

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO  
ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE MATERIAIS

GUSTAVO BORTOLUCI DE ASSIS

Verificação dos efeitos dos tratamentos térmicos de austêmpera e boroaustêmpera em ferro  
fundido nodular ligado

São Carlos  
2016



**GUSTAVO BORTOLUCI DE ASSIS**

**Verificação dos efeitos dos tratamentos térmicos de austêmpera e boroaustêmpera em ferro fundido nodular ligado**

Trabalho de conclusão de curso apresentado  
à Escola de Engenharia de São Carlos da  
Universidade de São Paulo,

Orientador: Prof. Dr. Luiz Carlos Casteletti  
Co-orientador: M.e Fábio Edson Mariani

Área de concentração: Engenharia de  
Materiais

São Carlos  
2016

AUTORIZO A REPRODUÇÃO E DIVULGAÇÃO TOTAL OU PARCIAL DESTE TRABALHO, POR QUALQUER MEIO CONVENCIONAL OU ELETRÔNICO, PARA FINS DE ESTUDO E PESQUISA, DESDE QUE CITADA A FONTE.

B982v      Bortoluci de Assis, Gustavo  
                 Verificação dos efeitos dos tratamentos térmicos de austêmpera e boroaustêmpera em ferro fundido nodular ligado / Gustavo Bortoluci de Assis; orientador Luiz Carlos Casteletti; coorientador Fábio Edson Mariani. São Carlos, 2016.

Monografia (Graduação em Engenharia De Materiais e Manufatura) -- Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, 2016.

1. Ferro fundido nodular. 2. Austêmpera. 3. Boretação. 4. Boroaustêmpera. 5. Desgaste adesivo. I. Título.

**Formulário para relatório de defesa de TCC**

Relatório de defesa pública de Trabalho de Conclusão de Curso da Escola de Engenharia de São Carlos, da Universidade de São Paulo.

Aluno	Gustavo Bortoluci de Assis		No. USP: 8004284
Orientador ou resp. pela disciplina	Luiz Carlos Casteletti		No. USP: 50410
Titulo do TCC	Verificação dos efeitos dos tratamentos térmicos de austempera e boroaustempera em ferro fundido nodular ligado		
Curso ou Ênfase	Engenharia de Materiais e Manufatura		
Disciplina	SMM0325 Trabalho de Conclusão de Curso		
Local da defesa:	Sala Verde do SMM		Data de defesa: 17 / 06 / 2016

Após declarada aberta a sessão, o(a) Sr(a) Presidente passou a palavra aos examinadores para as devidas arguições. Em seguida, a Comissão Julgadora proclamou o resultado:

Membros da Comissão Julgadora	Vínculo	Sigla Unidade	Nota
Luiz Carlos Casteletti	Professor Titular	SMM/EESC	10,0
Lauralice de C. F. Canale	Professora Titular	SMM/EESC	10,0
Gustavo Satoru Takeya	Mestre	SMM/EESC	10,0

Média = 10,0
Resultado final <input checked="" type="checkbox"/> Aprovado <input type="checkbox"/> Necessita de ajustes <input type="checkbox"/> Reprovado

**Observações da Comissão Julgadora**

Eu, Ane Fabrício, Auxiliar Acadêmico, lavrei o presente relatório que assino com os(as) Senhores(as). São Carlos, 37/6/16.

<u>Luiz Carlos Casteletti</u> Membro 1	<u>Luiz Carlos Casteletti</u> Membro 2
<u>Gustavo Satoru Takeya</u> Membro 3	<u>Gustavo Satoru Takeya</u> Membro 4
<u>Ane Fabrício</u> Orientador(a) ou responsável pela disciplina	<u>Ane Fabrício</u> Auxiliar Acadêmico



## **AGRADECIMENTOS**

A Deus, por todas as bênçãos concedidas a mim.

A minha família, em especial aos meus pais, Margareth e Jucilei, e avós, Elza e Nelson, pelo incondicional amor, dedicação e apoio em todos os desafios.

Ao Prof. Dr. Luiz Carlos Casteletti, pela confiança e apoio durante a realização do estudo.

Aos amigos do Núcleo de Pesquisa em Engenharia de Superfícies (NuPES), Clinton, Fábio, Galtiere, Kramer e Takeya, pelo companheirismo na execução deste trabalho e excelente amizade.

Aos amigos, Alexandre, Ana Flávia, Ana Victória, Carolina, Fábio Conde, Felipão, Gabriel, João Matheus, José Eduardo, José Francisco e Raíssa, pelos fortes laços de amizades construídos nos últimos quatro anos.

Aos companheiros de trabalho na empresa Raízen - Terminal de Petróleo de Ribeirão Preto, Ademilton, Aguinaldo, Darlan, Eduardo, Jonas, Luigi, Matheus, Patrícia, Túlio, Vitor e Wilson, por toda dedicação, profissionalismo e confiança a mim concedidos durante a realização do estágio.



## RESUMO

**ASSIS, G. B. Verificação dos efeitos dos tratamentos térmicos de austêmpera e boroaustêmpera em ferro fundido nodular ligado.** 39p. Monografia (Trabalho de Conclusão de Curso) – Departamento de Engenharia de Materiais, Escola de Engenharia de São Carlos – Universidade de São Paulo, São Carlos, 2016.

Tratamentos térmicos de austêmpera e de boroaustêmpera foram realizados em amostras de ferro fundido nodular ligado com Cu-Ni-Mo. A austêmpera foi realizada nas temperaturas de 240, 300 e 360 °C, por 1, 2, 3 e 4 horas e a boroaustêmpera teve temperatura de boretação de 950 °C com tempos de 2 e 4 horas e posterior tratamento de austêmpera. A resistência ao desgaste foi avaliada por meio de ensaio de desgaste microadesivo com esfera presa do tipo “calotest”. As durezas dos substratos e dos revestimentos foram analisadas por meio de ensaios de dureza Brinell e Vickers, respectivamente. Foram realizadas análises de microscopias ópticas para analisar a morfologia da secção transversal das camadas produzidas. O ferro fundido nodular austemperado a 240 °C foi o que apresentou maior dureza e melhor resistência ao desgaste, quando comparado com as outras amostras austemperadas a 300 e 360 °C e o ferro fundido sem tratamento. O tratamento de boretação produziu camadas de boretos de elevadas durezas (1700-1800 HV) e aumentou ainda mais a resistência ao desgaste dos substratos. Por meio desses resultados e das análises de microscopia ópticas, confirmou-se a eficácia do tratamento de boroaustêmpera.

Palavras-Chaves: Ferro fundido nodular. Austêmpera. Boretação. Boroaustêmpera. Desgaste adesivo.



## ABSTRACT

**ASSIS, G. B. The effects of austempering and boroaustempering treatments in nodular cast iron.** 39p. Monograph – Departament of Materials Engineering, School of Engineering of São Carlos – University of São Paulo, São Carlos, 2016.

Austempering and boroaustempering heat treatment were made on samples of ductile cast iron alloyed with Cu-Ni-Mo. Austempering was done at temperatures of 240, 300 and 360 °C for 1, 2, 3 and 4 hours and boroaustempering at 950 °C for 2 and 4 hours followed by austempering treatment. Wear resistance was evaluated by micro-adhesive wear tests and hardness by Brinell and Vickers tests, respectively. Optical micrographs were obtained to examine the morphology of the cross-section of the treated samples. For the only austempered materials, the best results of hardness and wear resistance are of those treated in the lowest temperature (240 °C). The boriding treatment further increased resistance to surface wear, producing layers with hardness of 1700-1800 HV. The effectiveness of the boroaustempering treatment was confirmed by these results and by the optical analysis done.

Key-words: Ductile cast iron. Austempered. Boride. Austempered, Boroaustempered. Adhesive wear.



## SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	15
1.1 Referencial Teórico.....	17
1.1.1 Ferros Fundidos Nodulares .....	17
1.1.2 Ferros Fundidos Nodulares Austemperados (ADI).....	17
1.1.3 Boretação.....	20
2 METODOLOGIA.....	21
2.1 Preparação das Amostras .....	21
2.2 Austêmpera .....	21
2.3 Boroaustêmpera .....	21
2.4 Preparação Metalográfica .....	22
2.5 Análises Ópticas .....	22
2.6 Ensaios de Dureza.....	22
2.7 Ensaio de Desgaste .....	23
3 RESULTADOS .....	24
3.1 Austêmpera .....	24
3.1.1 Microestrutura das amostras austemperadas e bruta de fundição .....	24
3.1.2 – Dureza das amostras austemperadas e bruta de fundição .....	25
3.1.3 - Desgaste das amostras austemperadas e bruta de fundição .....	26
3.2 – Boroaustêmpera .....	28
3.2.1 – Micrografias das camadas boroaustemperadas .....	28
3.2.2 – Durezas das camadas boroaustemperadas.....	30
3.2.3 – Desgaste das camadas boroaustemperadas .....	31
4 CONCLUSÕES .....	36
5 REFERÊNCIAS .....	37



## 1 INTRODUÇÃO

Os ferros fundidos nodulares são ligas metálicas a base de Fe-C-Si onde a grafita é encontrada no formato esferoidal devido a ação dos elementos químicos Ce ou Mg. Eles apresentam boa combinação de resistência à tração, ductilidade e fadiga, juntamente com o seu menor custo de produção, em comparação com o aço, devido ao seu menor ponto de fusão.

Assim, ferros fundidos nodulares têm sido amplamente utilizados nas indústrias de máquinas, automobilística, mineração e como material estrutural. Entretanto, em condições severas de trabalho, observadas por exemplo, em movimentações de terra e mineração, esses materiais podem ter suas aplicações limitadas devido aos desgastes abrasivos e erosivos, que são influenciados pela quantidade, tamanho e distribuição dos nódulos de grafita.

Para melhorar a resistência ao desgaste desses ferros fundidos e ampliar seu campo de aplicação, utiliza-se o tratamento térmico de austêmpera, que resulta no material uma microestrutura única, constituída de ferrita acicular e austenita retida de alto carbono, denominada ausferrita. Com isso, são chamados de ferros fundidos nodulares austemperados (ADI – Austempered Ductile Iron).

Alguns elementos de liga são adicionados ao ferro fundido nodular para melhorar sua austemperabilidade, isto é, prevenir a formação de perlita entre a temperatura de austenitização e a de austêmpera. Dentre essas adições, destacam-se o cobre, níquel e molibdênio.

A possibilidade da produção de camadas superficiais com durezas elevadas, resistentes ao desgaste e/ou à corrosão pode ampliar ainda mais o campo de aplicação dos ADI's. Nesse contexto, destaca-se o tratamento de boretação, capaz de produzir camadas com durezas muito superiores em comparação com a maioria dos tratamentos termoquímicos.

A boretação líquida é um tratamento termoquímico que consiste na deposição e difusão de átomos de boro na superfície do material usando-se um banho de sal a altas temperaturas. Dependendo do potencial de difusão do boro, duas fases podem constituir a camada, FeB e/ou Fe<sub>2</sub>B. É desejável que o tratamento resulte em uma fase única Fe<sub>2</sub>B, uma vez que o FeB é muito duro e frágil.

O objetivo deste trabalho consistiu na verificação do efeito dos tratamentos térmicos de austêmpera e de boroaustêmpera, realizados em diferentes temperaturas, nas propriedades de um ferro fundido nodular ligado, em termos de alterações microestruturais, dureza e resistência ao desgaste.

## 1.1 Referencial Teórico

### 1.1.1 Ferros Fundidos Nodulares

Os ferros fundidos nodulares (DI – Ductile Iron) são ligas metálicas a base de Fe-C-Si com os elementos Carbono, entre 2,1 e 4,5%, Silício entre 1,0 a 3,0 %, necessário para a formação da grafita, e outros elementos de liga como Magnésio e/ou Cério para a obtenção de grafita nodular.

Esses materiais são amplamente utilizados por apresentarem boa combinação de resistência à tração, ductilidade e fadiga, uma vez que a grafita na forma esférica não atua como concentrador de tensões, além do seu menor custo de produção, em comparação com o aço, devido ao seu menor ponto de fusão [1].

Assim, os ferros fundidos nodulares têm sido amplamente utilizados nas indústrias de máquinas, automobilística, mineração e como material estrutural. Entretanto, em condições severas de trabalho, observadas por exemplo, em movimentações de terra e mineração, os DI's podem ter suas aplicações limitadas devido aos desgastes abrasivos e erosivos, que são influenciados pela quantidade, tamanho e distribuição dos nódulos de grafita [2].

### 1.1.2 Ferros Fundidos Nodulares Austemperados (ADI)

Para melhorar a resistência ao desgaste dos ferros fundidos e ampliar seu campo de aplicação, utiliza-se o tratamento térmico de austêmpera constituído de duas etapas. A primeira etapa (1), denominada de austenitização, consiste no aquecimento até uma faixa de temperatura ( $T_\gamma$ ) entre 850 e 950 °C por tempo suficiente para que a microestrutura resultante seja de austenita saturada de carbono, seguida por uma segunda etapa (2) de resfriamento rápido até uma temperatura ( $T_{AUS}$ ) entre 230 e 400 °C, na qual permanecerá o tempo necessário para que o material adquira isotermicamente uma microestrutura única, constituída de ferrita acicular e austenita retida de alto carbono, denominada ausferrita (3-I). Com isso, são chamados de ferros fundidos nodulares austemperados (ADI – Austempered Ductile Iron) [3]. Necessita-se o controle do tempo de austêmpera, pois, caso o material permaneça na  $T_{AUS}$  por um tempo maior ocorrerá à precipitação de carbonetos tipo epsilon ( $\varepsilon$ ) a partir da austenita retida de elevado teor de carbono, fase que é chamada de bainita (3-II) e não é desejável pois esta fragilizará o material. A Figura 1 apresenta um diagrama esquemático desse processo.

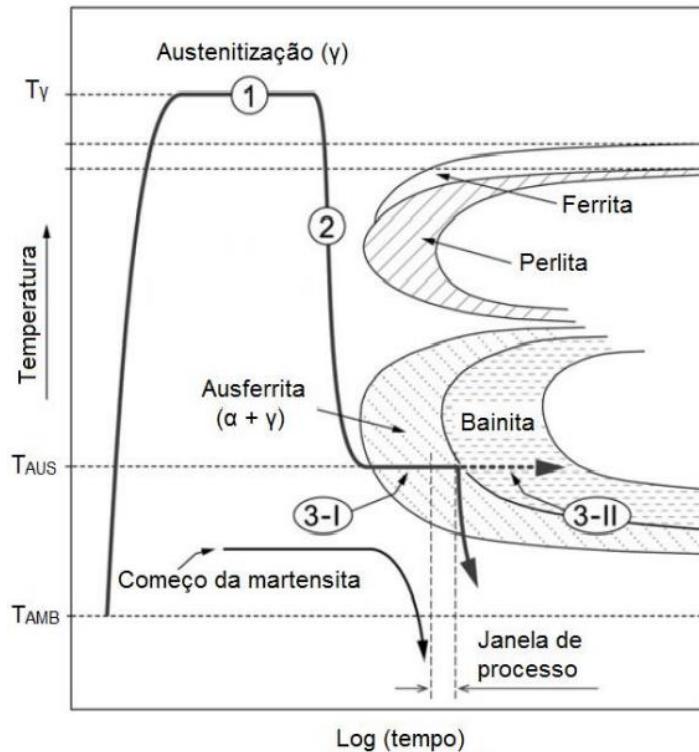


Figura 1 - Diagrama TTT (temperatura, tempo-transformação) do tratamento térmico de austêmpera, no qual (1) consiste na austenização, (2) na austêmpera, (3-I) formação de ausferrita, (3-II) formação de bainita, ( $T_{AMB}$ ) é a temperatura ambiente, ( $T_{AUS}$ ) é a temperatura de austêmpera e ( $T_y$ ) é a temperatura de austenização [4].

Alguns elementos de liga são adicionados ao ferro fundido nodular para melhorar sua austemperabilidade, isto é, prevenir a formação de perlita entre a temperatura de austenização e a de austêmpera. Dentre essas adições, destacam-se o cobre, níquel e molibdênio [5].

Mattar *et al.*[5] verificaram a influência dos elementos de liga acima citados na austemperabilidade e concluíram que os ferros fundidos nodulares ligados com Mo apresentaram maior estrutura ausferrítica completa e que outros elementos de liga como Cu, Ni e também o Mo, aumentaram as resistências ao desgaste desses materiais.

A combinação de resistência mecânica, tenacidade à fratura e resistência ao desgaste e à fadiga são a razão da utilização dos ADI's, principalmente em substituição a alguns aços forjados. A seguir são apresentadas algumas vantagens:

- Seu custo de produção é inferior ao de peças de aços forjados, pois o consumo de energia para fundição do ferro fundido é menor em virtude do ponto de fusão situar-se a uma temperatura mais baixa que a dos aços, conforme em destaque na Figura 2, reduzindo também os custos com equipamentos [6].

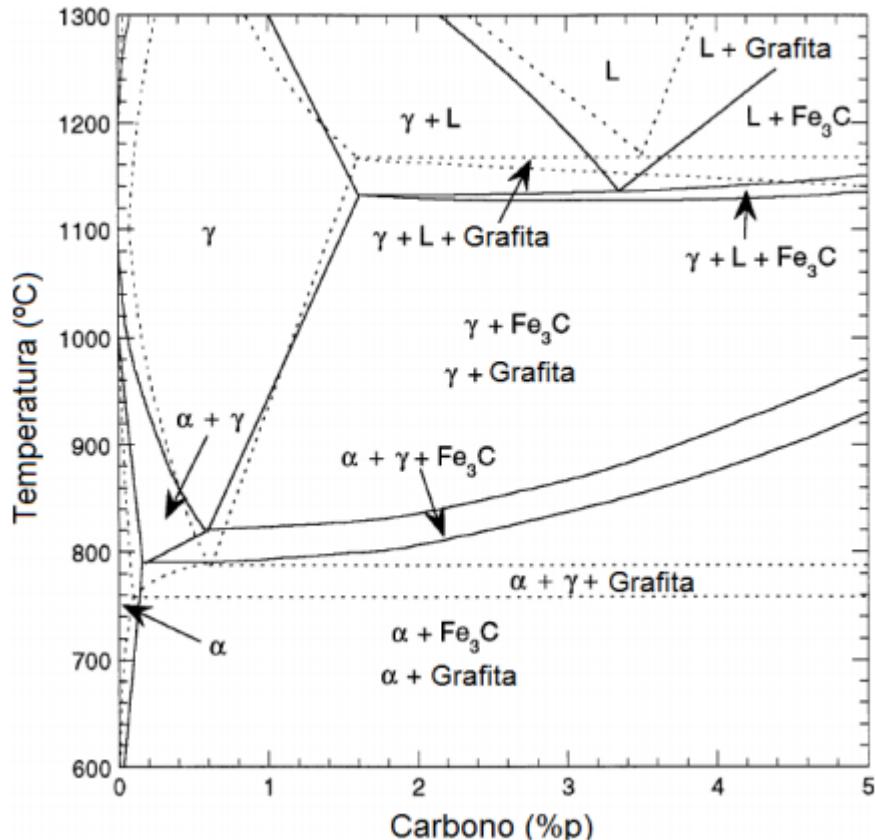


Figura 2 - Diagrama de fases do sistema Fe-C (em linhas contínuas) e Fe-C-Si (em linhas pontilhadas) para um teor de Si de 2,5%p [7].

- As peças resultantes do processo de fundição são obtidas em dimensões próximas às da peça final (net near shape) e possuem menor densidade em relação aos aços forjados, sendo interessantes no setor automobilístico [8].
- Em comparação aos aços forjados, os ADI's apresentam maior capacidade de amortecimento de vibrações pela presença de grafita em sua matriz [9].

### 1.1.3 Boretação

A possibilidade da produção de camadas superficiais com durezas elevadas, resistentes ao desgaste e/ou à corrosão pode ampliar ainda mais o campo de aplicação dos ADI's. Nesse contexto, destaca-se o tratamento de boretação, capaz de produzir camadas com durezas muito superiores em comparação com a maioria dos tratamentos termoquímicos.

A boretação líquida é um tratamento termoquímico que consiste na difusão e deposição de átomos de boro na superfície do material usando-se um banho de sal a altas temperaturas. Normalmente o procedimento é realizado aquecendo-se o material em banho de sal fundido entre 700 e 1100 °C, permanecendo pelo tempo suficiente para difusão do boro na superfície do material a ser revestido, resultando em uma camada com espessura de até 150µm [10].

Dependendo do potencial de difusão do boro, duas fases podem constituir a camada, FeB e/ou Fe<sub>2</sub>B, como mostrada na Figura 3. Um baixo potencial produz apenas a fase Fe<sub>2</sub>B e um alto potencial produz a fase FeB juntamente com a Fe<sub>2</sub>B. É desejável que o tratamento resulte em uma fase única Fe<sub>2</sub>B, uma vez que o FeB é muito duro e frágil. Isso é conseguido controlando-se a temperatura e tempo do procedimento [11]. No caso de aços e ferros fundidos ligados, formam-se também boretos dos elementos de liga.

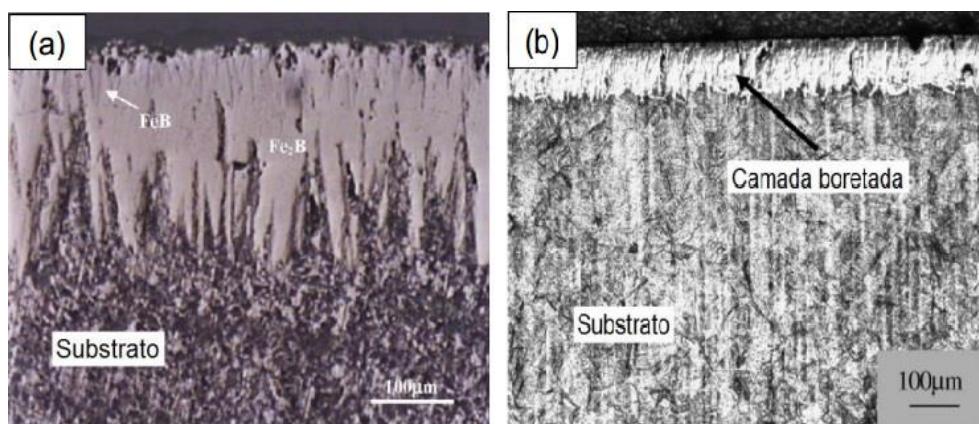


Figura 3 - (a) Camada boretada do tipo “dente de serra” produzida em um aço com teor de carbono de 0,30%p e de fósforo a 0,02%p [12]; (b) Camada boretada com morfologia mais uniforme produzida em um aço AISI P20 [13].

## 2 METODOLOGIA

Utilizou-se neste trabalho um ferro fundido nodular de matriz perlítica com adição de elementos de liga, sendo sua composição química apresentada na Tabela 1.

Tabela 1 – Composição química do ferro fundido nodular.

Elemento Químico	C	Si	Mn	Cu	Ni	Mo	C.E. <sup>(1)</sup>
% em peso	3,8	2,55	0,26	0,72	1,62	0,25	4,65

<sup>(1)</sup> – Carbono equivalente.

### 2.1 Preparação das Amostras

Utilizou-se 12 amostras para a austêmpera e 24 para a boroaustêmpera. Para efeito comparativo, uma amostra no estado bruto de fundição foi utilizada.

### 2.2 Austêmpera

Para o tratamento térmico de austêmpera, as amostras foram aquecidas em um forno convencional a uma temperatura de 900 °C, permanecendo no mesmo por 30 minutos para austenitização. Posteriormente, a austêmpera nas amostras foi feita em três temperaturas, 240, 300 e 360 °C, com tempos de permanência de 1, 2, 3 e 4 horas em um banho de sal, para cada temperatura, com posterior resfriamento ao ar.

### 2.3 Boroaustêmpera

Para a boretação destes materiais foi selecionada a temperatura de 950°C, com tempos de permanência de 2 e 4 horas em banho de sal. O sal utilizado na boretação foi o Bórax (borato de sódio P.A.:  $Na_2B_4O_7 \cdot 10H_2O$ ) e alumínio (10% em peso). Em seguida, as amostras foram austemperadas em um segundo banho (boroaustêmpera), visando tornar o processo mais viável economicamente, uma vez que se eliminaria a necessidade de um reaquecimento posterior.

Para cada tempo de boretação realizou-se a austempera em três temperaturas (240, 300 e 360 °C) com tempos de permanência no banho de sal de 1, 2, 3 e 4 horas, para cada temperatura.

As propriedades obtidas com a deposição de boro sobre o ADI, tais como dureza superficial, resistência ao desgaste e análise microestrutural da camada foram analisadas.

Tais resultados foram comparados com os obtidos nas amostras apenas austemperadas, para verificação da efetividade do tratamento de boretação naquelas propriedades.

## 2.4 Preparação Metalográfica

Após serem realizados os tratamentos térmicos, as amostras foram embutidas em baquelite e lixadas seguindo a granulometria apresentada na Tabela 2. Após o lixamento, realizou-se o polimento em alumina 0,05 µm.

Tabela 2 - Sequência de lixas

Ordem	1 <sup>a</sup>	2 <sup>a</sup>	3 <sup>a</sup>	4 <sup>a</sup>	5 <sup>a</sup>	6 <sup>a</sup>	7 <sup>a</sup>	8 <sup>a</sup>
Granulometria	80	120	240	320	440	600	800	1200

## 2.5 Análises Ópticas

Para análise metalográfica, as amostras foram atacados com Nital 2% para a visualização das microestruturas e das camadas superficiais. Assim, através de um microscópio Carl Zeiss, com câmera digital AxioCam®, usando-se o software AxioLab®, foram obtidas imagens das microestruturas.

## 2.6 Ensaios de Dureza

O ensaio de dureza Brinell foi realizado em um durômetro da Otto Wolpert-Werke, modelo Dia Testor 2 Rc, com penetrador de esfera de aço temperado com diâmetro de 2,5 mm e carga de 187,5 kgf, no caso do substrato. As durezas das camadas foram obtidas com o ensaio de microdureza Vickers em um microdurômetro da marca Buehler, modelo 1600-6300, utilizando-se carga de 200gf. Foram feitas um total de 15 medições em cada material, tendo ao final as médias e os desvios padrões.

## 2.7 Ensaio de Desgaste

Para a avaliação do desgaste adesivo utilizou-se o método de ensaio com esfera presa, do tipo “calotest”. Para esse ensaio foi utilizado uma esfera do aço AISI 52100 com diâmetro de 25,4 mm e 60 HRc de dureza. A carga de ensaio foi de 160 gf e rotação de 400 rpm. Para cada amostra usou-se 4 tempos de ensaios (5, 10, 15 e 20 minutos) e uma esfera. Ao término do ensaio obteve-se uma região desgastada em forma de calota esférica. Assim, conhecendo-se o diâmetro da calota pode-se determinar o volume de material removido, de acordo com a Equação (1), onde: V: volume removido; d: diâmetro da calota formada e R: raio da esfera.

$$V = \frac{\pi d^4}{64R} \quad \text{Equação (1)}$$

Os resultados dos ensaios de desgaste foram usados para a obtenção de um gráfico de volume removido [mm<sup>3</sup>] por distância de deslizamento [m] para cada amostra.

Todas as atividades foram realizadas no Departamento de Engenharia de Materiais da Escola de Engenharia de São Carlos, USP.

### 3 RESULTADOS

#### 3.1 Austêmpera

##### 3.1.1 Microestrutura das amostras austemperadas e bruta de fundição

A Figura 4 apresenta a microestrutura do ferro fundido nodular ligado de matriz perlítica no estado bruto de fundição.

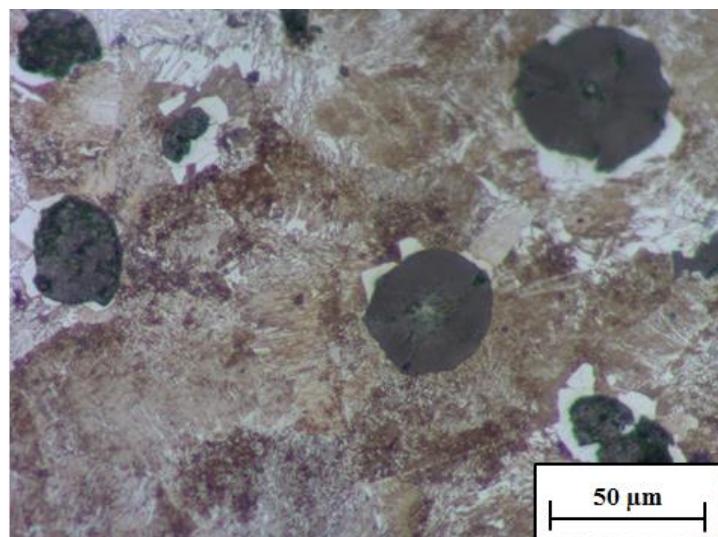


Figura 4 - Microestrutura do ferro fundido nodular ligado com Cu-Ni-Mo.

O tratamento de austêmpera alterou a microestrutura desse material como pode ser visto nas Figuras 5 a 7, de acordo com os resultados de microscopia óptica dos amostras austemperados a 240, 300 e 360 °C.

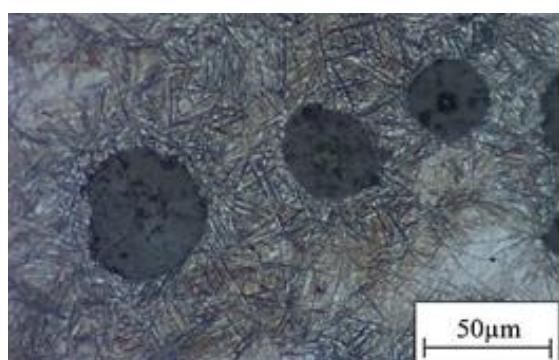


Figura 5 - ADI austemperado a 240 °C e resfriado ao ar.

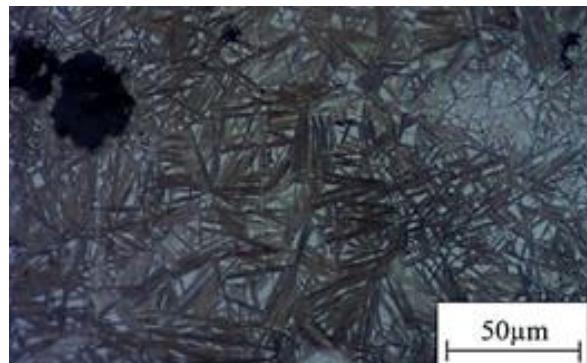


Figura 6 - ADI austemperado a 300 °C e resfriado ao ar.

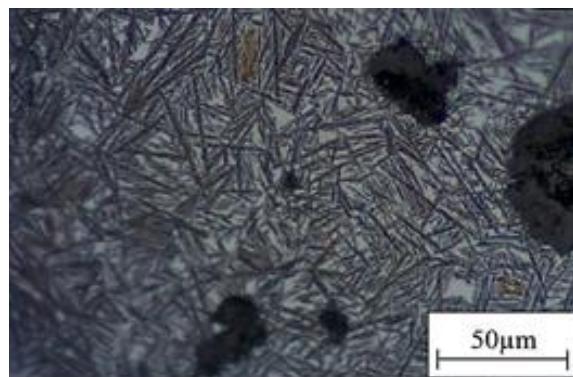


Figura 7 - ADI austemperado a 360 °C e resfriado ao ar.

Analizando-se as microestruturas apresentadas nas Figuras 5 a 7, verifica-se que as amostras austemperadas a 240 e 300 °C apresentaram estruturas mais refinadas do que as austemperadas a 360 °C. O maior refinamento da microestrutura é obtido em menores temperaturas de austêmpera, nas quais o resfriamento da austenita primária é maior e a taxa de difusão do carbono é menor, favorecendo a nucleação de placas de ferrita ao invés de seu crescimento, caracterizando a ausferrita inferior. Para temperaturas maiores, como no caso mostrado na Figura 7, foi obtida ausferrita superior, no qual a taxa de difusão do carbono é maior em virtude da temperatura de austempera ser maior, resultando uma microestrutura grosseira. Não ocorreram mudanças significativas nas microestruturas com a variação dos tempos de tratamento de austêmpera.

### 3.1.2 – Dureza das amostras austemperadas e bruta de fundição

Os resultados de dureza para os materiais austemperados a 240, 300 e 360 °C por 1, 2, 3 e 4 horas e o ferro fundido bruto de fundição estão apresentados na Tabela 3. Os valores de dureza Brinell indicam que após o tratamento térmico de austêmpera as mesmas aumentaram significativamente para as menores temperaturas de tratamento, de 240 e 300 °C.

Tabela 3: Durezas obtidas do ADI e no estado bruto de fundição

Temperatura de austêmpera	Tempo de austêmpera (horas)	Dureza (HB)
240 °C	1	554 ± 17
	2	498 ± 13
	3	456 ± 11
	4	456 ± 8
300 °C	1	417 ± 11
	2	416 ± 5
	3	416 ± 6
	4	405 ± 10
360 °C	1	324 ± 5
	2	320 ± 5
	3	317 ± 5
	4	316 ± 4
Material bruto de fundição	-	310 ± 6

Para a temperatura de 240 °C a dureza foi maior para os menores tempos de austêmpera. A 300 e 360 °C não foram notadas mudanças significativas entre os tempos de tratamento. O tratamento a 240 °C resultou nos maiores valores de durezas, para todos os tempos de tratamento, devido ao maior refinamento da microestrutura.

### 3.1.3 - Desgaste das amostras austemperadas e bruta de fundição

Na Figura 08 a 10 são apresentados os gráficos de desgaste micro adesivo para os materiais tratados a 240, 300 e 360 °C, bem como o do ferro fundido bruto de fundição.

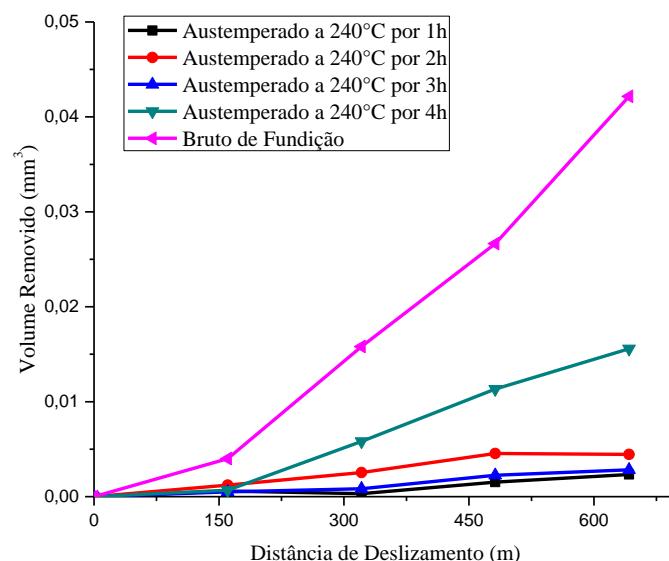


Figura 08 - Gráficos de desgastes adesivos das amostras austemperadas a 240 °C.

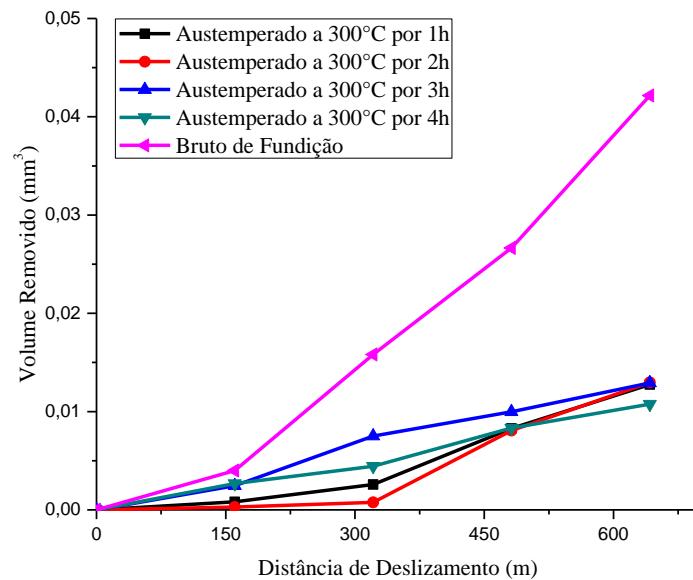


Figura 09 - Gráficos de desgastes adesivos das amostras austemperadas a 300 °C.

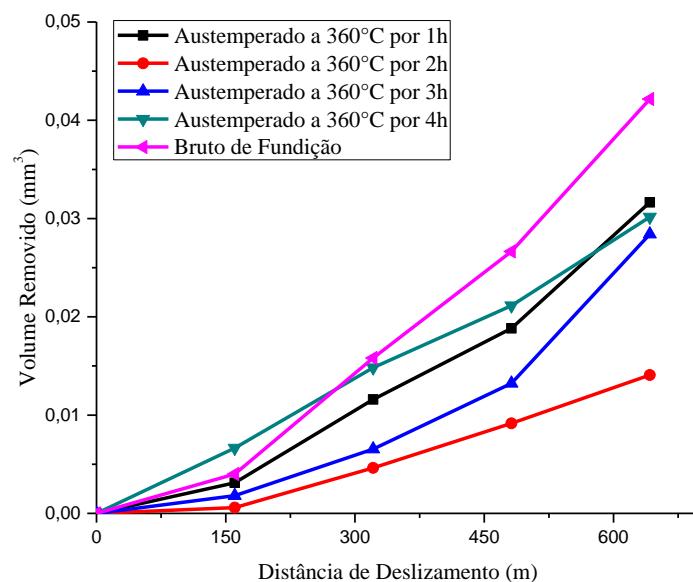


Figura 10 - Gráficos de desgastes adesivo das amostras austemperadas a 360 °C.

Analizando-se as Figura 08 a 10, verifica-se que as amostras tratadas a 240 e 300 °C apresentaram um grande aumento nas resistências ao desgaste quando comparadas com o

ferro fundido bruto, o que pode ser atribuído as maiores durezas apresentadas pelos materiais austemperados.

As amostras austemperadas a 240 °C em 1, 2 e 3 horas apresentaram excelentes comportamentos de desgaste, como é observado na Figura 08.

Para o caso das amostras austemperadas a 360 °C, verifica-se que apesar de apresentarem desempenho superior ao da amostra bruta de fundição, o mesmo foi muito inferior aos obtidos nas demais temperaturas de tratamento.

As amostras austemperadas a 300 °C (Figura 09) apresentaram desgaste intermediário em relação as outras duas temperaturas de tratamento, reforçando o princípio de que em menores temperaturas de austêmpera o desgaste é menor devido as maiores durezas decorrentes do refinamento da microestrutura.

### 3.2 – Boroaustêmpera

#### 3.2.1 – Micrografias das camadas boroaustemperadas

As Figuras 11 a 13 apresentam as micrografias dos amostras boretadas a 950°C e austemperados por 240, 300 e 360°C, respectivamente.

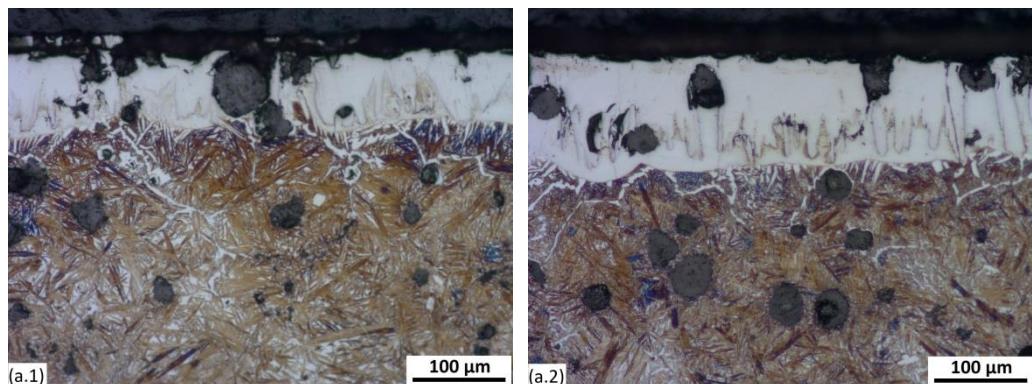


Figura 11 - Micrografias das camadas boretadas a 950 °C por 2 horas (a.1) e 4 horas (a.2) e todas austemperadas a 240 °C.

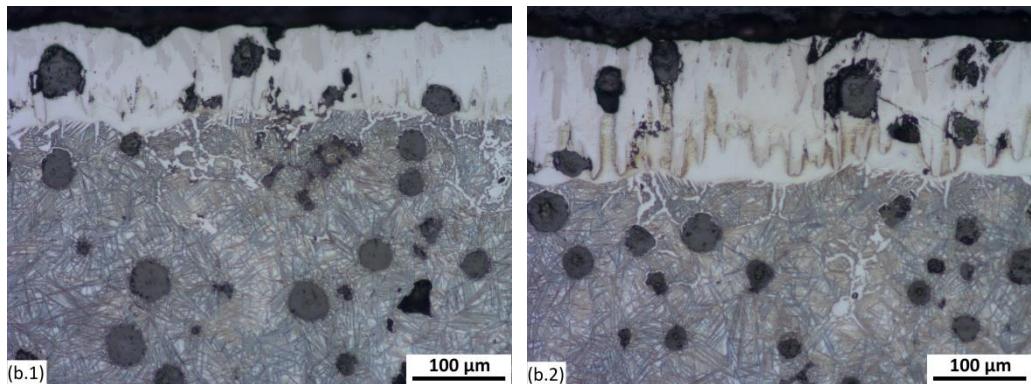


Figura 12 - Micrografias das camadas boretadas a 950 °C por 2 horas (b.1) e 4 horas (b.2) e todas austemperadas a 300 °C.

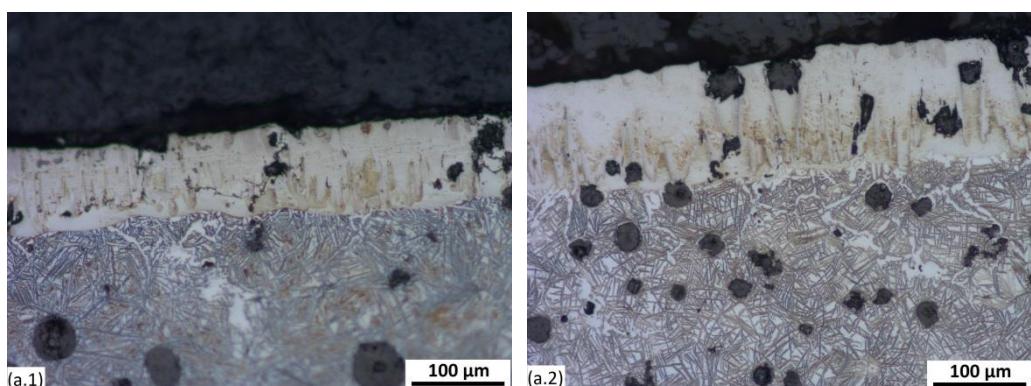


Figura 13 - Micrografias das camadas boretadas a 950 °C por 2 horas (a.1) e 4 horas (a.2) e todas austemperadas a 360 °C.

Todas as amostras que passaram pelo tratamento de boroaustêmpora formaram camadas de boreto de ferro sobre o substrato de ferro fundido, como é verificado nas Figuras 11 a 13, sendo que a espessura média das camadas formadas em 2 horas de boretação foi de aproximadamente 100µm, e a das camadas formadas em 4 horas, de 130µm, indicando o crescimento cinético da espessura da camada. Esse crescimento ocorre em duas etapas. A primeira, conforme a equação  $x^2 = Kt$ , onde x é a espessura obtida, K é o coeficiente de difusão do boro e t é o tempo de tratamento, e a segunda, de comportamento linear,  $x = K't + b$ , onde K' é o coeficiente angular da reta. Então, o crescimento da camada passa de um comportamento parabólico para um linear, conforme consta na literatura de cinética de tratamentos termoquímicos [14 - 17].

As regiões mostradas nas micrografias das Figuras 11 a 13 mostram que as seções transversais das amostras resultantes dos tratamentos de boroaustêmpora são compostas de

camadas de boretos com nódulos de grafita, com substratos ausferríticos, com formação intergranular de boreto na interface entre essas regiões.

Para as menores temperaturas de austêmpera, as amostras boroaustemperadas apresentaram microestruturas do substrato mais refinadas.

### 3.2.2 – Durezas das camadas boroaustemperadas

As Tabelas 04 e 05 apresentam os valores de Dureza Vickers das camadas boretadas por 2 e 4 horas, respectivamente, a 950 °C com posterior tratamento de austêmpera.

Tabela 04 - Dureza Vickers dos materiais boretados por 2 horas.

Temperatura de Boretação	Temperatura de Austêmpera	Tempo de Austêmpera (horas)	Dureza Vickers (HV)
240 °C	300 °C	1	1766 ± 42
		2	1764 ± 48
		3	1770 ± 51
		4	1780 ± 50
950 °C	300 °C	1	1765 ± 55
		2	1760 ± 39
		3	1783 ± 40
		4	1778 ± 37
360 °C	300 °C	1	1776 ± 34
		2	1768 ± 42
		3	1779 ± 37
		4	1788 ± 44

Tabela 05 - Dureza Vickers dos materiais boretados por 4 horas.

Temperatura de Boretação	Temperatura de Austêmpera	Tempo de Austêmpera (horas)	Dureza Vickers (HV)
240 °C	300 °C	1	1760 ± 40
		2	1768 ± 39
		3	1771 ± 56
		4	1775 ± 47
950 °C	360 °C	1	1772 ± 50
		2	1768 ± 41
		3	1779 ± 42
		4	1768 ± 50
		1	1772 ± 39
		2	1767 ± 45
		3	1769 ± 43
		4	1780 ± 41

Os tratamentos de boretação e de boroaustêmpera aumentaram significativamente a dureza superficial do ferro fundido nodular. Conforme é apresentado nas Tabelas 04 e 05, tanto os materiais apenas boretados quanto os boroaustemperados os valores de Durezas Vickers resultantes foram muito próximos, em torno de 1750HV, para os dois tempos de boretação (2 e 4 horas). Os resultados são condizentes com os encontrados na literatura [18, 19] e tornam os dois tratamentos eficazes no aumento de dureza superficial.

### 3.2.3 – Desgaste das camadas boroaustemperadas

As Figuras 14 a 19 apresentam os resultados dos ensaios de desgaste adesivo feitos nas camadas boretadas em forma de gráfico, onde no eixo vertical consta o volume removido de material em função da distância de deslizamento no ensaio, eixo horizontal.

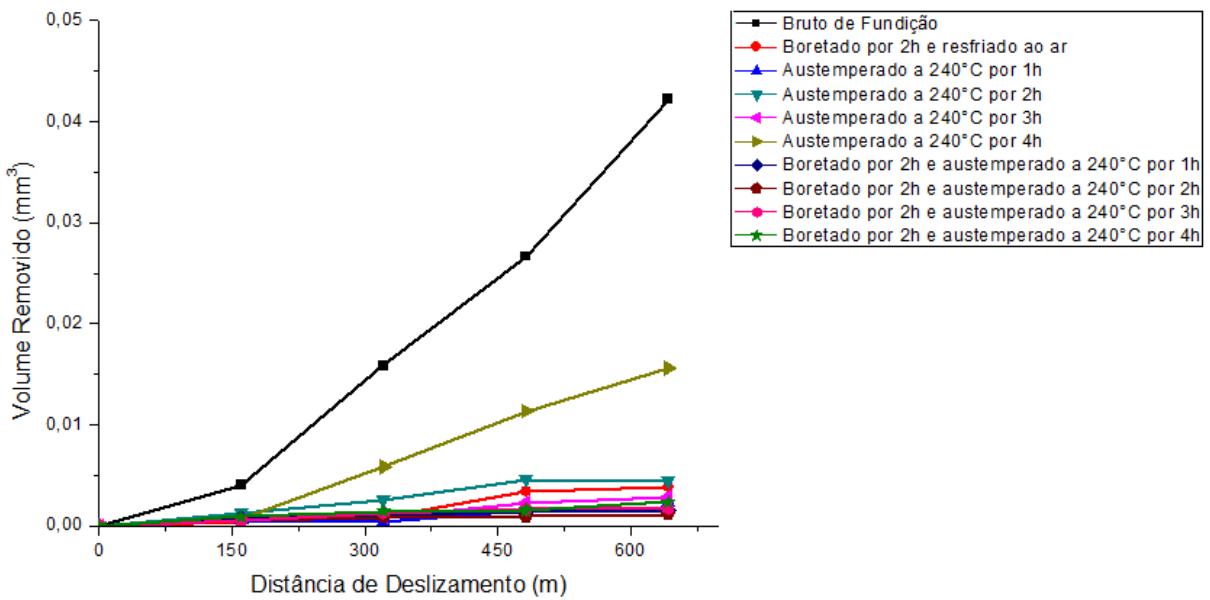


Figura 14 - Desgastes realizados nas amostras boretadas por 2 horas e austemperadas a 240 °C e das apenas austemperadas a 240 °C.

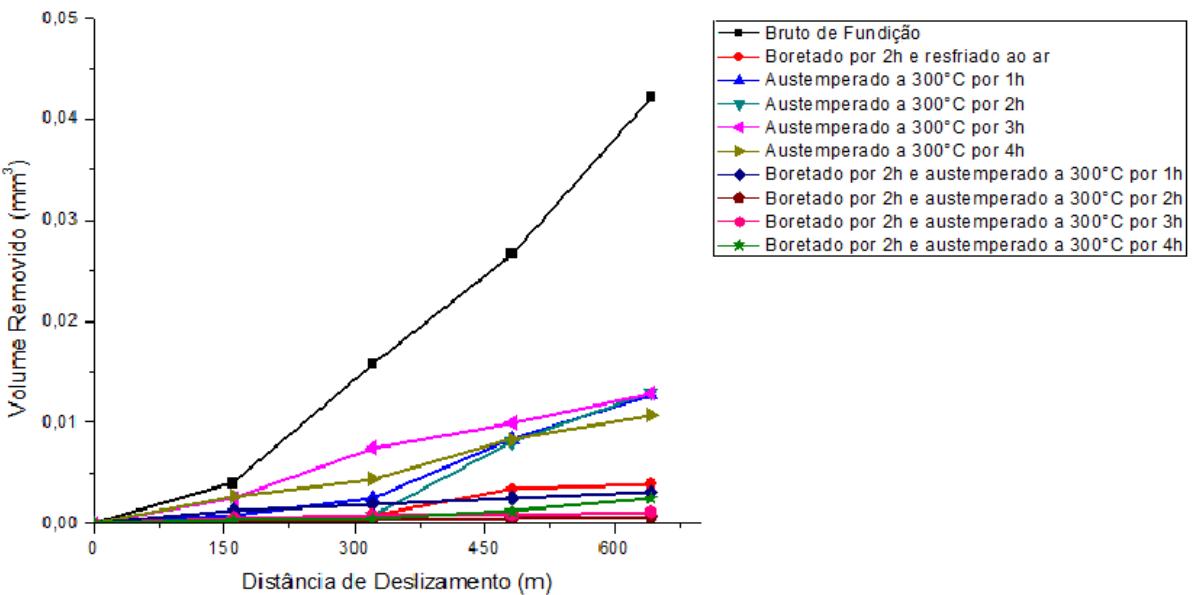


Figura 15 - Desgastes realizados nas amostras boretadas por 2 horas e austemperadas a 300 °C e das apenas austemperadas a 300 °C.

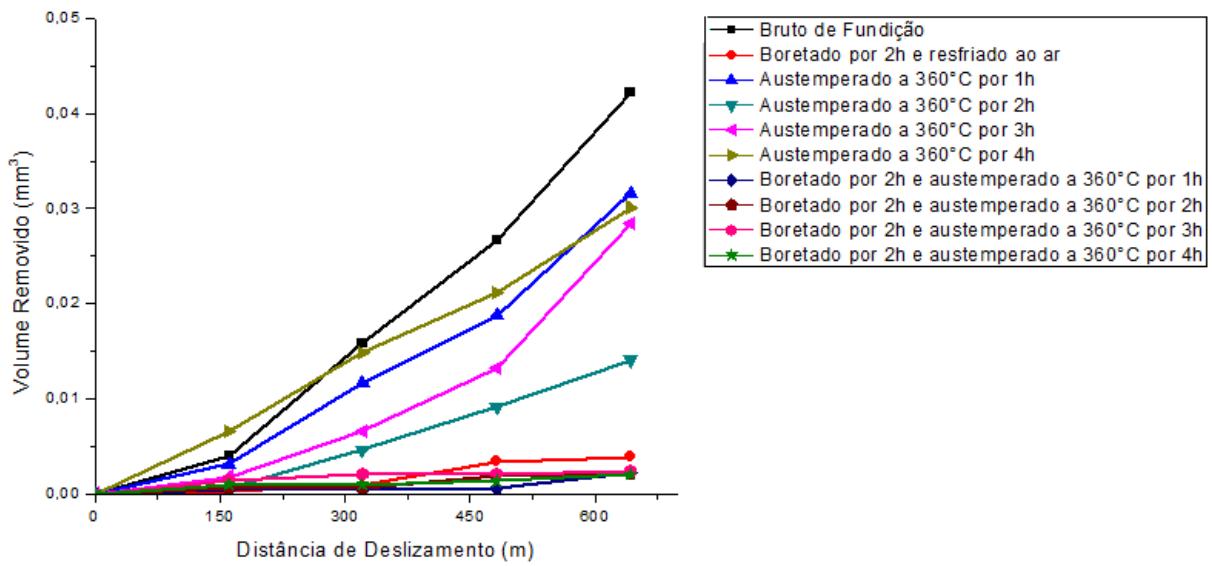


Figura 16 - Desgastes realizados nas amostras boretadas por 2 horas e austemperadas a 360 °C e das apenas austemperadas a 360 °C.

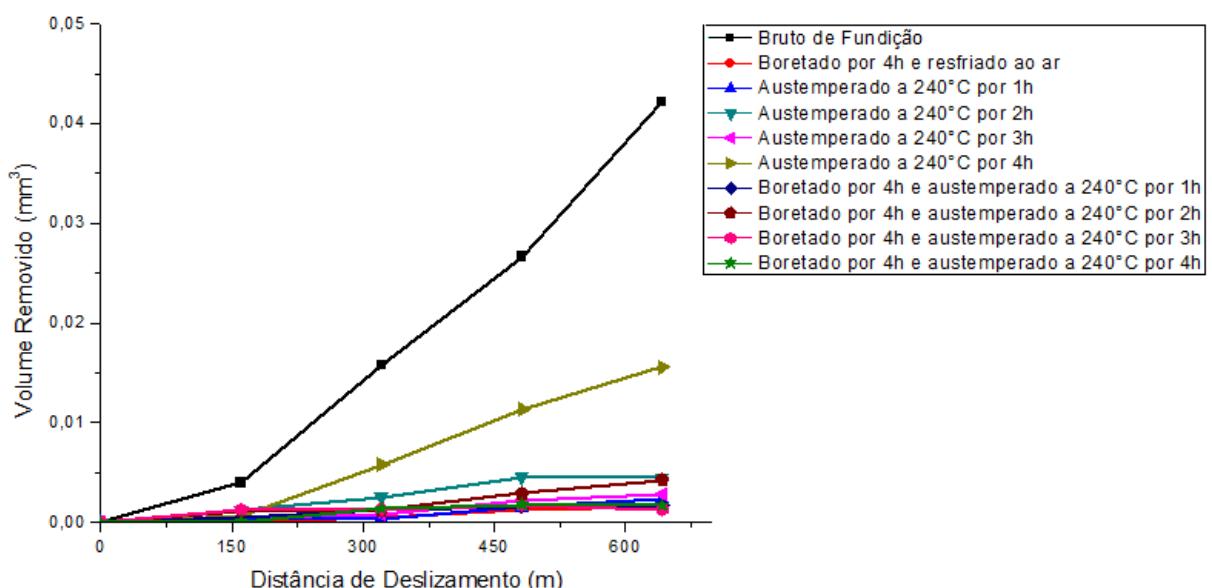


Figura 17 - Desgastes realizados nas amostras boretadas por 4 horas e austemperadas a 240 °C e das apenas austemperadas a 240 °C.

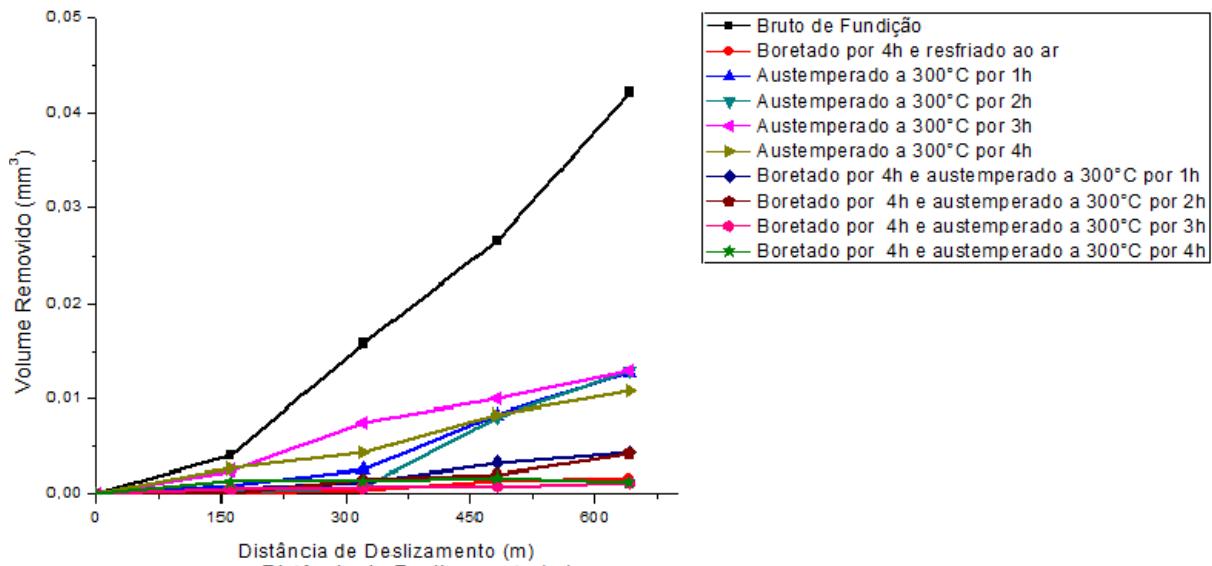


Figura 18 - Desgastes realizados nas amostras boretadas por 4 horas e austemperadas a 300 °C e das apenas austemperadas a 300 °C.

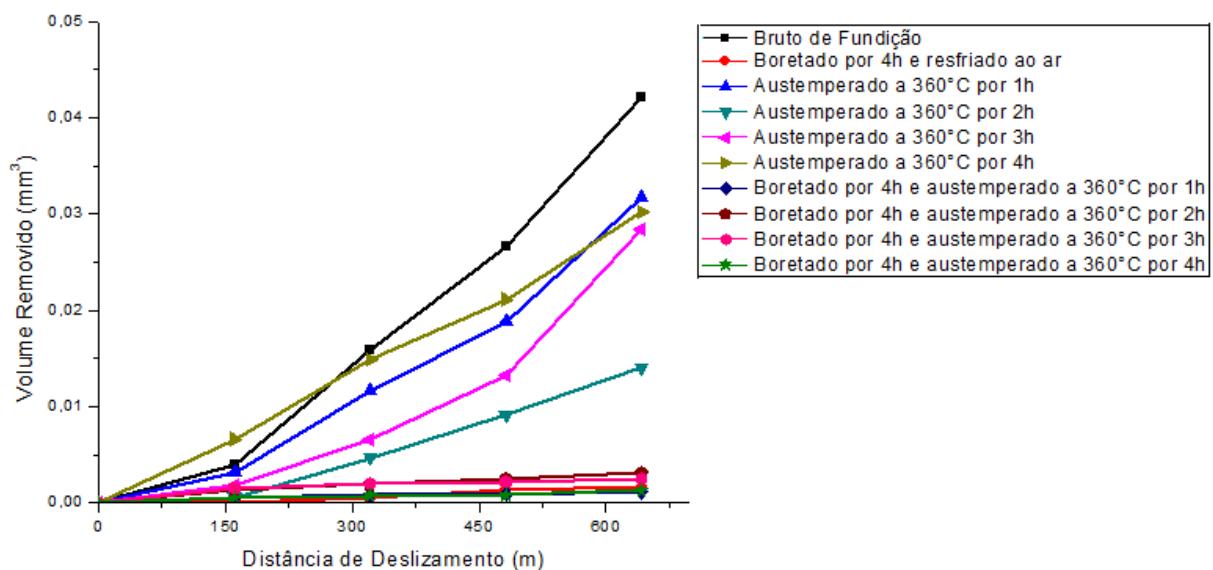


Figura 19 - Desgastes realizados nas amostras boretadas por 4 horas e austemperadas a 360 °C e das apenas austemperadas a 360 °C.

Os resultados apresentados nas Figuras 14 a 19 mostram que as camadas resultantes do tratamento de boretação aumentaram a resistência do material ao desgaste adesivo e esse fato está relacionado ao aumento da dureza superficial.

As Figuras 14 a 19 mostram que os volumes removidos nas amostras apenas austemperadas a 240 °C foram equivalentes aos boretados por 2 e 4 horas e isso ocorre devido

à elevada dureza obtida no tratamento térmico de austêmpera a 240 °C para 1, 2 e 3 horas. O mesmo não ocorre para as temperaturas de 300 e 360 °C, tendo os materiais boretados por 2 e 4 horas maior resistência ao desgaste, como é visto nas Figuras 15, 16, 18 e 19.

Não houve diferença significativa nos resultados dos materiais boretados a 950 °C por 2 e 4 horas, fato que é relacionado ao valor de dureza superficial praticamente equivalente entre as duas camadas, observado nas Tabelas 04 e 05.

## 4 CONCLUSÕES

Os tratamentos de austêmpera foram altamente efetivos nos aumentos das durezas e resistências ao desgaste das amostras, em comparação com as do ferro fundido nodular bruto de fundição.

Por meio das análises microestruturais das amostras austemperadas, verificou-se que a menor temperatura de tratamento (240 °C) produziu microestruturas ausferríticas mais refinadas, que resultaram em maiores durezas e resistências ao desgaste adesivo, em comparação com as obtidas no caso do tratamento realizado a 360 °C.

As camadas superficiais produzidas com o tratamento termoquímico de boretação apresentaram elevadas durezas, e consequente, altas resistências ao desgaste adesivo. Para os tempos de boretação, 2 e 4 horas, as durezas e resistências ao desgaste adesivo foram equivalentes, com o maior tempo de boretação produzindo as camadas mais espessas.

O tratamento de boroaustêmpera produziu camadas com características semelhantes as obtidas nos tratamentos de austêmpera e boretação separados, indicando a viabilidade daquele tratamento.

## 5 REFERÊNCIAS

- [1] LUO, Q., XIE, J., SONG, Y. **Effects of microstructures on the abrasive wear behavior of spheroidal cast iron.** Wear 184 (1995) 1 – 10.
- [2] PODGORNIK, B., VIZINTIN, J., THORBJORNSSON, I., JOHANNESSON, B., THORGRIMSSON, J.T., MARTINEZ CELIS, M., VALLE, N. **Improvement of ductile iron wear resistance through local surface reinforcement.** Wear 274 – 275 (2012) 267 – 273.
- [3] LEFREVE, J., HAYRYNEN, K. L. **Austempered Materials for Powertrain Applications. Journal of Materials Engineering and Performance.** Published online: 23 April 2013.
- [4] MEIER, L. et al. **In-situ measurement of phase transformation kinetics in austempered ductile iron.** Materials Characterization (2013), v.85, p.124-133, nov.
- [5] MATTAR A. R., HECK S. C., NETO A. L., FERNANDES F. A. P., TOTTEN G. E., CASTELETTI L. C. **Influence of alloying elements Cu, Ni and Mo on mechanical properties and austemperability of austempered ductile iron.** International Heat Treatment and Surface Engineering (2011), 5 (2):78-82.
- [6] SANTOS, G. A dos. **Estudo da decomposição da austenita em dois tipos de ferros fundidos nodulares perlíticos.** Tese (doutorado) – Interunidades Ciência e Engenharia de Materiais da Universidade de São Paulo, 2004.
- [7] SYN, C.K.; LEUSER, D.R.; SHERBY, O.D. **Tensile properties of a thermomechanically processed ductile iron.** Materials Science and Engineering (1997): A, v.28, p.1213-1218, maio.
- [8] MARIANI F. E., SPIRANDELI B. R., LOMBARDI NETO A., CASTELETTI L. C. **Characterization And Analysis Of Adhesive Wear Behavior Of Austempered Ductile Iron (ADI).** 22nd International Congress of Mechanical Engineering (COBEM 2013). November 3-7, 2013, Ribeirão Preto, SP, Brazil.
- [9] MARTINS R. et al., **Austempered ductile iron (ADI) gears: Power loss, pitting and micropitting.** Wear (2007), doi:10.1016/j.wear.2007.05.007
- [10] ISLU I. et al., **A comparison of borides formed on AISI 1040 and AISI P20 steels.** Materials and Design 28 (2007), 1819 – 1826. doi:10.1016/j.matdes.2006.04.019
- [11] KEDDAM M. **A kinetic model for the borided layers by the paste-boriding process.** Applied Surface Science. 236 (2004), 451 – 455. doi:10.1016/j.apsusc.2004.05.141

- [12]BINDAL, C.; UCISIK, A.H. **Characterization of boriding of 0,3%C, 0,02%P plain carbon steel.** Vacuum (2008), v.82, n.1, p.90-94, set.
- [13]JUSLU, I. et al. **A comparison of borides formed on AISI 1040 and AISI P20 steels.** Materials & Design (2007), v.28, n.6, p. 1819-1826.
- [14]KAYALI, Y., YALÇIN, Y., TAKTAK, S. **Adhesion and wear properties of borotempered ductile iron.** Materials and Design 32 (2011), 4295 – 4303.
- [15]GENEL, K. **Boriding kinetics of H13 steel.** Vacuum (2006), v.80, n.5, p.451-457, jan.
- [16]CHEN, F.S., WANG, K.L. **The kinetics and mechanism of multi-component diffusion on AISI 1045 steel.** Surface and Coatings Technology (1999), v.115, n.2-3, p.239-248, jul.
- [17]OZDEMIR, O. et al. **An investigation on boriding kinetics of AISI 316 stainless steel.** Vacuum (2009), v.83, n.1, p.175-179, set.
- [18]AMERICAN SOCIETY FOR METALS. **Metals handbook** (1991) Heat treating. 4v.
- [19]WANG, Q.J.; CHUNG, Y.W. **Encyclopedia of tribology** (2013). 1v. 1ed. New York: Springer.