

**INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE SANTA
CATARINA**

**CÂMPUS JARAGUÁ DO SUL- GERALDO WERNINGHAUS
CURSO SUPERIOR DE TECNOLOGIA EM FABRICAÇÃO MECÂNICA**

CÍNTIA FISCHER

**ESTUDO DA INFLUÊNCIA DA TAXA DE AQUECIMENTO NA FORMAÇÃO
DA CAMADA BORETADA NO AÇO ABNT 1020**

JARAGUÁ DO SUL, ABRIL DE 2016.

**INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE SANTA CATARINA
CÂMPUS JARAGUÁ DO SUL - GERALDO WERNINGHAUS
CURSO SUPERIOR DE TECNOLOGIA EM FABRICAÇÃO MECÂNICA**

CÍNTIA FISCHER

**ESTUDO DA INFLUÊNCIA DA TAXA DE AQUECIMENTO NA FORMAÇÃO
DA CAMADA BORETADA NO AÇO ABNT 1020**

Trabalho de conclusão de curso submetido ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Santa Catarina como parte dos requisitos de obtenção do título de Tecnólogo em Fabricação Mecânica.

Professor Orientador: Alexandre Galiotto, Me.

JARAGUÁ DO SUL, ABRIL DE 2016

F529e Fischer, Cíntia

Estudo da influência da taxa de aquecimento na formação da camada boretada no aço ABNT 1020 / Cíntia Fischer; orientador Alexandre Galiotto. – Jaraguá do Sul, SC, 2016. 50 f.

Monografia (Graduação) - Instituto Federal de Santa Catarina.
Curso Superior de Tecnologia em Fabricação Mecânica

Inclui bibliografia

1. Boretção. 2. Taxa de aquecimento. 3. Tratamento termoquímico. I. Galiotto, Alexandre. III. Instituto Federal de Santa Catarina. Curso Superior de Tecnologia em Fabricação Mecânica. IV.

Título.

CDD 620.1

Catalogado por: Karla Viviane Garcia Moraes – CRB14/1002

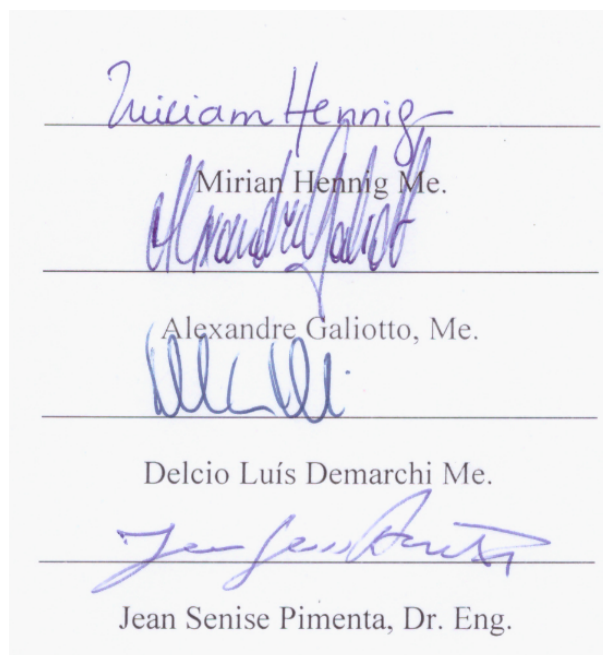
ESTUDO DA INFLUÊNCIA DA TAXA DE AQUECIMENTO NA FORMAÇÃO DA CAMADA BORETADA NO AÇO ABNT 1020

CÍNTIA FISCHER

Este trabalho foi julgado adequado para obtenção do Título de Tecnólogo em Fabricação Mecânica e aprovado na sua forma final pela banca examinadora do curso Tecnólogo em Fabricação Mecânica do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Santa Catarina.

Jaraguá do Sul, 01 de abril de 2016.

Banca Examinadora:



Miriam Hennig
Mirian Hennig Me.

Alexandre Galiotto, Me.

Delcio Luís Demarchi Me.

Jean Senise Pimenta, Dr. Eng.

AGRADECIMENTOS

A Deus, pela saúde.

Aos meus pais, pelo incentivo.

Ao meu noivo, pelo companheirismo.

Ao professor orientador Alexandre Galiotto, Me., pela paciência e aprendizado.

Ao meu querido amigo Robson Scarmagnani, pelo carinho e aprendizado.

À professora Miriam Hennig, pela dedicação e orientações na realização deste trabalho.

A todos os professores que contribuíram para a minha formação.

Ao IFSC – Câmpus Jaraguá do Sul - Geraldo Werninghaus.

Muito obrigada!

RESUMO

A melhoria da qualidade superficial de ferramentas mecânicas é uma busca incessante na área da mecânica. O tratamento termoquímico de boretação é um tratamento superficial que vem ganhando destaque entre muitos pesquisadores que buscam alcançar as qualidades superficiais de diversos materiais. Este trabalho pretende avaliar a influência e resultados do tratamento de boretação, variando taxa de aquecimento durante o tratamento. Nos trabalhos existentes, os pesquisadores submetem amostras a serem boretadas utilizando determinada temperatura fixa e deixando a amostra sob tratamento durante certo tempo predeterminado, ou muitas vezes partindo da temperatura ambiente, mas em todos os casos a amostra perdura por horas sob a temperatura. Para avaliar o efeito da taxa foram reunidos três conjuntos de amostras, e determinados temperaturas e taxas de aquecimento para submeter as amostras ao tratamento. Durante o tratamento, cada uma das amostras foi inserida individualmente no forno em temperatura ambiente e utilizando a taxa de aquecimento as amostras foram atingindo a temperatura estipulada. Para todas as condições, foram avaliados os efeitos da taxa de aquecimento na formação da camada boretada, na morfologia, na espessura e na dureza das amostras. De acordo com os resultados, a utilização das taxas de aquecimento influenciou diretamente na formação da camada boretada.

PALAVRAS-CHAVE: Boretação. Taxa de aquecimento. Tratamento termoquímico.

ABSTRACT

The improved surface quality power tools is a constant search in the mechanical area. The thermochemical treatment of boriding is a surface treatment that is gaining prominence among many researchers seeking to achieve surface qualities of various materials. This work aims to evaluate the effects and results of treatment of boriding, varying heating rate during treatment. In existing studies, the researchers submitting the samples to be determined using fixed temperature boride and leaving the sample under treatment for a certain predetermined time, or many times starting from room temperature, but in all cases the sample lasts for hours at the temperature. To evaluate the effect of the charge were collected three sets of samples, and specific temperatures and heating rates for subjecting the samples to treatment. During treatment, each sample was individually placed in oven at room temperature using the heating rate of the samples were reaching the prescribed temperature. For all conditions, we evaluated the effects of temperature rate in the formation of the boride layer, the morphology, thickness and hardness of the samples. According to the results the use of heating rates directly influence the formation of the boride layer.

KEYWORDS: Boriding. Heating rate. Thermochemical treatment.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Demonstração da boretação em pó para uma única peça.....	20
Figura 2: Diagrama bifásico de Ferro-Boro	21
Figura 3: Demonstração das fases Fe ₂ B e Fe ₃ B na camada boretada	22
Figura 4: Estágio do crescimento dos cristais	24
Figura 5: Relação do efeito da temperatura em função do tempo na espessura (comportamento cinético) da camada boretada no aço AISI 4140.....	25
Figura 6: Crescimento de uma camada de boretos.....	26
Figura 7: A espessura das camadas de boretos dos aços H13 e AISI 1060 submetidos ao processo de boretação.....	27
Figura 8: Esquema do tempo e temperatura de tratamento utilizado por Krelling (2012).....	28
Figura 9: Comparativo do crescimento e desenvolvimento das camadas boretadas dos aços AISI 1018 (a) e AISI 4340 (b).....	28
Figura 10: Influência dos elementos de liga na espessura da camada boretada para os aços.....	29
Figura 11: Camada boretada do aço P20	30
Figura 12: Demonstração de como é feita a medição da HV	31
Figura 13: Perfis de dureza do aço ABNT 1045 em diversos tratamentos termoquímicos.....	32
Figura 14: Demonstração do forno mufla e do pó Ekabor®	35
Figura 15: Amostras lixadas e prontas para os processos de análise.....	36
Figura 16: Microdurômetro utilizado para a análise de dureza das amostras	37
Figura 17: Amostras boretadas a 700°C. Aumento 400X. Ataque Nital 2%.....	38
Figura 18: Amostras boretadas a 850°C. Aumento 400X. Ataque Nital 2%	39
Figura 19: Camada boretada a 850°C com taxa de aquecimento de 2°C/min. Aumento 800X. Ataque Nital 2%.....	39

Figura 20: Camada borexada a 850°C com taxa de aquecimento de 10°C/min. Aumento 800X. Ataque Nital 2%.....	40
Figura 21: Amostras borexadas a 1000°C. Aumento 1000X. Ataque Nital 2%.	41
Figura 22: Camada a 1000°C com taxa de aquecimento de 2°C/min. Aumento 1000X. Ataque Nital 2%.	42
Figura 23: Camada a 1000°C com taxa de aquecimento de 10°C/min. Aumento 1000X. Ataque Nital 2%.	43
Figura 24: Camada a 1000°C com taxa de aquecimento de 20°C/min. Aumento 1000X. Ataque Nital 2%	43

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 - Propriedades das fases de boretos	22
TABELA 2 - Composição química do aço ABNT 1020	33
TABELA 3: Ciclos do tratamento de boretação	34
TABELA 4: Comparação entre as espessuras de camada formadas de acordo com as taxas de aquecimento e temperatura	44

LISTA DE GRÁFICOS

TABELA 1 - Propriedades das fases de boretos	22
TABELA 2 - Composição química do aço ABNT 1020	33
TABELA 3: Ciclos do tratamento de boretação	34
TABELA 4: Comparação entre as espessuras de camada formadas de acordo com as taxas de aquecimento e temperatura	44

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

HV - Hardness Vickers

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas

AISI - American Iron and Steel Institute

C Carbono

P Fósforo

Mn Manganês

S Enxofre

μm Micrometro

μ Micron

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	155
1.1	PROBLEMA.....	157
1.2	JUSTIFICATIVA.....	177
1.3	OBJETIVOS.....	188
1.3.1	Objetivo Geral	188
1.3.2	Objetivos Específicos	188
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	199
2.1	BORETAÇÃO.....	199
2.2	A DINÂMICA DE FORMAÇÃO DA CAMADA BORETADA.....	21
2.3	FATORES INFLUENTES NA ESPESSURA DA CAMADA NO TRATAMENTO TERMOQUÍMICO DE BORETAÇÃO.....	244
2.3.1	Tempo e temperatura	244
2.3.2	Elementos de liga do substrato	288
2.4	DUREZA DAS CAMADAS BORETADAS.....	30
3	MATERIAIS E MÉTODOS	333
3.1	MATERIAIS EMPREGADOS.....	333
3.2	PREPARAÇÃO DAS AMOSTRAS.....	333
3.3	O TRATAMENTO DE BORETAÇÃO.....	344
3.4	ANÁLISE MICROSCÓPICA.....	366
3.5	ENSAIO DE MICRODUREZA.....	366
4	ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS	388
4.1	ANÁLISE MICROESTRUTURAL.....	388
4.1.1	Amostras boretadas à 700°C	388
4.1.2	Amostras boretadas à 850°C	388
4.1.3	Amostras boretadas à 1000°C	41

4.2	MICRODUREZA	444
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	477
	REFERÊNCIAS.....	488

1 INTRODUÇÃO

As propriedades químicas e superficiais dos aços e demais ligas são aspectos que têm sido estudados e discutidos durante anos. O objetivo dos estudos sempre foi aperfeiçoar e melhorar as propriedades das ligas, fato que teve início em 1868 quando Mushet adicionou tungstênio ao aço, substância que acabou tornando o material mais resistente (VALE, 2011).

Desde então, uma grande variedade de métodos para a modificação das propriedades dos materiais foram surgindo, dentre eles: os tratamentos mecânicos, térmicos, químicos, bombardeamento de íons e termoquímicos (ALMEIDA, 2001).

Os tratamentos termoquímicos surgiram para complementar os estudos na área e visam melhorar principalmente as propriedades superficiais de diversos materiais através da modificação em sua composição. Eles têm como principais objetivos tornar o material mais resistente ao desgaste superficial e aumentar sua dureza sem afetar o núcleo do material (VALE, 2011).

Todo tratamento termoquímico necessita de aquecimento para aumentar a difusão dos elementos de liga na superfície a ser modificada. Essa difusão de acordo com Askeland e Phulé (2008 p. 116), "[...] refere-se ao fluxo de quaisquer espécies químicas, como íons, átomos, elétrons, lacunas e moléculas. A magnitude desse fluxo depende do gradiente, da concentração e da temperatura".

O fluxo dos átomos e íons acontece devido a própria energia que eles possuem, a qual os fazem capazes de se movimentarem. A movimentação pode ser acelerada, ou iniciada (dependendo do material) à medida que acontece o aumento da temperatura aplicada durante o tratamento termoquímico (SMITH, W., HASHEMI, J., 2012). Os tratamentos termoquímicos, portanto, ocorrem pela difusão dos átomos, sendo os principais: cementação, nitretação, carbonitretação e boretação (VALE, 2011).

O tratamento termoquímico de boretação vem ganhando destaque nos últimos anos devido as suas propriedades de alta dureza e resistência ao desgaste, características geradas pela camada boretada que é formada durante o tratamento. Ele ocorre pela difusão dos átomos de boro (B) no material a ser tratado, podendo ser feito por meio líquido, sólido ou gasoso, sendo o meio sólido o mais aplicado

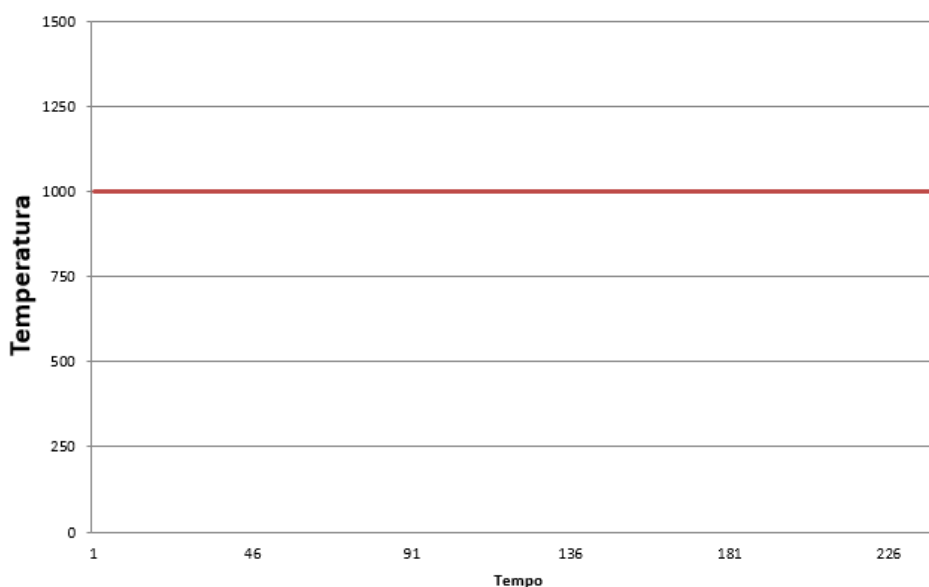
(SELÇUKA et al, 1999).

A aplicação da boretação por meio sólido é feita com a utilização de pós boretantes que são aquecidos com o material a ser tratado, geralmente sob temperaturas que variam de 800 a 1100°C, permanecendo durante determinado tempo na temperatura escolhida que varia entre 1 a 5h. (ASM INTERNACIONAL, 1991).

Na aplicação da boretação, a escolha dos tempos e temperaturas aplicados no tratamento, são fatores que interferem diretamente na formação da camada boretada, em aspectos como: espessura, dureza e morfologia. Por essa razão, muitas pesquisas vêm sendo feitas para testar novos métodos e dar ao tratamento características cada vez melhores, bem como, garantir as propriedades físicas e químicas necessárias para aplicação na indústria moderna atual (VALE, 2011; SELÇUKA, et al., 1999; ASM INTERNACIONAL, 1991; HECK, 2010).

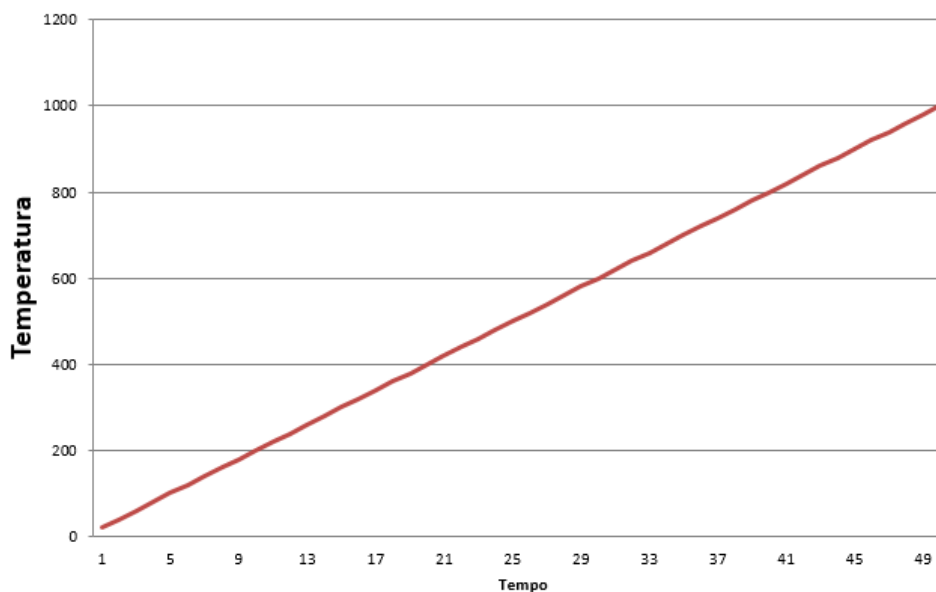
No tratamento convencional o aquecimento é feito de acordo com o gráfico 1, onde o forno é pré-aquecido em 1000°C e a peça a ser boretada permanece nessa temperatura durante um determinado tempo e, em seguida é retirada e resfriada ao ar. Ao contrário da figura 2, onde é proposto um aquecimento gradativo, chamado de taxa de aquecimento, até a temperatura de 1000°C e, logo após o resfriamento ao ar livre.

Gráfico 1: Demonstração do tratamento convencional de boretação



Fonte: o autor (2016)

Gráfico 2: Demonstração do tratamento de boretação com taxa de aquecimento



Fonte: o autor (2016)

A utilização de taxas de aquecimento aplicadas sob as temperaturas de tratamento são uma nova maneira de realizar a boretação. As taxas aplicadas podem variar de 2°C/min a 20°C/min.

1.1 PROBLEMA

Qual a influência da utilização de taxas de aquecimento na formação das camadas boretadas, provenientes do tratamento termoquímico de boretação?

1.2 JUSTIFICATIVA

A boretação é um processo que está sendo pesquisado e testado de uma maneira bastante ampla nos últimos anos. Conseqüentemente, cada pesquisa visa a aplicação do processo de diferentes maneiras.

Os tratamentos termoquímicos de boretação conhecidos, são realizados basicamente utilizando uma temperatura fixa, aplicada sob um tempo previamente estipulado.

O controle da taxa de aquecimento vem a ser uma nova alternativa usualmente não utilizada, podendo, de acordo com testes determinar aplicações específicas e possíveis vantagens econômicas para o tratamento.

1.3 OBJETIVOS

1.3.1 Objetivo Geral

Avaliar através de análises microestruturais e ensaios de dureza, se há alguma influência da utilização de diferentes taxas de aquecimento no tratamento termoquímico de boretação, identificando e mensurando a espessura de camada formada e o perfil de dureza atingido.

1.3.2 Objetivos Específicos

- Realizar o tratamento termoquímico de boretação utilizando o forno tipo mufla e aplicando dados de temperatura e taxas de aquecimento estipulados;
- Avaliar a morfologia da camada resultante, por meio de microscopia óptica em laboratório;
- Avaliar a espessura de camada com da medição em microscópio óptico;
- Avaliar o perfil de dureza resultante utilizando o microdurômetro.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Para a compreensão do trabalho e seus resultados, torna-se necessário conhecer o tratamento termoquímico de boretação, bem como todas as suas características. Desta forma a fundamentação teórica a seguir pretende embasar o assunto e torná-lo o mais claro possível para que a análise dos resultados e as conclusões possam se tornar objetivas.

2.1 BORETAÇÃO

A melhoria das características superficiais de diversos materiais é uma busca constante em diversas áreas que envolvem a fabricação de materiais e ferramentas. Os tratamentos de modificação superficial garantem que a superfície e o substrato sejam desenvolvidos para que o material consiga atingir propriedades aceitáveis, o que os materiais não são capazes de fazer individualmente (ALMEIDA, 2001).

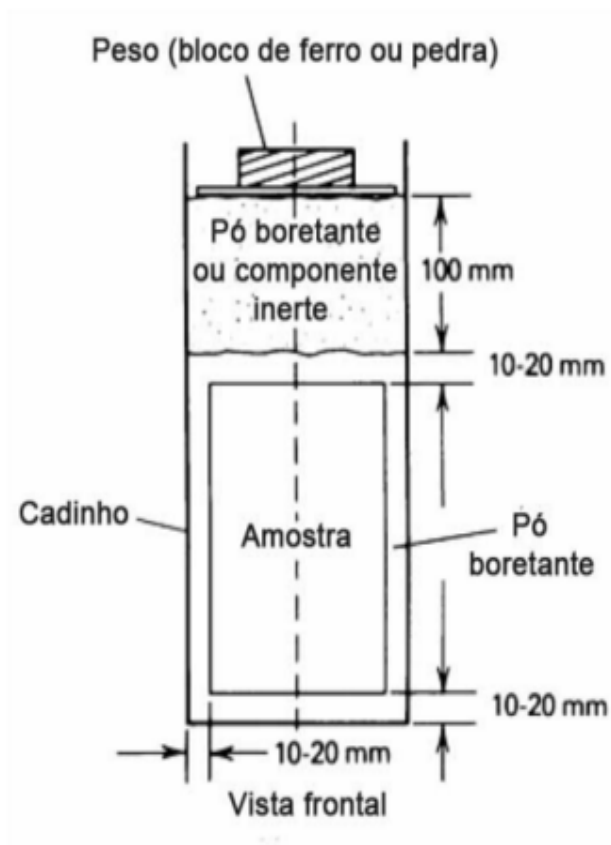
Nesse sentido a boretação é um tratamento termoquímico superficial, no qual ocorre a difusão dos átomos de boro na superfície do metal de base (substrato) em altas temperaturas, formando assim uma camada boretada, (SINHA, 1991; ATIK, 2003).

Muito utilizado na indústria metalmeccânica, o tratamento termoquímico é utilizado em diversas ligas de ferro, níquel, cobalto, aços carbono ligados e ligas refratárias. É um tratamento altamente eficiente para tornar as superfícies desses materiais mais resistentes ao desgaste superficial. As camadas formadas podem ter uma dureza elevada que pode chegar até 1800HV nos aços com espessuras que podem chegar até 380 μm (SINHA, 1991; SEN et al., 2005). O interior da peça a ser tratada não é afetado pelo tratamento, continuando com sua tenacidade original (ASM INTERNACIONAL, 1991).

O tratamento pode ser feito por via sólida, líquida ou gasosa. Dentre elas a boretação sólida ainda é a mais viável por ser de fácil manuseio e baixo custo. (SELÇUKA. et al, 1999). Partindo das mesmas vantagens o tratamento sólido a pó é o mais utilizado, já que basicamente o processo é feito em caixas que são

preenchidas com pó de boro como é demonstrado na Figura 1. (ASM INTERNACIONAL, 1991).

Figura 1: Demonstração da boretação em pó para uma única peça



Fonte: Adaptado de SINHA, 1991

Após a caixa estar devidamente preparada, inicia-se o tratamento, realizado sob temperaturas que variam entre 800 a 1100°C durante determinado tempo previamente estipulado. O pó boretante geralmente é constituído por boro, carbeto de boro, ferro-boro, bórax e boro cristalino. Como complemento utiliza-se pelo menos um dos seguintes componentes: carbeto de silício, sílica, óxido de magnésio, óxido de alumínio, e como ativador tetrafluorborato de potássio ou cloreto de amônia. Comercialmente já existem pós com as misturas preparadas, evitando o manuseio de todos os elementos em laboratório (ASM INTERNACIONAL, 1991).

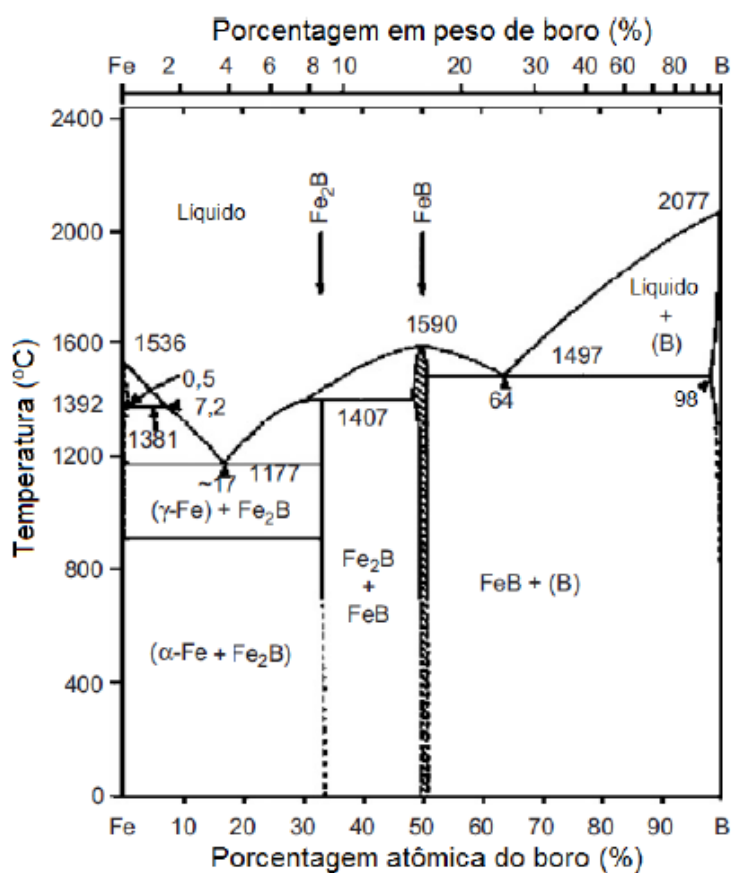
Um aspecto muito importante e relativo no tratamento de boretação é o tamanho das partículas do pó utilizado. À medida em que o tamanho da partícula diminui, a espessura da camada boretada se forma rapidamente. Assim quanto menores as partículas do pó, menor será também o tempo de exposição do material

ao tratamento em questão e, maiores serão as vantagens econômicas no processo (MERIL et al, 2000 *apud* KRELLING, 2012)

2.2 A DINÂMICA DE FORMAÇÃO DA CAMADA BORETADA

A Figura 2 apresenta o diagrama de equilíbrio ferro-boro e suas diversas formações das fases de ferro-boro, em diferentes especificações.

Figura 2: Diagrama bifásico de Ferro-Boro



Fonte: MARIANI (2014) *apud* BINDAL (2008).

As fases de boretos são formadas a partir da difusão do elemento boro no reticulado cristalino dos materiais de base. As fases Fe_2B e FeB são as principais formações da camada de boro nos aços. Quando a quantidade de boro é menor que 8,83%, há a formação da camada monofásica de Fe_2B . Quando a quantidade em massa ficar entre 8,83 e 16,23% há a formação das duas fases Fe_2B e FeB . Por último, quando as quantidades de boro ultrapassam 16,23% a formação da fase FeB é predominante (CAMPOS-SILVA et al., 2010). Na tabela 1, estão apresentadas as propriedades das fases de boretos.

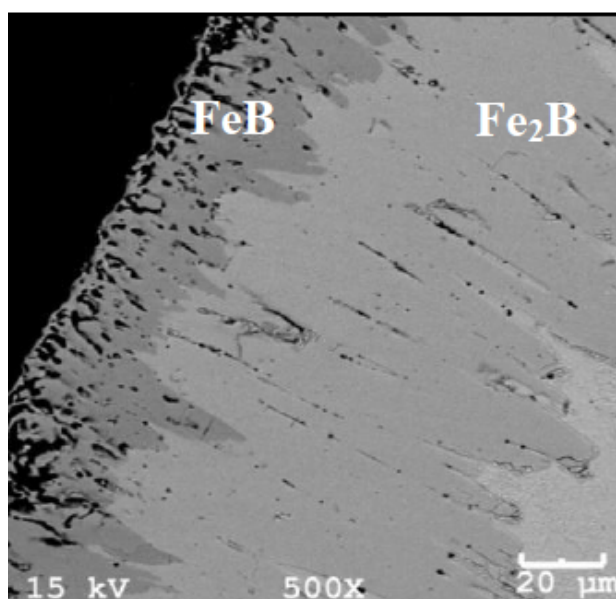
TABELA 1 - Propriedades das fases de boretos

CARACTERÍSTICA	FeB	Fe ₂ B
Teor de boro (% em massa)	16,23	>8,83
Parâmetro de rede (Å)	a = 4,053 b = 5,495 c = 2,946	a = 5,078 b = 4,249
Densidade (g/cm ³)	6,75	7,43
Coefficiente de expansão térmica, entre 200 e 600°C (10 ⁻⁶ °C ⁻¹)	23	7,65
Módulo de elasticidade (GPa)	590	285-295
Microdureza (GPa)	19-21	18-20

Fonte: adaptado de SINHA, (1991)

De acordo com Sen e Sen (2003) dentre as formações, a menos frágil e a que tende a superfícies com ótima tensão compressiva é a fase única de Fe₂B, sendo quatro vezes mais resistente do que a fase dupla que por sua vez é rica em boro. Já a fase FeB se destaca pela dureza elevada. Na figura 3 é possível identificar as duas fases formadas no tratamento de boretação, a fase FeB na extremidade da camada e a fase Fe₂B mais encrustada no substrato.

Figura 3: Demonstração das fases FeB e Fe₂B na camada borexada



Fonte: FRANCO (2014 p. 100)

Para a obtenção de uma camada densa e bem consistente de boretos, é importante haver uma orientação cristalográfica bem definida e homogênea. Geralmente as fases Fe_2B ou FeB possuem uma orientação de cristalográfica preferencial, a orientação [002] (Figura 4), como pode ser observado na figura 4.

Assim como os boretos de ferro, os demais elementos de liga que os acompanham também devem estar em concordância para o crescimento uniforme e bem concentrado da camada. A concordância deve ser importante porque os demais elementos de liga tendem a criar uma barreira de difusão, afetando o crescimento da camada e tornando seu tamanho insuficiente, (OLIVEIRA, 2006).

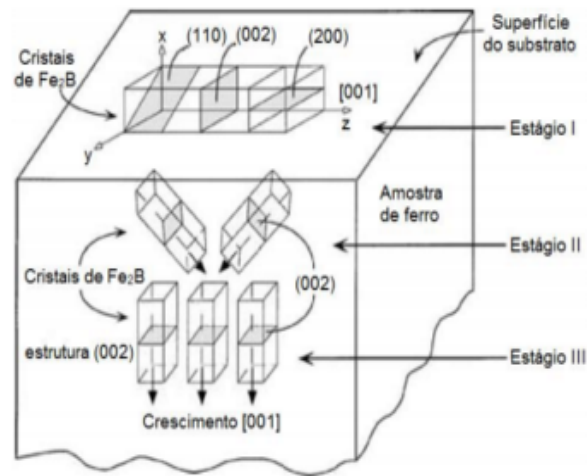
De acordo com a descrição de Martini et al., (2004), há três lógicas subsequentes quanto à formação de crescimento dos boretos de ferro (Figura 4).

- Primeira: os cristais aciculares de Fe_2B tendem a crescer paralelamente à superfície do metal de base [001]. Como resultado, há a formação de uma camada boretada com diferentes orientações de cristais.

Essas características de orientações desorganizadas se devem ao fato de que os cristais de Fe_2B possuem mais facilidade para crescer em regiões próximas aos átomos de boro.

- Segunda: há o crescimento dos cristais de Fe_2B no interior do metal de base. À medida em que a superfície do metal é preenchida, uma grande quantidade dos cristais de Fe_2B se encontram com outros cristais provocando grandes tensões mecânicas e reagindo para o interior da superfície metálica.

- Terceira: ocorre a formação dos cristais de boreto que crescem de maneira perpendicular à superfície do metal. Isso ocorre porque grande parte dos cristais restantes são forçados a se desenvolverem na região onde há mais facilidade para atingir a superfície externa. Afinal, esse é o único caminho que os demais cristais não percorreram.

Figura 4: Estágio do crescimento dos cristais

Fonte: Adaptado de MARTINI et al., 2004

2.3 FATORES INFLUENTES NA ESPESSURA DA CAMADA NO TRATAMENTO TERMOQUÍMICO DE BORETAÇÃO

O tempo de tratamento, a quantidade de elementos de liga e a temperatura são fatores que contribuem diretamente no crescimento e na morfologia da camada boretada. Por isso é fundamental compreender cada um desses quesitos para que sua aplicação seja feita de forma eficaz (ASM INTERNACIONAL, 1991; OLIVEIRA, 2006).

2.3.1 Tempo e temperatura

O desenvolvimento da camada de boretos depende da concentração dos átomos de boro, que por sua vez dependem do tempo em que a boretação é feita. A lei de Fick demonstra essa cinética e correlaciona a espessura juntamente com o tempo em que o tratamento dura, o que quer dizer que a espessura da camada é diretamente proporcional ao tempo de boretação, como demonstram a equação 1 e a Figura 05 (SEN et al, 2005).

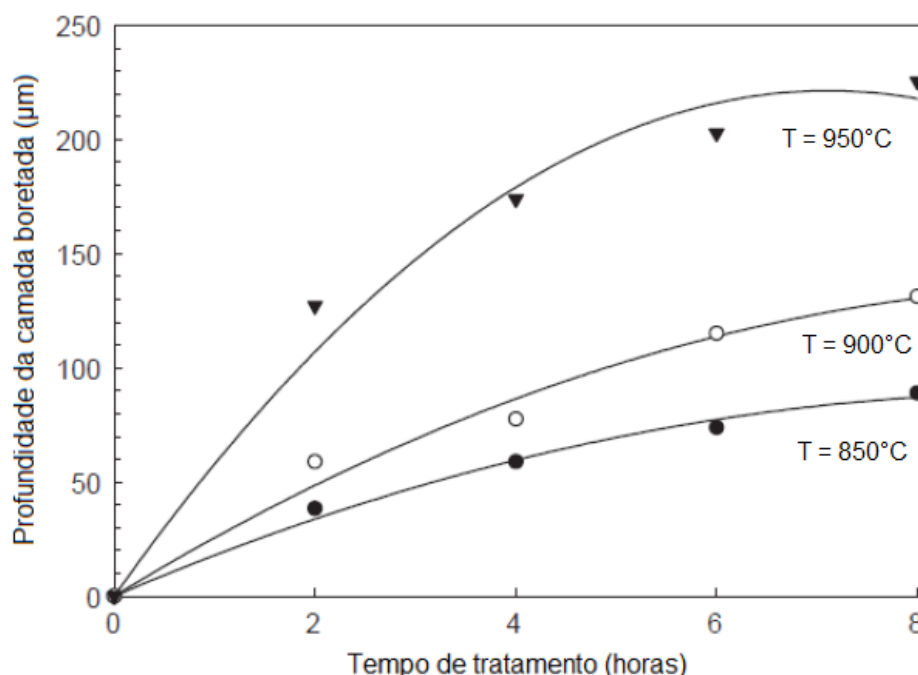
$$d^2 = K \cdot t \quad (1)$$

Onde: d = espessura

K = coeficiente de difusão

t = tempo

Figura 5: Relação do efeito da temperatura em função do tempo na espessura (comportamento cinético) da camada boretada no aço AISI 4140.

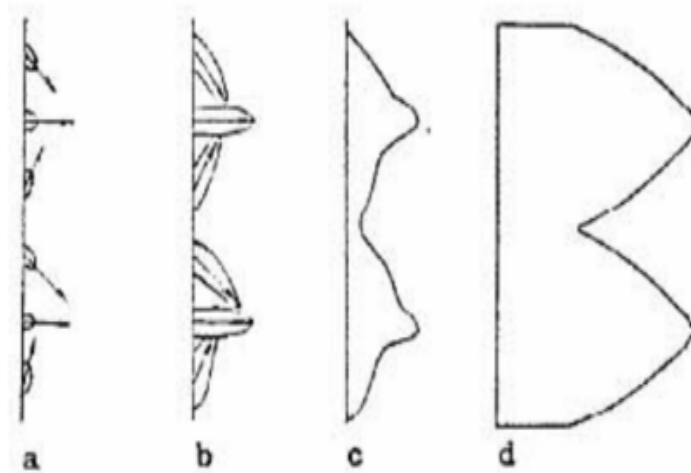


Fonte: Adaptado de SEN et al, (2005)

Além disso, Lei et al., (1990) *apud* Heck, 2010 cita um estudo em que cientistas se basearam na cinética de crescimento da Lei de Fick, aplicaram seus conhecimentos utilizando o aço ABNT 1020 e propuseram duas etapas de teoria. Para a primeira etapa, estabeleceram a equação parabólica $d^2 = K \cdot t$, onde d é espessura. A segunda etapa tem $d = K' \cdot t$ como equação, em que K' é o coeficiente angular da reta. Quando a tensão de compressão se acumula de tal maneira a causar deformações na camada boretada, a difusão dos cristais de boro acelera e o crescimento de parábola em que estavam passa a ser linear. Esses processos podem ser observados na Figura 05.

A figura 6 apresenta de forma esquemática como ocorre esse fenômeno de crescimento das camadas de boretos.

Figura 6: Crescimento de uma camada de boretos



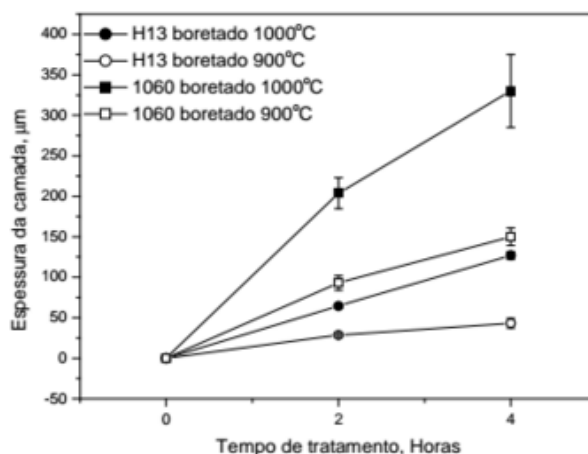
Fonte: Lei et al., (1990) *apud* Heck, 2010

De acordo com a Figura 6 em a) ocorre a nucleação aleatória de boretos, em b) acontece o desenvolvimento dos núcleos na direção [002], em c) a camada começa a se formar e em d) ocorre estágio final de crescimento dos núcleos (LEI et al., 1990 *apud* HECK, 2010).

A Lei de Fick se aplica em diversos estudos como o de Selçuka et al., (1999), no qual é possível concluir que quanto maior o tempo do tratamento de boretação maior é a espessura da camada formada. O pesquisador submeteu duas amostras de aço ABNT1020 à temperatura de 930°C. Uma delas ficou sob efeito dessa temperatura por uma hora e meia e apresentou profundidade de camada de 76µm. Já a outra amostra que permaneceu por três horas nessa temperatura obteve profundidade de 88µm.

No estudo de HECK (2012), na Figura 7, também é possível notar a diferença significativa na espessura da camada resultante, comparando os tempos dos tratamentos. Heck utilizou os aços AISI 1060 e o aço inoxidável H13 em seu estudo.

Figura 7: A espessura das camadas de boretos dos aços H13 e AISI 1060 submetidos ao processo de boretação.

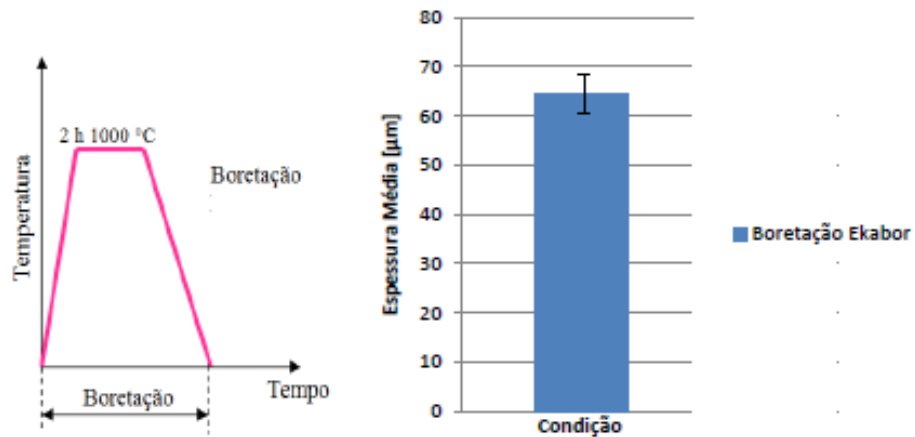


Fonte: HECK (2010 p. 66)

De acordo com a figura 7, o aço 1060 a 1000°C atingiu espessura de camada de aproximadamente 230 μm com duas horas de tratamento, porém, após quatro horas de tratamento, a espessura passou a ter aproximadamente 325 μm de espessura, ou seja, com o dobro do tempo de tratamento a espessura teve um crescimento significativamente maior. Ainda acompanhado o gráfico este fenômeno ocorre para as demais condições de tratamento.

O resultado de Heck pode ser comparado com o resultado de Krelling (2012) na figura 8 que também aplicou a boretação a pó em um aço H13. Krelling boreto seu material durante duas horas obtendo espessura de camada de aproximadamente 65 μm, comparando com a figura 7, Heck demonstra que a amostra tratada nas mesmas condições, porém com um tempo de quatro horas obteve espessura de 125 μm, dobrando praticamente a espessura da camada.

Figura 8: Esquema do tempo e temperatura de tratamento utilizado por Krelling (2012)

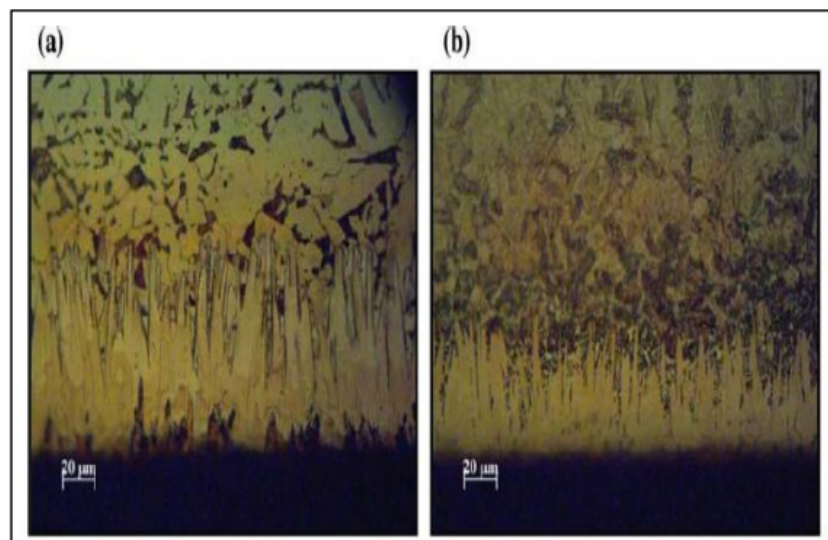


Fonte: Adaptado de Krelling, 2012

2.3.2 Elementos de liga do substrato

O material e os elementos de liga do metal de base também influenciam de maneira direta na espessura da camada boretada. Quando a quantidade de elementos de liga no substrato é muito significativa, a espessura da camada tende a ser menor. Na Figura 9 é possível observar a diferença na espessura da camada entre dois tipos de aço onde em (a) a quantidade de carbono é pouco (AISI 1018) e em (b) onde a quantidade de carbono é muito maior (AISI 4340), (SINHA, 1991; OLIVEIRA, 2006).

Figura 9: Comparativo do crescimento e desenvolvimento das camadas boretadas dos aços AISI 1018 (a) e AISI 4340 (b).



Fonte: Adaptado de PETROVA et al., 2008

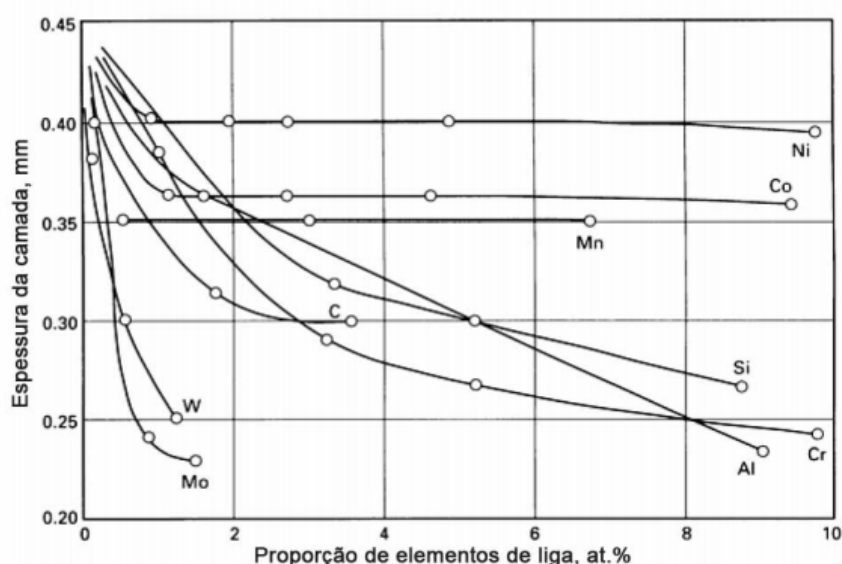
Nos materiais ferrosos os elementos mais influentes na formação da camada são o Níquel, Cromo e Carbono. O Carbono (C) influencia na espessura e na dureza da camada, ou seja, quanto mais carbono menor é a camada de boretos e maior é a dureza resultante do tratamento. Isso ocorre porque o carbono não se dispersa com facilidade no interior da camada, durante o tratamento quando as fases FeB e Fe₂B são predominantes. Conseqüentemente, ele é forçado para frente da camada formando uma área rica em carbeto e borocarbeto (BEJAR E MORENO, 2006).

O Cromo (Cr) influencia na dureza e na fragilidade, devido à alta quantidade de FeB da camada boretada. O alisamento da interface e a diminuição da espessura da camada também são uma consequência da grande quantidade de Cromo (SINHA, 1991).

O Níquel torna a camada mais fina e homogênea, assim como Molibdênio, Tungstênio, Manganês e Vanádio (OLIVEIRA, 2006).

A Figura 10 apresenta o esquema da influência dos elementos de liga na espessura da camada boretada para os aços.

Figura 10: Influência dos elementos de liga na espessura da camada boretada para os aços.

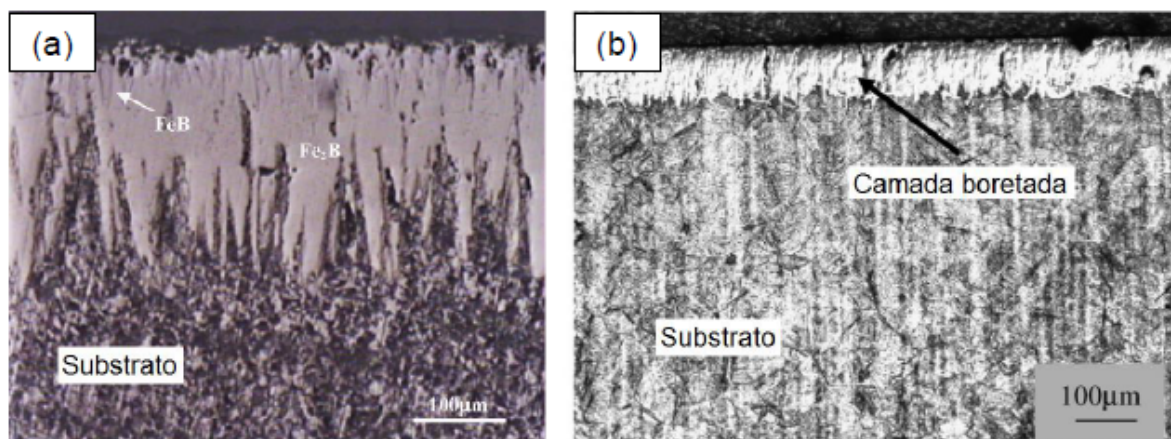


Fonte: Adaptado de SINHA (1991)

Outro aspecto que sofre influência direta das quantidades de liga no substrato é a morfologia da camada. Aços de ferro puro, com poucos elementos de liga e pouco carbono geralmente apresentam formação de camada chamada de

“dente de serra”. Quando o material de base possui mais carbono e altos índices de elementos de liga, a camada formada se torna mais lisa, como pode ser observado na figura 11 (SINHA, 1991).

Figura 11: Camada boretada do aço P20



Fonte: MARIANI, 2014 *apud* USLU, 2007

Para a condição em (a) tem-se um aço com teor de carbono 0,3%, conseqüentemente formando camada característica de dente de serra. Na condição (b) o material é o AISI P20 que torna a camada com aspecto mais liso (USLU, 2007 *apud* MARIANI, 2014)

2.4 DUREZA DAS CAMADAS BORETADAS

De acordo com Souza (1982) “ a propriedade mecânica denominada dureza é largamente utilizada na especificação de materiais, nos estudos e pesquisas mecânicas e metalúrgicas e na comparação de diversos materiais”.

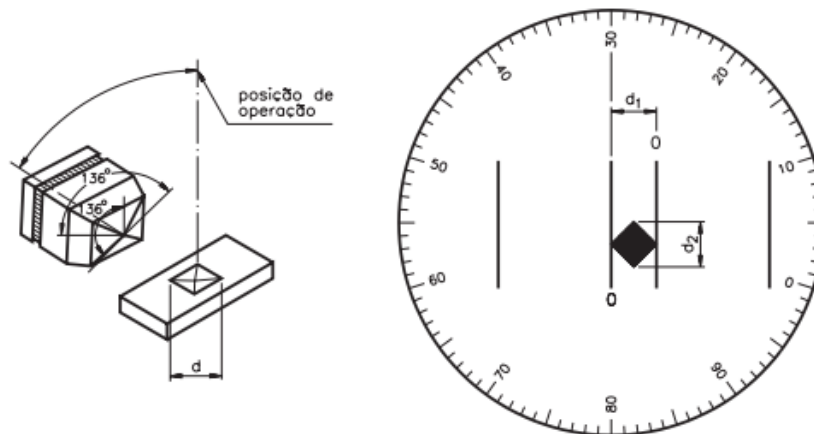
Tal conceito possui diferentes aplicações e significados dependendo de cada profissional e área onde pode ser aplicado. Para um engenheiro mecânico, por exemplo, a dureza pode ser definida como a capacidade de resistência de um material resistente penetrar num outro (SOUZA, 1982).

Existem três tipos de ensaios para obter a dureza de um material específico: dureza por penetração, dureza por choque e dureza por risco. A dureza por penetração é o ensaio mais utilizado e possui diversos tipos de medições entre eles a medição de dureza Vickers (HV) (SOUZA, 1982).

A medição HV é feita através de um penetrador de diamante em forma de

pirâmide com base quadrada e ângulo de 136° entre as faces opostas (Figura 12). A medição é feita com base no coeficiente da carga utilizada e da área deixada pela impressão do diamante (SOUZA, 1982).

Figura 12: Demonstração de como é feita a medição da HV



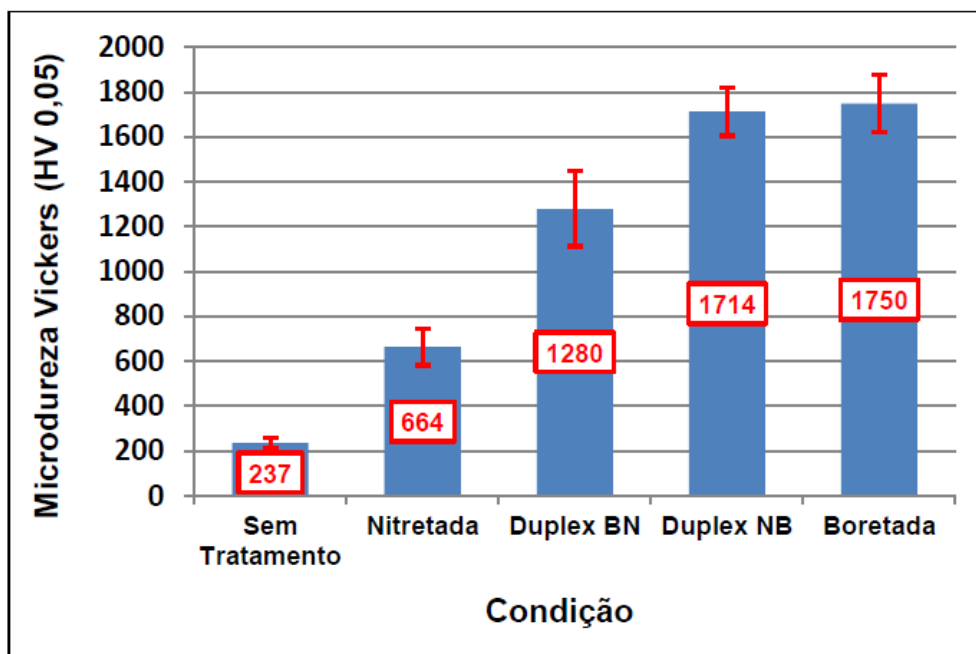
Fonte: Adaptado de TELECURSO (2000)

As camadas boretadas podem atingir durezas na faixa dos 1800HV, dependendo das características do tratamento, do material do metal de base e dos elementos de liga presentes (SINHA, 1991). Porém, pesquisadores como Selçuka et al. (1999) obtiveram resultados mais superiores como pode ser observado na Figura 13.

Franco (2014) utilizando o aço 1020, com 50gf de carga e sob os parâmetros de tratamento contidos na Figura 8, conseguiu alcançar o valor máximo de 1854HV em seu tratamento na região onde havia formação da camada bifásica de FeB.

Para o aço ABNT 1045, sob as mesmas condições de tratamento, Franco (2014) conseguiu provar dentre os diversos tratamentos termoquímicos que o melhor resultado, conforme, a figura 13, foi obtido pela amostra boretada.

Figura 13: Perfis de dureza do aço ABNT 1045 em diversos tratamentos termoquímicos.



Fonte: Franco (2014 p. 125)

3 MATERIAIS E MÉTODOS

A seguir encontram-se descritos os materiais, os procedimentos, as ferramentas e os parâmetros utilizados para a realização do presente trabalho.

Os processos para obtenção dos resultados foram efetuados no campus do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Santa Catarina – Geraldo Werninghaus em Jaraguá do Sul (IFSC) e no campus da Universidade do Estado de Santa Catarina em Joinville (UDESC) de outubro de 2015 a fevereiro de 2016.

3.1 MATERIAIS

Para a realização dos experimentos utilizou-se como material o aço ABNT1020, cuja composição química se encontra na Tabela 2. A escolha deste material se deu devido ao baixo teor de carbono e aos poucos elementos de liga presentes, o que facilita a difusão de outros elementos para a utilização experimental.

TABELA 2 - Composição química do aço ABNT 1020

C	Mn	P	S
0,10 – 0,23	0,30 – 0,60	0,040	0,050

Fonte: adaptado de Souza (1989)

O tratamento termoquímico de boretação foi realizado utilizando como material o pó boretante da marca Ekabor®.

3.2 PREPARAÇÃO DAS AMOSTRAS

Dezoito amostras foram obtidas através de uma barra do aço ABNT 1020, cortadas no sentido transversal com tamanho de Ø12,5x9,0mm. Após o corte da quantidade necessária, iniciou-se o processo de limpeza. Ambas as faces da amostra foram preparadas e lixadas na seguinte sequência de lixas: 220, 320, 400, 600, e 1200, utilizando-se lixas d'água, posteriormente polimento em alumina 0,3 µm.

Já limpas, as amostras foram separadas para o tratamento termoquímico, com as taxas de temperatura e tempo já pré-definidos, como mostra a Tabela 03,

onde foram definidos nove ciclos de tratamento sendo que, cada ciclo possui um par de amostras.

TABELA 3: Ciclos do tratamento de boretação

TEMPERATURA	TAXA DE AQUECIMENTO
1000°C	20°C/min
1000°C	10°C/min
1000°C	2°C/min
850°C	20°C/min
850°C	10°C/min
850°C	2°C/min
700°C	20°C/min
700°C	10°C/min
700°C	2°C/min

Fonte: o autor (2016)

As três faixas de temperatura foram escolhidas de acordo com observações de literaturas e trabalhos consultados. A temperatura de 700°C foi escolhida como limite mínimo, ou seja, para avaliar se realmente há ou não evidência de formação de camada nesta temperatura. Dessa maneira o objetivo foi definir três temperaturas: máxima, média e mínima.

As taxas de aquecimento foram escolhidas pelo próprio autor do trabalho numa lógica de pequena, média e grande taxa. Não existem literaturas definindo o uso de taxas de temperatura por ser um método experimental novo, o qual define o objetivo deste trabalho.

3.3 O TRATAMENTO DE BORETAÇÃO

Para dar início ao tratamento, o par de amostras foi colocado lado a lado em cadinhos de aço inoxidável, preenchido com duas camadas de 20mm do agente boretante Ekabor® (ver figura 14a), composto por 5% B₄C, 5% KBF₄ e 90% SiC

O agente boretante foi posto na parte inferior e na parte superior do

recipiente, ficando as amostras submersas no pó. Em seguida, os cadinhos foram vedados e sobre a vedação foi colocada uma camada de areia para evitar que gases provenientes do tratamento pudessem ser expelidos, garantindo ao máximo a qualidade do processo. Após, o conjunto preparado foi inserido no forno tipo Mufla (ver figura 14b). (Figura 14)

Figura 14: Demonstração do forno mufla e do pó Ekabor®



Fonte: Adaptado de Krelling (2012)

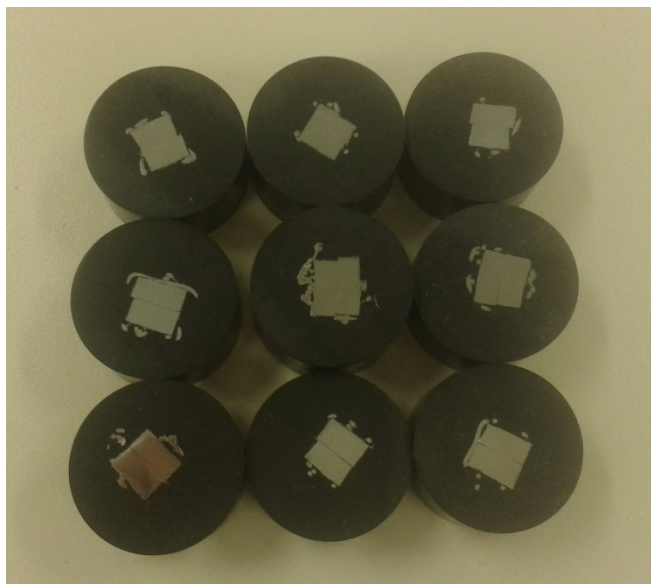
O tratamento foi realizado seguindo os ciclos da tabela 2, de acordo com a temperatura e a taxa de aquecimento determinados. Ao atingir a temperatura determinada (1000°C, 850°C ou 700°C) as peças eram retiradas e resfriadas ao ar.

Ao término do tratamento termoquímico, cada par das amostras foi colocado face a face e entre as faces uma pequena chapa de alumínio para melhor visualização das camadas boretadas que pudessem ter sido formadas durante o tratamento. O conjunto foi amarrado com arame recozido, envolvido em papel alumínio e embutido na baquelite de forma transversal para a análise posterior das camadas.

Já embutidas, as amostras foram lixadas novamente, com a sequência de

lixas iniciando na 80,220, 320, 400, 600, e 1200, utilizando lixas d'água, seguidas de polimento com alumina $0,3\mu\text{m}$. As amostras prontas para os seguintes passos podem ser vistas na figura 15 a seguir.

Figura 15: Amostras lixadas e prontas para os processos de análise



Fonte: o autor (2016)

3.4 ANÁLISE MICROSCÓPICA

O objetivo da análise microscópica é identificar a formação da camada boretada e realizar as medições de sua espessura.

Ela foi realizada utilizando-se um microscópio óptico, que permite a visualização de grandes áreas de maneira simples e econômica com aumento de 400 e 1000 vezes (PADILHA; AMBROZIO, 2004). Após a devida preparação metalográfica das amostras, a revelação da microestrutura foi realizada com Nital 2%.

Com as camadas devidamente medidas, foram realizados os cálculos de média aritmética da espessura de camada. Para obtenção do resultado, uma somatória de oito medidas foi feita e essa somatória dividida pela quantidade de medições.

3.5 ENSAIO DE MICRODUREZA

O ensaio de microdureza foi realizado utilizando-se o microdurômetro (Figura 16), com parâmetros de ensaio com carga de HV0,05 e tempo de indentação

de 10 segundos aplicados em todas as amostras.

Para cada amostra foram realizadas 14 identações ao longo da borda até o interior da camada, sendo que para cada uma dessas 14 identações foram realizadas 3 identações para obtenção da média aritmética de dureza.

Após a obtenção dos dados, iniciou-se o processo de avaliação dos resultados.

Figura 16: Microdurômetro utilizado para a análise de dureza das amostras



Fonte: o autor (2016)

4 ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

O conteúdo presente neste capítulo trata dos resultados e especificações obtidas durante a realização da avaliação microscópica de camada e do ensaio de dureza.

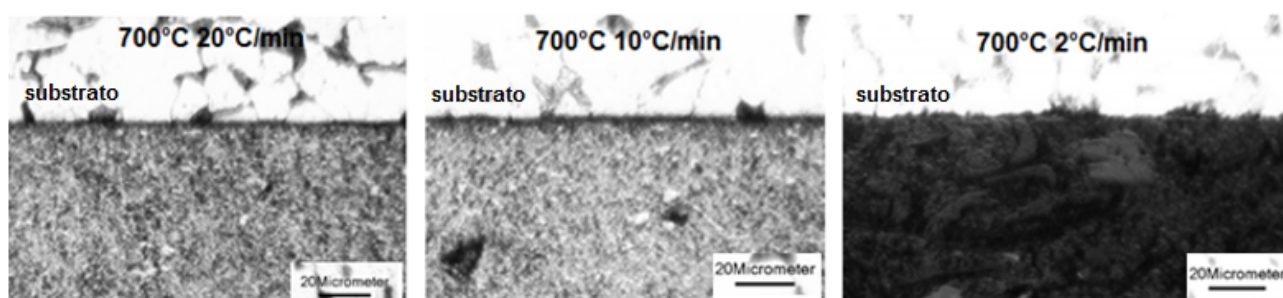
4.1 ANÁLISE MICROESTRUTURAL

A análise microestrutural é necessária para avaliar a formação da camada de boretos, a morfologia e espessura desta camada.

4.1.1 Amostras boretadas a 700°C

A Figura 17 apresenta a morfologia das camadas boretadas de acordo com as três taxas de aquecimento utilizadas.

Figura 17: Amostras boretadas a 700°C. Aumento 400X. Ataque Nital 2%.



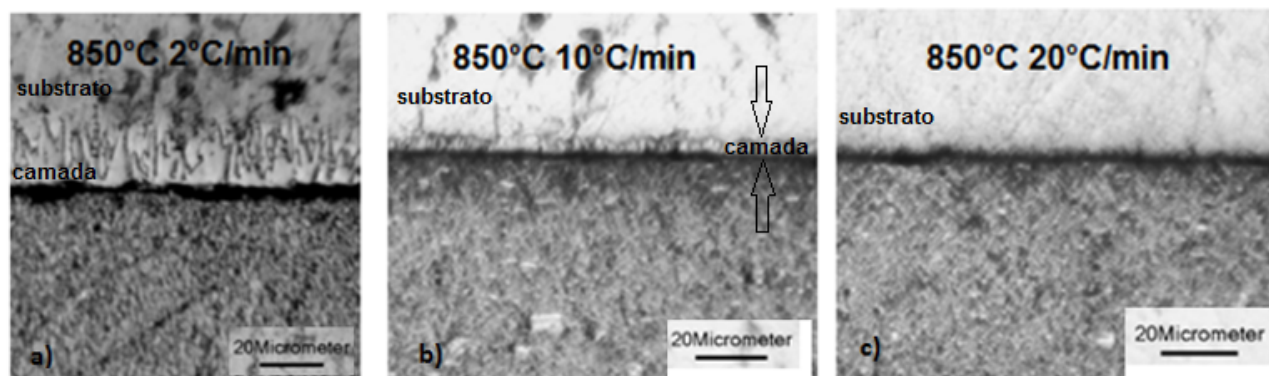
Fonte: o autor (2016)

Através da imagem com ampliação de 400 vezes, observa-se que nesta temperatura não houve formação da camada de boretos. De acordo com o resultado pode-se entender que nesta temperatura, sob estas condições de aquecimento, o pó boretante não conseguiu se desenvolver suficientemente para a formação de camada.

4.1.2 Amostras boretadas a 850°C

Na figura 18 estão apresentadas as imagens de microscopia óptica das amostras boretadas a 850°C, com as taxas de temperatura aplicadas.

Figura 18: Amostras boretadas a 850°C. Aumento 400X. Ataque Nital 2%

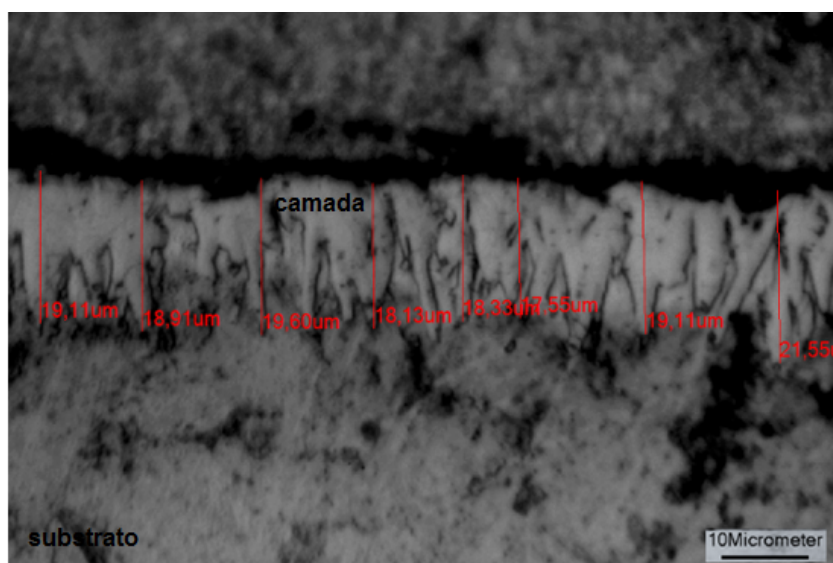


Fonte: o autor (2016)

A primeira condição vista na figura 18a apresenta a maior espessura entre as demais condições com a morfologia dente de serra bem definidas, característica das camadas compostas por Fe_2B . A camada vista na figura 18b apresenta-se visível, porém pouco desenvolvida em relação à figura 18a, mas morfologicamente parecida, ela é muito diferente da gerada na figura 18c, onde não é possível identificar formação de camada, possivelmente pelo intervalo de temperatura promover um aquecimento muito rápido nesta temperatura.

A Figura 19 é uma ampliação da imagem 18a e mostra o resultado da camada boretada com taxa de aquecimento de 2°C/min. A média da espessura de camada é de 19,0 μm .

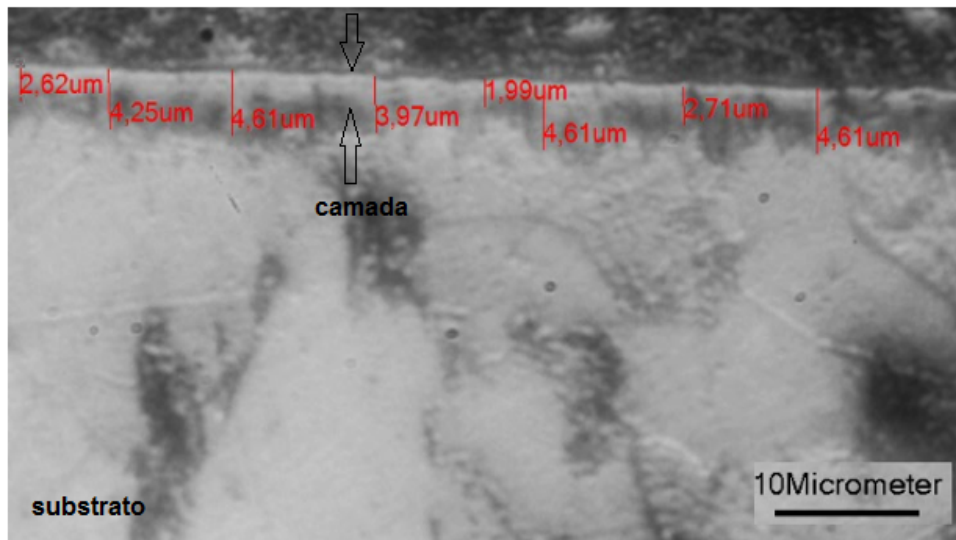
Figura 19: Camada boretada a 850°C com taxa de aquecimento de 2°C/min. Aumento 800X. Ataque Nital 2%.



Fonte: o autor (2016)

Já a Figura 20 traz uma ampliação da imagem 18b com taxa de aquecimento de $10^{\circ}\text{C}/\text{min}$, com média de espessura de camada de $3,7\mu\text{m}$.

Figura 20: Camada boretada a 850°C com taxa de aquecimento de $10^{\circ}\text{C}/\text{min}$. Aumento 800X. Ataque Nital 2%.



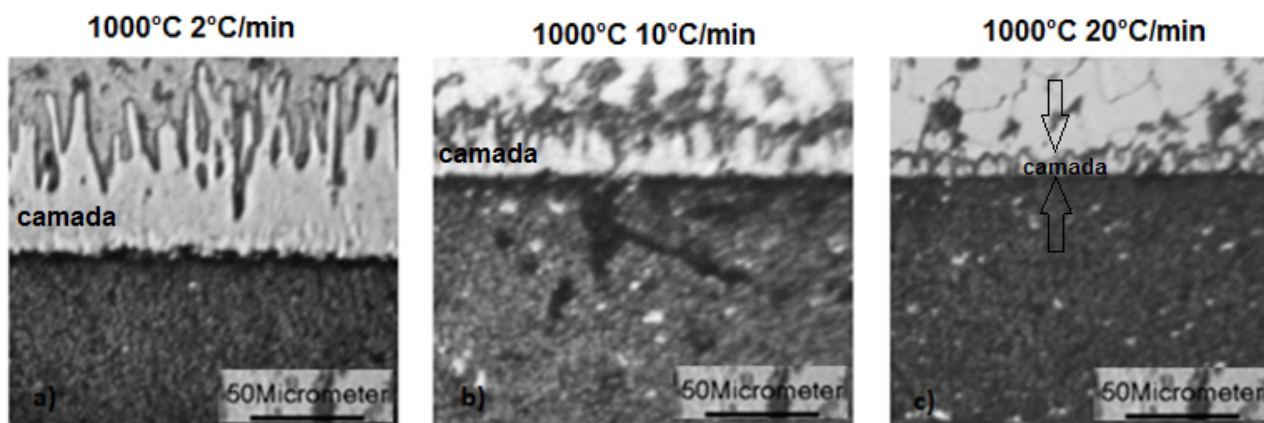
Fonte: o autor (2016)

Ainda a partir da figura 20 é possível observar que quanto menor a taxa de aquecimento, ou seja, quanto mais lentamente a amostra é aquecida maiores serão as espessuras de camadas. Numa temperatura abaixo dos valores padrão, em estado de aquecimento mais rápido a camada boretada não consegue se formar.

4.1.3 Amostras boretas a 1000°C

As imagens de microscopia óptica das amostras boretas a 1000°C com as taxas de temperatura aplicadas encontram-se a seguir (Figura 21).

Figura 21: Amostras boretas a 1000°C. Aumento 1000X. Ataque Nital 2%.



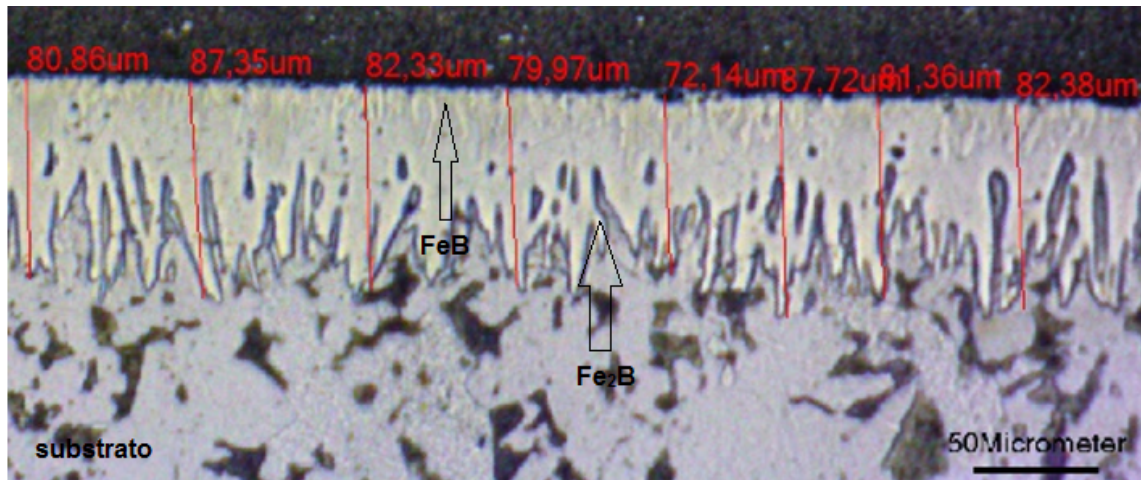
Fonte: o autor (2016)

Observando a Figura 21 é possível notar que as três amostras tratadas a 1000°C apresentam formação de camada boreta. Nessa faixa de temperatura é possível notar uma semelhança de crescimento de camada como foi demonstrada na figura 6 (pág.24).

Nota-se, observando a figura 6 que quando colocadas na ordem de 20°C, 10°C e 2°C/min, as camadas aparentam estar se desenvolvendo onde, de acordo com a figura 21c ocorre o desenvolvimento dos núcleos na direção do substrato, em 21b a camada começa a se formar e em 21a ocorre o estágio final de crescimento dos núcleos (LEI et al.,1990 *apud* HECK, 2010).

A camada em 21a, submetida a taxa de aquecimento de 2°C/min possui a maior espessura de camada com média de 81,7µm como demonstra a Figura 23.

Figura 22: Camada a 1000°C com taxa de aquecimento de 2°C/min. Aumento 1000X. Ataque Nital 2%.



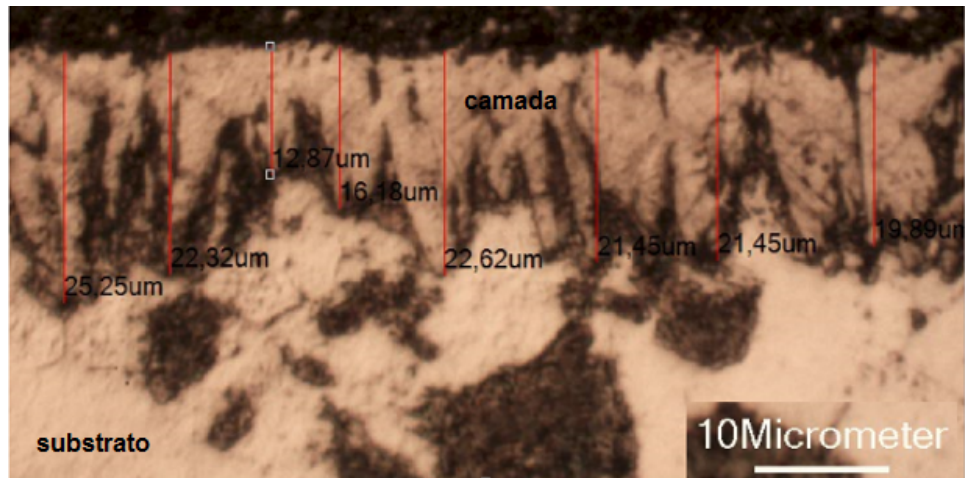
Fonte: o autor (2016)

A temperatura de 1000°C, mais elevada que as outras duas temperaturas citadas nos tópicos anteriores, e a taxa de aquecimento mais lenta proporcionou um crescimento de camada maior que as demais.

Outro aspecto relevante para essa camada é o possível surgimento da camada bifásica de FeB (parte mais clara da borda) seguida da fase Fe₂B, este fato pode ser comparado com a figura 3 (pág. 20) que demonstra o surgimento da camada bifásica. O surgimento das duas camadas, ocorreu provavelmente devido aos altos índices de átomos de boro concentrados na extremidade, ou seja, uma quantidade de boro entre 8,83 e 16,23% (CAMPOS-SILVA et al., 2010).

Para a camada 21b com taxa de aquecimento de 10°C/min a média de espessura desenvolvida ficou na casa dos 20,2µm, conforme a Figura 21, e não houve aparecimento da fase FeB. Somente a fase Fe₂B predominou, juntamente com a característica dente de serra, evidenciando quantidade de boro inferior a 8,83%, conforme Campos-Silva et al., (2010).

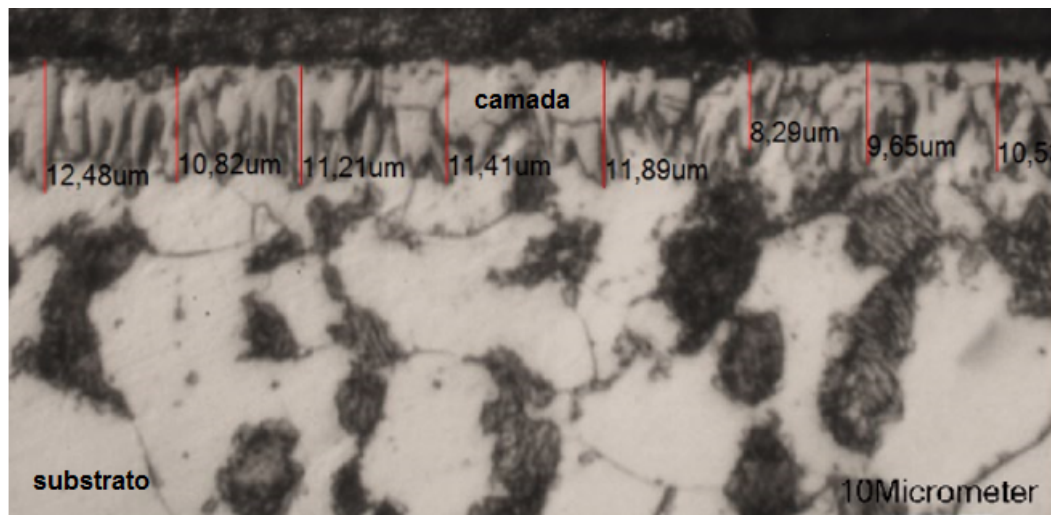
Figura 23: Camada a 1000°C com taxa de aquecimento de 10°C/min. Aumento 1000X. Ataque Nital 2%.



Fonte: o autor (2016)

Para a camada em 21c com taxa de aquecimento de 20°C/min, a formação também se originou em Fe_2B e a média da espessura de camada foi de 10,8µm, conforme a Figura 24.

Figura 24: Camada a 1000°C com taxa de aquecimento de 20°C/min. Aumento 1000X. Ataque Nital 2%



Fonte: o autor (2016)

A comparação entre as espessuras das camadas de acordo com a taxa de aquecimento é apresentada na tabela 4.

Tabela 4: Comparação entre as espessuras de camada formadas de acordo com as taxas de aquecimento e temperatura

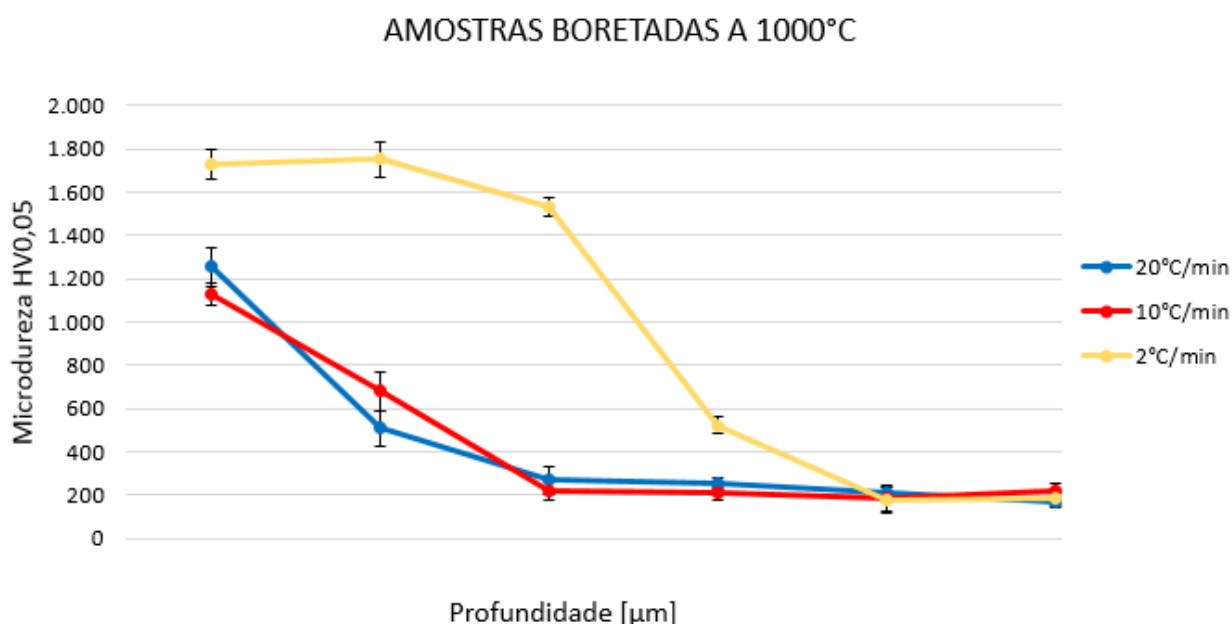
	700°C	850°C	1000°C
2°C	0µm	19 µm	81,7 µm
10°C	0µm	3,7 µm	20,2 µm
20°C	0µm	0µm	10,8 µm

Fonte: o autor (2016)

4.2 MICRODUREZA

O gráfico 3 apresenta o perfil de dureza para as amostras do material ABNT 1020 boretadas até 1000°C. Nota-se a partir do gráfico que a maior dureza, de 1730 HV foi atingida pela amostra boretada com a taxa de aquecimento de 2°C/min.

Gráfico 3: Comparativo das durezas obtidas pelo tratamento de boretção a 1000°C



Fonte: o autor (2016)

A dureza mais elevada se originou na região onde houve formação da camada bifásica de FeB, considerada mais resistente que a camada monofásica de Fe₂B que, por sua vez, já é mais resistente que a fase dupla de FeB + Fe₂B

(CAMPOS-SILVA et al., 2010).

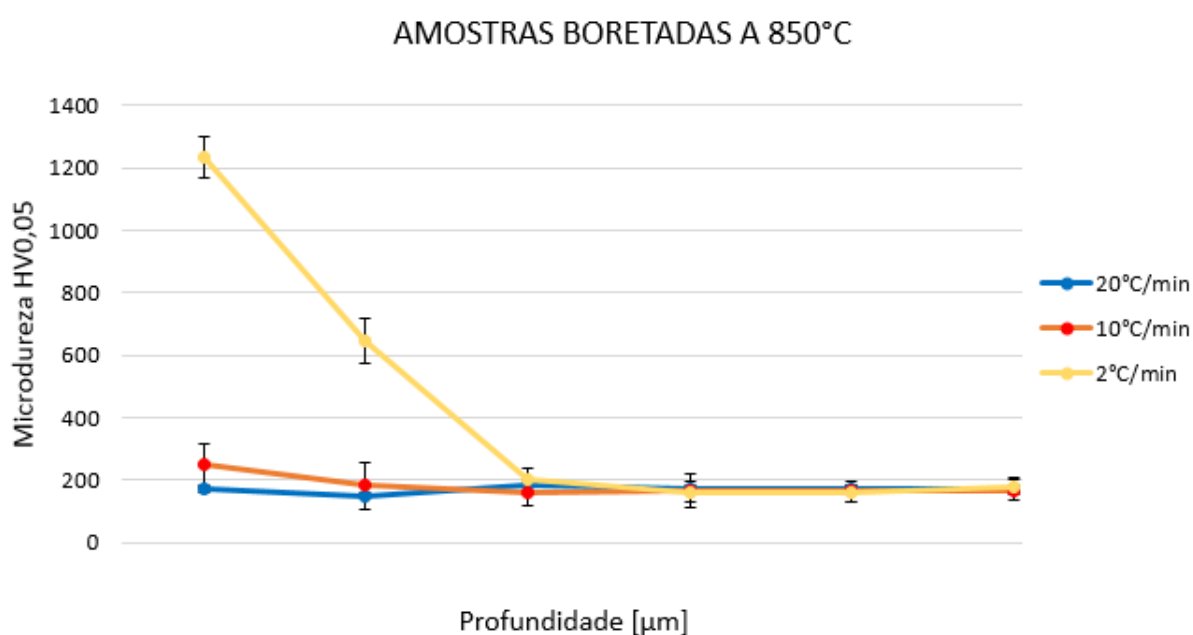
Observa-se também que para as três taxas ao longo do interior da camada, tendem a permanecer com valores lineares. A taxa de 2°C/min começa a atingir valores lineares de dureza a partir de 80 µm de profundidade. As taxas de 10 e 20°C/min começam a estabilizar a dureza a partir dos 40 µm de profundidade. A dureza onde as taxas se encontram é de aproximadamente 200HV.

Observando a taxa de aquecimento de 2°C/min é possível identificar que a linha de tendência formada não sofre uma queda tão abrupta quanto sofrem as taxas de 10 e 20°C/min. Isso ocorre devido a uma zona de difusão que há abaixo da camada.

Para as amostras boretadas a 850°C (Gráfico 4), a dureza máxima atingida foi de 1236HV na taxa de aquecimento de 2°C/min. Conforme apresentado anteriormente na Figura 19, houve maior formação de camada boretada nesta temperatura.

É possível verificar também que a camada formada com taxa de 10°C/min, com uma pequena camada aparente, conforme demonstrado na Figura 20, não conseguiu atingir valores de durezas significantes, ficando próxima da dureza do metal de base.

Gráfico 4: Comparativo das durezas obtidas pelo tratamento de boretção a 850°C



Fonte: o autor (2016)

Para a temperatura de tratamento de 700°C, dos quais não houve desenvolvimento aparente de camada boretada, também não foram identificados valores de durezas significativos, sendo que os valores registrados são equivalentes aos valores do aço ABNT1020.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

De acordo com os resultados obtidos foi possível avaliar que as taxas de aquecimento influenciam diretamente na morfologia, espessura e dureza da camada boretada.

Os melhores resultados de espessura e dureza de camada foram obtidos pela taxa de aquecimento de $2^{\circ}\text{C}/\text{min}$ na temperatura de tratamento de 1000°C e 850°C .

Notou-se que a taxa de aquecimento de $2^{\circ}\text{C}/\text{min}$ traz ótimos resultados, pois possui um intervalo de temperatura menor em comparação com as demais taxas utilizadas, nas quais, o aquecimento acaba sendo mais acelerado. Dessa forma, quanto menor a taxa de aquecimento, maior será a espessura de camada formada, melhor serão os valores de dureza da camada.

A partir de 850°C já é possível obter valores de espessura de camada e de dureza de camada significantes com a utilização da taxa de aquecimento de 2°C .

Além disso, concluiu-se que a temperatura de 700°C , independentemente da taxa de aquecimento utilizada, não é suficiente para a difusão dos átomos de boro para formação de camada boretada. Assim como também não há evidências de alteração nos valores de dureza que possivelmente possam ter sido gerados pelo tratamento;

Com baixos índices de carbono, a camada formada possui morfologia do tipo "dente de serra" como apresenta a literatura estudada.

De uma maneira geral, as taxas de aquecimento podem ser uma forma viável e econômica para o tratamento e que possivelmente os resultados possam se tornar ainda melhores a com utilização de taxas de aquecimento menores que $2^{\circ}\text{C}/\text{min}$, partindo da conclusão de que quanto menor a taxa de aquecimento maiores serão as espessuras e durezas geradas na camada.

REFERÊNCIAS

- ALLAOUI, O.; BOUAOUADJA, N.; SAINDERNAN, G. Characterization of boronized layers on a XC38 steel. **Surface and Coatings Technology**, v. 201, p. 3475-3482, 2006.
- ALMEIDA, E. Surface treatments and coatings for metals. **American Chemical Society**, p.3-14,2001.
- ASKELAND, R. Donald; PHULÉ, P. Pradeep. **Ciência e Engenharia dos materiais**. 2. ed. São Paulo: Cengage Learning, 2008. 594 p.
- ASM INTERNACIONAL. **ASM Handbook**. V. 4 – Heat Treating, 1991.
- ATIK, E. The effects of conventional heat treatment and boronizing on abrasive wear and corrosion of SAE 1010, SAE 1040, D2 and 304 steels. **Tribology International**, v. 36, n. 3, p. 155-161, 2003.
- BEJAR, M.; MORENO, E. Abrasive wear resistance of boronized carbon and low-alloy steels. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 173, n. 3, p. 352-358, 2006.
- BINDAL, C.; SEN, S.; SEN, U. An approach to kinetic study of borided steels. **Surface and Coatings Technology**, v. 191, p. 274-285, 2005.
- CAMPOS-SILVA, I.; ORTIZ-DOMÍNGUEZ, M.; LÓPEZ-PERRUSQUIA, N. et al. Characterization of AISI 4140 borided steels. **Applied Surface Science**, v. 256, n. 8, p. 2372-2379, 2010.
- FRANCO, F. J. **Avaliação do comportamento tribológico dos aços ABNT 1020 e 1045 submetidos a tratamentos termoquímicos sólidos**, 2014. 160 f.. Dissertação (Mestrado em Ciência e Engenharia de Materiais) – Universidade do Estado de Santa Catarina.
- HECK, S. C. **Influência da boretação com pó na resistência ao desgaste, corrosão e oxidação dos aços AISI 1060 e AISI H13**, 2010. 94 f.. Dissertação (Mestrado em ciência e Engenharia de Materiais) – Escola de Engenharia de São Carlos.

KRELLING, A. P. **Estudo do comportamento tribológico do aço AISI H13 submetido a tratamento termoquímico de boretação**, 2012. 88 f.. Dissertação (Mestrado em Ciência e Engenharia de Materiais) – Universidade do Estado de Santa Catarina.

MARIANI, F. E. **Tratamentos térmicos e termoquímicos de boroaustêmpera em ferros fundidos nodulares e caracterização dos produtos resultantes**, 2014. 98 f.. Dissertação (Mestrado em Ciências) - Escola de Engenharia de São Carlos.

MARTINI, C.; PALOMBARINI, G.; CARBUCICCHIO, M. Mechanism of thermichemical growth of iron borides on iron. **Journal of Materials Science**, v. 39, n.3, p. 933-937, 2004.

OLIVEIRA, K. N. de,. **Avaliação de camadas de carbonetos e de boretos produzidas nos aços AISI H13 e D2 por meio de tratamentos termo-reativos**, 2006. 136 f.. Tese (Doutorado em Ciência e Engenharia de Materiais) – Universidade de São Paulo.

PADILHA, Angelo Fernando; AMBROZIO, Francisco Filho. **Técnicas de análise micro estrutural**. 1. Ed. Hemus, 2004.190 p.

PETROVA, R. S.; SUWATTANANONT, N.; SAMARDZIC, V. **The effect of boronizing on metallic alloys for automotive applications**. Journal of Materials Engineering and Performance, V. 17, n 3 p. 340-345, 2008.

SELÇUKA, B.; IPEK, R.; KARAMIS, M. B.; KUZUCU, V.; An investigation on surface properties of treated low carbon and alloyed steels (boriding and carburizing). **Journal of Materials Processing Technology**., v.103, p. 310-317, 1999.

SEN, U.; SEN, S. The fracture toughness of borides formed on boronized cold work tool steels. **Mater Character.**, v.50, p. 261-267, 2003.

SEN, S.; SEN, U.; BINDAL, C. The growth kinetics of borides formed on boronized AISI 4140 steel. **Vacuum**, v.77, n 2, p. 195-202, 2005.

SINHA, A. K. Boriding (Boronizing). **ASM Handbook**, ASM International, v.4, p.437-447, USA, 1991.

SMITH, F. William; HASHEMI, Javad. **Fundamentos da Engenharia e Ciência dos Materiais**. 5. Ed. Porto Alegre: AMGH, 2012. 707p.

VALE, Alan Rafael Menezes do. **Tratamento térmico**. 2011. Instituto Federal de Educação Ciência e Tecnologia do Pará. Belém, Pará. 2011. 15p.