente no processo difusivo é o tempo de difusão, , quanto maior o tempo de tratamento maior as chances de uma distribuição com concentração mais uniforme (ASKELAND, 2019).

Além desses fatores, a difusão ainda depende da quantidade de elementos de liga presentes no material e da sua estrutura cristalina (CAMPOS et al., 2006). Para estruturas cristalinas mais compactas, a difusão é mais lenta, quando comparado com a difusão em materiais de estrutura menos compacta (ASKELAND, 2019).

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo, serão apresentados os materiais previstos para o desenvolvimento do tratamento termoquímico, bem como a descrição detalhada da metodologia a ser realizada.

3.1 Materiais

Para a realização do trabalho, foram utilizados 6 corpos de prova de aço SAE 1020 (aço baixo-carbono), cortadas em formato cilíndrico, com área superficial de aproximadamente 1 cm², adquiridos já cortados.

A limpeza desses corpos de prova foi realizada no banho ultrassônico da marca Limp Sonic (modelo LS-3D) e a secagem foi realizada com secador comum.

Para o preparo dos corpos de prova foram utilizadas lixas d'água de granulometrias 80, 120, 220, 320, 400, 600, 1200, 1500 e 2000. O polimento ocorreu na politriz da marca Teclago (PL02 ED) e polidas com pasta diamantada 4 µm (MC Diamond).

Os reagentes utilizados nos tratamentos foram: tetraborato de sódio Decahidratado, bórax, (Êxodo Científica), carbeto de silício em pó e papel alumínio. O tratamento foi realizado em forno tipo mufla (Jung).

Os seguintes equipamentos foram utilizados para a realização das análises: rugosímetro portátil Digimes (modelo 400.200), microscópio óptico Opton (modelo TNM-07T-PL); microdurômetro digital Pantec (modelo: MV 2000A).

3.2 Métodos

Os tópicos a seguir detalharão a metodologia utilizada para cada uma das etapas do tratamento.

3.2.1 Boretação líquida

O corpo de prova (aço 1020), já cortado, foi limpo em banho ultrassônico, utilizando acetona, pelo tempo necessário e seco em seguida.

O tratamento de boretação foi realizado em banho de bórax, para isso com o forno já aquecido, foi adicionado uma parcela do bórax no cadinho, após sua fusão, adicionou-se o restante. Após a fusão da quantidade suficiente de bórax, adicionou-se o agente redutor, agitando a mistura para que ela se tornasse homogênea. Só então, o corpo de prova foi colocado no cadinho e levada à mufla, já aquecida, durante o tempo determinado de processo (HUNGER, B. V. C.; MAKITA, 2015).

Ao término do tratamento, as amostras foram resfriadas em óleo. Em seguida, foi feita a imersão do corpo de prova em água fervente durante aproximadamente 15 minutos para a remoção dos resíduos de bórax (HUNGER, B. V. C.; MAKITA, 2015).

Os corpos de prova foram submetidos ao tratamento à 950°C, durante 4 horas, variando entre 6 composições diferentes para a formulação do banho, conforme descrito no quadro 1, abaixo:

Quadro 1 - Formulação dos banhos

#	Bórax (% massa)	SiC (% massa)	Al (% massa)
1	70	30	0
2	70	0	30
3	90	10	0
4	90	0	10
5	75	10	15
6	75	15	10

As condições de temperatura e tempo foram escolhidas com base na compilação de dados de outros artigos, que realizaram o tratamento em via líquida, tanto em aços carbono quanto em aços ligados. Já para a escolha da composição dos banhos, o agente boretante escolhido foi o bórax por ser amplamente utilizado para

tratamentos em meio líquido. Para a escolha dos reagentes redutores foi levado em consideração estudos que utilizaram alumínio ou carbeto de silício, devido aos bons resultados, optou-se por basear o estudo envolvendo a variação de ambos nos banhos, de modo a verificar quais seriam os seus efeitos no tratamento do aço baixo carbono. Todos esses parâmetros foram baseados em estudos como os realizados por (Costa; Mei, 1988; Krelling et al., 2019; Perini, M.; Vilannova, 2019; Sinha, 1991)

3.2.2 Determinação da variação da rugosidade

Para a determinação da variação da rugosidade dos corpos de prova, foi realizado a medição da rugosidade inicial de cada corpo de prova, antes do tratamento termoquímico e, ao fim do tratamento, após a limpeza do corpo de prova, foi realizada a medição final da rugosidade.

3.2.3 Preparo metalográfico

Os corpos de prova secos foram ser embutidos com resina nos moldes. Após secagem da resina, o molde foi removido e os corpos de prova foram lixados com a utilização de lixas d'água de granulometria: 80, 120, 220, 320, 400, 600, 1200, 1500 e 2000. Em seguida, os corpos de prova foram polidos com auxílio de uma politriz utilizando pasta de diamante. Após polidas, as amostras foram submetidas ao ataque químico, com solução de Nital 10 %, seguido de lavagem com álcool e secagem com secador (PEREIRA, 2013).

3.2.4 Microscopia óptica

Após o preparo metalográfico, os corpos de prova são analisados no microscópio óptico, para a visualização da camada formada e registro da sua imagem (PEREIRA, 2013).

3.2.5 Microdureza Vickers

O ensaio ocorreu no modo de perfil de dureza na seção transversal, utilizando um microdurômetro com carga de 0,49 N. A endentação foi feita partindo da borda da

camada formada em direção ao centro da amostra (substrato) (HUNGER, B. V. C.; MAKITA, 2015).

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

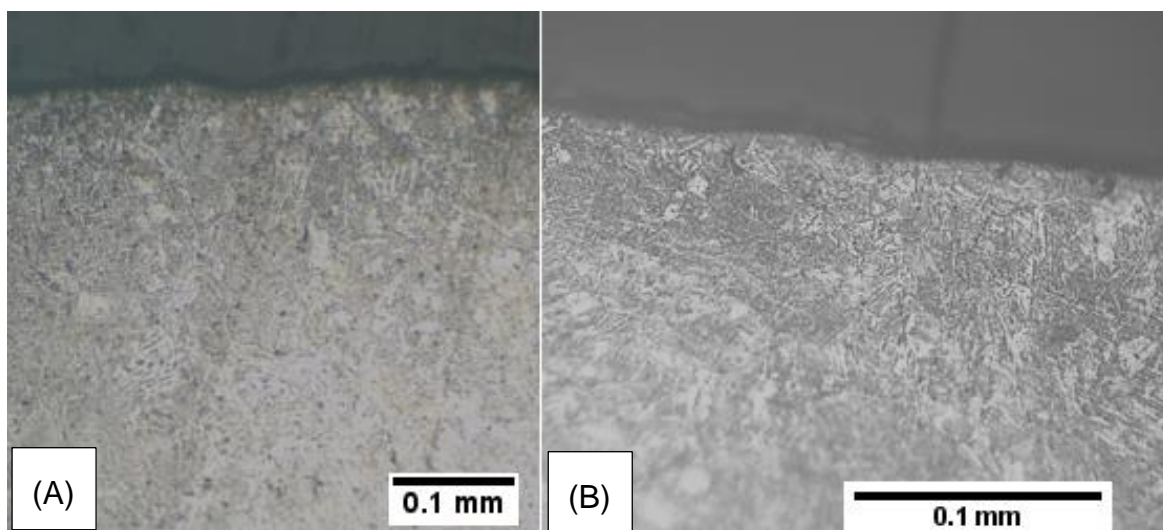
Para o tratamento realizado em corpos de prova de aço baixo carbono à 950 °C, foram realizadas 6 variações de formulação nos banhos boretantes, conforme descrito no tópico 3.1. A avaliação microestrutural e a dureza de cada tratamento será discutida a seguir.

4.1 Tratamentos termoquímicos

A Figura 4 apresenta a microestrutura do tratamento realizado com a composição nº 1, composto com 70 % bórax e 30 % carbeto de silício. A imagem (A) está sendo reproduzida com um aumento de 100x e a imagem (B) com um aumento de 400x. A avaliação microestrutural do corpo de prova não demonstra a formação de camada de boretos.

O tratamento realizado com Bórax 70 % + SIC 30 % teve um aspecto visual liso e sem formação de óxidos, tendo um aumento na sua rugosidade de 0,054 para 0,563 μm ao final do tratamento.

Figura 4- Tratamento com 70 % bórax e 30 % carbeto de silício

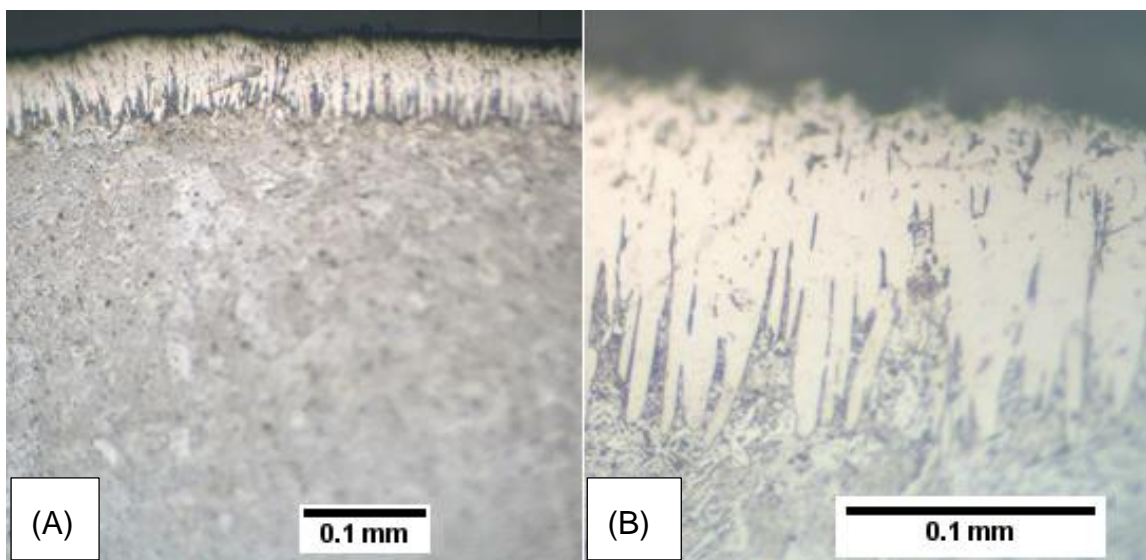


Fonte: A autora (2022).

A Figura 5 apresenta a microestrutura do tratamento realizado com a composição nº2, composto por 70 % bórax e 30 % alumínio. A imagem (A) está sendo reproduzida com um aumento de 100x e a imagem (B) com um aumento de 400x. A avaliação microestrutural do corpo de prova demonstra a formação de uma camada de boretos do tipo dentes de serra, como previsto por Pollnow et al., (2017).

Esse tratamento gerou um corpo de prova com aspecto visual liso e com pouca oxidação, tendo um aumento na sua rugosidade de 0,098 para 1,80 μm ao final do tratamento.

Figura 5- Tratamento com 70 % bórax e 30 % alumínio

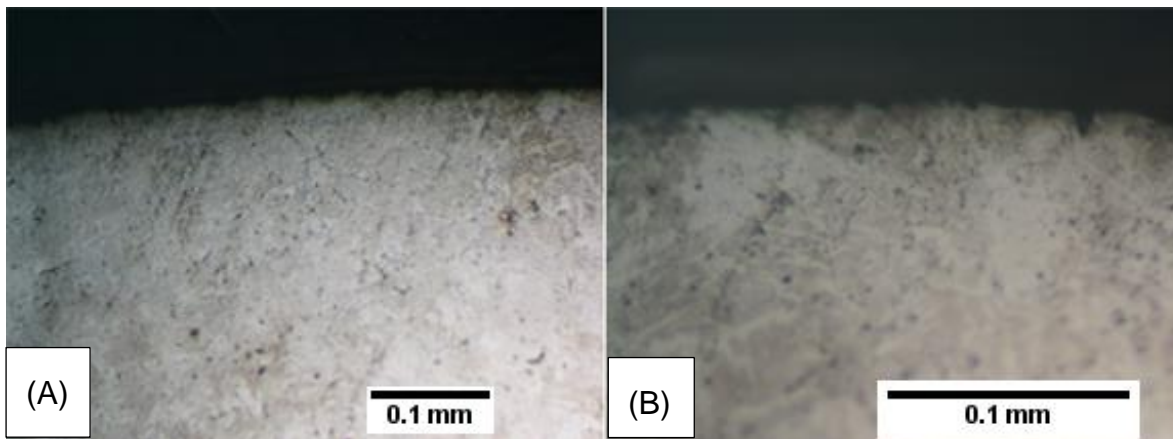


Fonte: A autora (2022).

A Figura 6 apresenta a microestrutura do tratamento nº 3, composto por 90 % bórax e 10 % carbeto de silício, em um aumento de 100x (A) e 400x (B). A avaliação microestrutural não indica a formação de uma camada de boretos.

Esse tratamento resultou em um corpo de prova com um aspecto visual liso e com pouca oxidação, tendo um aumento na sua rugosidade de 0,059 para 0,335 μm ao final do tratamento.

Figura 6- Tratamento com 90 % bórax e 10 % carbeto de silício

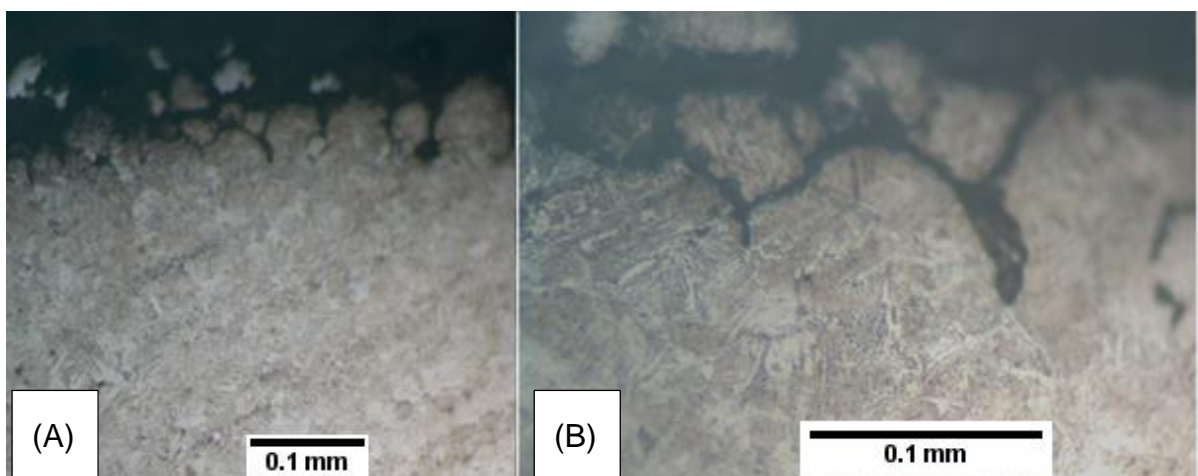


Fonte: A autora (2022).

A Figura 7 mostra a microestrutura do tratamento realizado com a composição nº 4, composto por 90 % bórax e 10 % alumínio, em um aumento de 100x (A) e 400x (B). A avaliação microestrutural mostra a formação de uma camada porosa e com trincas, porém, não indica a formação morfológica de uma camada de boretos.

Esse tratamento resultou em um corpo de prova com aspecto visual poroso e com pouca oxidação, tendo a rugosidade inicial em $0,058 \mu\text{m}$ e indeterminada ao final do tratamento, por ultrapassar o limite máximo de sensibilidade do equipamento.

Figura 7- Tratamento com 90 % bórax e 10 % alumínio

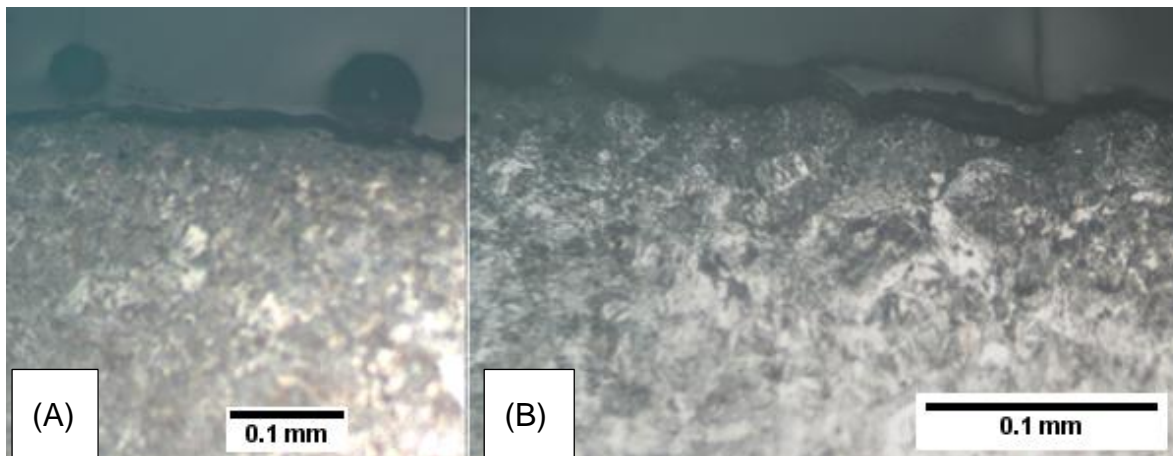


Fonte: A autora (2022).

A Figura 8 apresenta a microestrutura do tratamento realizado com a composição nº 5, composto por 75 % bórax, 10 % carbeto de silício e 15 % alumínio, em um aumento de 100 e 400x (imagens A e B, respectivamente). A avaliação microestrutural mostra a formação de uma camada porosa, porém, não indica a formação de uma camada de boretos.

Esse tratamento resultou em um corpo de prova com aspecto visual poroso e com pouca oxidação, tendo um aumento na sua rugosidade de 0,051 μm e indeterminada ao final do tratamento.

Figura 8- Tratamento com 75 % bórax, 10 % carbeto de silício e 15 % alumínio

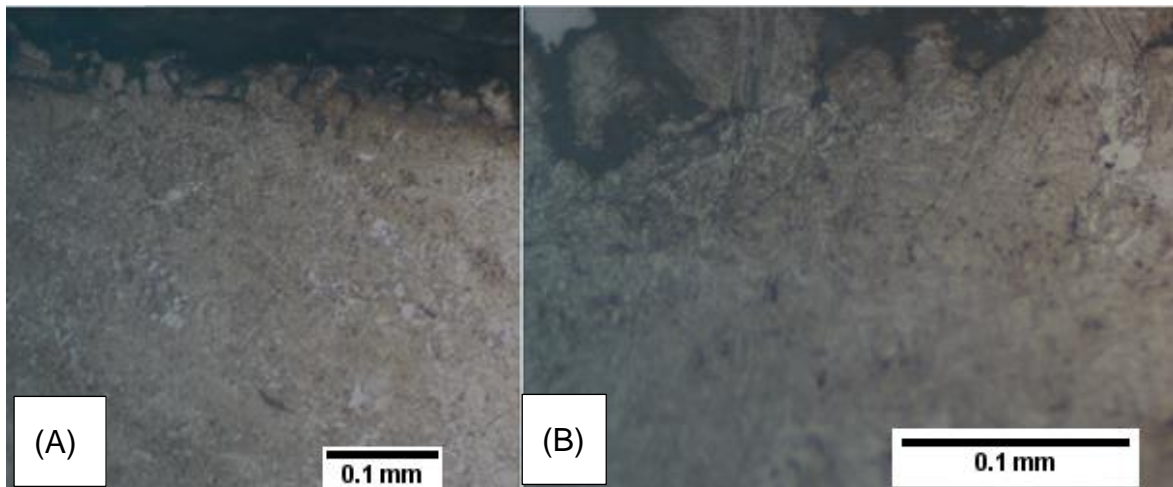


Fonte: A autora (2022).

A Figura 9 demonstra a microestrutura do tratamento realizado com a composição nº 6, composto por com 75 % bórax, 15 % carbeto de silício e 10 % alumínio, em um aumento de 100 e 400x (imagens A e B, respectivamente). A avaliação microestrutural demonstra a formação de uma camada porosa e com trincas, porém, não indica a formação de uma camada de boretos.

A amostra nº 6 teve um aspecto visual poroso e oxidado, tendo uma rugosidade inicial de 0,042 μm , a rugosidade final não pode ser medida por ultrapassar o limite máximo de capacidade do equipamento.

Figura 9- Tratamento com 75 % bórax e 15 % carbeto de silício e 10 % alumínio



Fonte: A autora, 2022.

Ao analisar a microestrutura de todas as 6 variações de tratamento percebe-se que houve uma modificação microestrutural no substrato, que é dada através da formação de martensita, que é gerada através do resfriamento rápido, realizado em óleo. Esse tipo de resfriamento configura um processo de têmpera, que, por sua vez, também confere um aumento de dureza ao metal (GRAZZIOTIN et al., 2021).

A Figura 10 representa graficamente o perfil de dureza dos corpos de prova tratados com cada uma das 6 diferentes composições dos banhos.

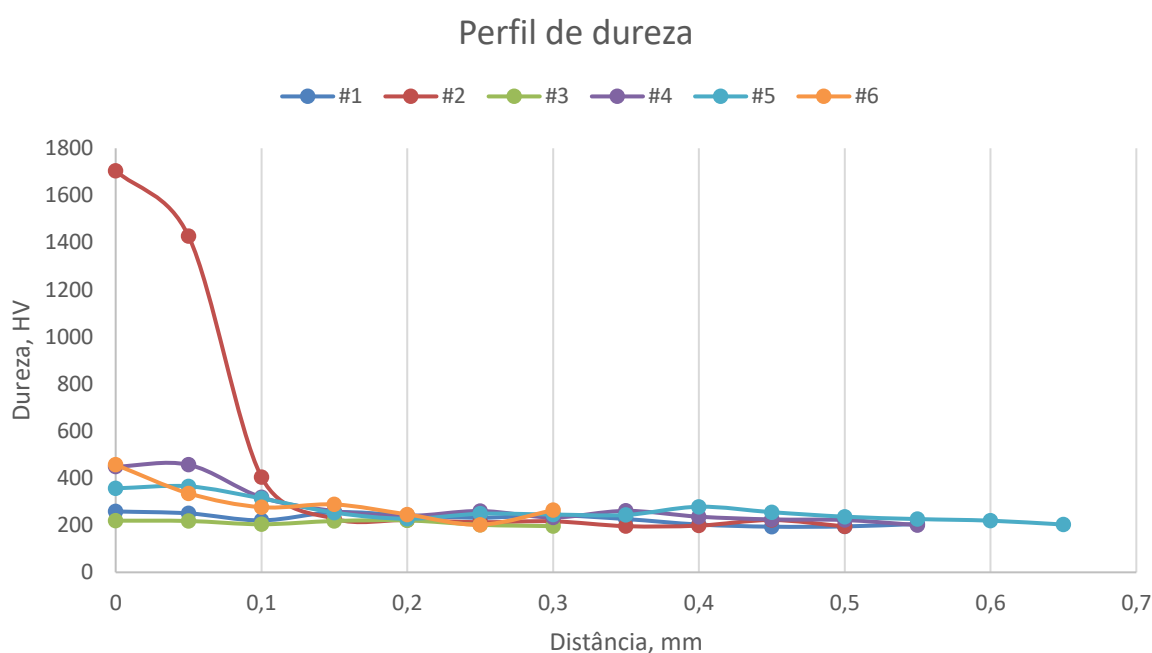
Ao analisar os resultados, percebe-se que apenas o corpo de prova nº2 (tratado com 70 % bórax e 30 % alumínio) teve um aumento expressivo na sua dureza superficial, que inicialmente estava em torno de 200 HV (no núcleo) e passou para 1704,7 HV (na superfície mais externa), passando para 1424 HV em 0,0 5mm e 404 HV em 10 mm de camada, antes de estabilizar em torno dos 200 HV.

Os corpos de prova nº 4 e 6 tiveram um leve aumento na sua dureza superficial, passando de 200 HV (no núcleo) para 456 HV na (na camada mais externa), também é possível perceber que a amostra tratada com a formulação nº 4 manteve a dureza aumentada por 0,05 mm, ao contrário do tratamento nº 6, que decaiu a dureza já nos primeiros 0,05 mm.

O tratamento nº 5 teve a dureza na camada mais externa levemente aumentada, indo de 200 HV no núcleo para 356,6 HV na camada mais externa, essa dureza se manteve nos primeiros 0,05mm de camada e depois estabilizou no valor de dureza médio do núcleo, de 200 HV.

As variações da composição de tratamento nº 1 e 3 não tiveram variação significativa na dureza superficial.

Figura 10- Perfil de dureza das amostras tratadas



Fonte: A autora (2022).

Ao analisar todos os perfis de dureza, pode-se verificar que apenas a formulação nº 2 resultou em um aumento de dureza significativo (em 1704,7 HV), valor esse que vai de encontro com o esperado, segundo Mariani (2014), que indica um aumento de 8x na dureza do metal boreado.

Os demais tratamentos não apresentaram aumentos significativos na dureza, porém, percebe-se que todas as amostras de prova que foram tratadas utilizando alumínio no banho produziram algum aumento de dureza superficial, em contrapartida,

formulações que continham apenas carvão de sílcio não apresentaram aumento algum.

5 CONCLUSÕES

Ao realizar os tratamentos termoquímicos com cada uma das 6 variações de composição propostas, pode-se observar que os corpos de prova tratados com as formulações 1, 2 e 3 (adição de 30 % SiC, 30 % Al ou 10 % SiC, respectivamente) obtiveram aumento pouco significativo na sua rugosidade, levando então à formação de uma camada superficial mais lisa.

Já, os corpos de prova tratados com as formulações 4, 5 e 6 (adição de Al 10 %, Sic 10 % e Al 15 % ou SiC 15 % e Al 10 %, respectivamente) obtiveram um aumento elevado na rugosidade, ultrapassando o limite de leitura do equipamento, demonstrando que o tratamento resultou na formação de camadas de maior porosidade.

Ao compilar os resultados microestruturais com os perfis de dureza obtidos, pode-se confirmar que a única amostra que apresentou a formação de uma camada de boretos foi o corpo de prova tratado com a composição nº2 (bórax 70 % e Al 10 %). Conforme a sua morfologia, dentes de serra, acredita-se que a camada formada tenha sido uma mono camada constituída por Fe_2B .

Comparando apenas os resultados de perfil de dureza obtidos, conclui-se que formulações apenas com carbeto de silício e bórax não produziram aumento na dureza superficial. Em contra partida, todos os banhos que contiveram alumínio em sua composição geraram algum aumento na dureza superficial, sendo o melhor resultado obtido com a concentração de 30 % de alumínio no banho.

Para trabalhos futuros, sugere-se que seja realizada uma análise de difração de raios-x para comprovar a composição química da camada de boretos formada.

REFERÊNCIAS

ASKELAND, Donald R. **Ciência e engenharia dos materiais**. 3 ed. São Paulo Cengage Learning 2019 1 recurso online ISBN 9788522128129.

CAMPOS, I. et al. **Evaluation of boron mobility on the phases FeB, Fe₂B and diffusion zone in AISI 1045 and M2 steels**. Applied Surface Science, v. 253, n. 7, p. 3469–3475, 2007.

COSTA, A. L. DA; MEI, P. R. **Acos e Ligas Especiais**. 2. ed. São Paulo: 1988, 1988.

GENTIL, Vicente. **Corrosão**. 6. Rio de Janeiro LTC 2011 1 recurso online ISBN 978-85-216-1944-4.

GRAZZIOTIN, F. et al. Influência dataxa de resfriamentono processo de boretação em aço 0,4%C. **Brazilian Journal of Development**, v. 7, n. 3, p. 20642 - 20652, 2021.

MARIANI, F. E. (2014). **Tratamentos térmicos e termiquímicos de boroaustêmpera em ferros fundidos nodulares e caracterização dos produtos resultantes**. <https://doi.org/10.1038/132817a0>

HUNGER, B. V. C.; MAKITA, F. Y. **Avaliação do potencial do aço AISI H13 endurecido por tratamento termo-reativo de boretação como ferramenta de corte**. [s.l.] Universidade tecnológica federal do Paraná, 2015.

KRELLING, A. P. et al. **Microabrasive wear behavior of borided steel abraded by**

SiO 2 particles. Journal of Materials Research and Technology, v. 8, n. 1, p. 766–776, 2019.

OZBEK, I.; BINDAL, C. **Mechanical properties of boronized AISI W4 steel. Surface and Coatings Technology**, v. 154, n. 1, p. 14–20, 2002.

PEREIRA, R. G. **Caracterização de camadas produzidas por boretação e boretação-pvd nos aços AISI H13 e AISI D2**. [s.l.] Universidade de São Paulo, 2013.

PERINI, M.; VILANNOVA, D. L. Análise dos efeitos do tratamento termoquímico de boretação aplicado a aços comerciais de larga utilização industrial: Revisão. **TECNO-LÓGICA**, p. 160–166, 2019.

POLLNOW, E. N. et al. Avaliação microestrutural de um aço de baixo carbono submetido ao tratamento de boretação pré e pós-soldagem GTAW. **Revista Materia**, v. 22, n. 2, 2017.

PRINCE, M. et al. **Experimental Investigations on the Effects of Multicomponent Laser Boriding on steels. Materials Today: Proceedings**, [s. l.], v. 5, n. 11, p. 25276–25284, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2018.10.330>

RIBEIRO, João.PC; GODOI, Pollianna.J.de.Paiva. M .; BATISTA, Fábio. D .; CORREA, Priscila. M. **Tecnologia metalúrgica** . 2018. Recurso online ISBN: 9788595025936. Disponível em: <https://integrada.minhabiblioteca.com.br/#/books/9788595025936/>. Acesso em: 30 dez. 2021.

SCARPIM, A. H. T.; FILHO, J. M. **Processamento e análise do potencial da resistencia ao desgaste de machos de aço rápido AISI M2 sob tratamentos**

termoreativos. Curitiba: [s.n.]. Disponível em: <http://repositorio.roca.utfpr.edu.br/jspui/bitstream/1/9287/1/CT_DAMEC_2016_1_10.pdf>.

SEN, U.; SEN, S. **The fracture toughness of borides formed on boronized cold work tool steels.** *Materials Characterization.* v. 50, n. 4–5, p. 261–267, 2003.

SILVA, André Luiz V. da Costa e; MEI, Paulo Roberto. **Aços e ligas especiais.** 3. ed. São Paulo, SP: Blücher, 2010. 646 p. ISBN 9788521205180.

SINHA, A. K. *ASM Handbook Volume 4 Heat Treating.* 4. ed. [s.l: s.n.].

TLILI B, BARKAOUI A, WALOCK M (2016) **Tribology and wear resistance of the stainless steel. The sol–gel coating impact on the friction and damage.** 102:348–354. [HTTPS://DOI.ORG/10.1016/J.TRIBOINT.2016.06.004](https://doi.org/10.1016/j.triboint.2016.06.004)