

AVALIAÇÃO DO DESGASTE DE FERROS FUNDIDOS NODULARES BORETADOS E AUSTEMPERADOS¹

*Stênio Cristaldo Heck²
Aristides Rodrigues Mattar Júnior³
Frederico Augusto Pires Fernandes⁴
Ricardo Gomes Pereira⁵
Luiz Carlos Casteletti⁶*

Resumo

O Ferro Fundido Nodular Austemperado, também conhecido como ADI (Austempered Ductile Iron), é o tipo mais recente a integrar a família dos ferros fundidos nodulares e entre todas as classes de nodulares, os austemperados são os que apresentam a melhor combinação de resistência mecânica, tenacidade, resistência à fadiga e resistência ao desgaste. Neste trabalho foram fundidos, boretados com pó e austemperados três ferros fundidos nodulares, ligado com Cu, ligado com Cu-Ni, e ligado com Cu-Ni-Mo. Foram realizados ensaios de desgaste nas amostras boretadas-austemperadas e apenas austemperadas. Dentre as amostras não boretadas, o ADI Cu foi o que apresentou o maior desgaste, e dentre as boretadas o ADI Cu-Ni-Mo foi o que obteve melhores resultados.

Palavras-chave: ADI; Boretação; Desgaste.

WEAR EVALUATION OF BORIDED AND AUSTEMPERED NODULAR IRONS

Abstract

The Austempered Ductile Iron, also known as ADI, is the most recent to join the ductile iron family and among all ductile iron classes, the austempered shows the best combination of strength, toughness, fatigue resistance and wear resistance. In this work were merged, powder borided and austempered three ductile irons, alloyed with Cu, with Cu-Ni, and with Cu-Ni-Mo. Wear tests were performed on borided-austempered samples and austempered samples. About the not borided samples, the ADI Cu showed the largest wear, and about the borided samples, the ADI Cu-Ni-Mo was the one that got better results.

Key words: ADI; Boronizing; Wear.

¹ *Contribuição técnica ao 64º Congresso Anual da ABM, 13 a 17 de julho de 2009, Belo Horizonte, MG, Brasil.*

² *Mestrando, Químico - EESC-USP.*

³ *Mestrando, Engenheiro Mecânico – EESC-USP*

⁴ *Doutorando, Engenheiro Químico - EESC-USP.*

⁵ *Graduando – EESC-USP*

⁶ *Engenheiro de Materiais, Mestre e Doutor - Professor da EESC-USP.*

1 INTRODUÇÃO

O Ferro Fundido Nodular Austemperado, também conhecido como ADI (Austempered Ductile Iron), é o tipo mais recente a integrar a família dos ferros fundidos nodulares. Produzido por meio do processo de tratamento térmico de austêmpera, realizada na faixa de 230°C a 400°C, geralmente em ferros fundidos nodulares de matriz perlítica. Entre todas as classes de nodulares, os austemperados são os que apresentam a melhor combinação de resistência mecânica, tenacidade, resistência à fadiga e resistência ao desgaste.

A composição química do ferro fundido nodular austemperado é similar a do ferro fundido nodular convencional. Peças com maiores espessuras são fabricadas com a introdução de elementos como Cu, Ni e Mo individualmente ou combinados. Esses elementos são adicionados para aumentar a austemperabilidade da liga, ou seja, evitar a formação de perlita durante o resfriamento da temperatura de austenitização até a temperatura de austêmpera.⁽¹⁻³⁾

O termo ausferrita será usado neste trabalho para denominar a estrutura do ADI, composta unicamente por ferrita acicular e austenita estável com alto teor de carbono, sendo subdivida em ausferrita superior (para temperaturas de austêmpera maiores que 330°C) e ausferrita inferior (para temperaturas de austêmpera menores que 330°C). A norma ASTM A 897 denomina a estrutura de “ferrita acicular e austenita”.

O ciclo de tratamento térmico do ferro fundido nodular austemperado é composto inicialmente de aquecimento acima da temperatura crítica, ocorrendo a austenitização. A temperatura de austenitização é função da composição química do ferro fundido.^(4,5) Os elementos que mais influenciam a temperatura de austenitização são o Si, o Mo e o Mn, sendo que o Si e o Mo aumentam a temperatura de austenitização necessária, enquanto o Mn a diminui.⁽⁶⁾ Usualmente a temperatura de austenitização situa-se entre 825°C e 950°C. A peça deve permanecer nesta temperatura o tempo suficiente para saturar a austenita com carbono até o equilíbrio.

A temperatura de austenitização determina o máximo teor de carbono que pode ser dissolvido na austenita. O teor de carbono dissolvido na austenita, por sua vez, influenciará na cinética da transformação durante o tratamento de austêmpera.⁽⁵⁾

No ferro fundido nodular austemperado, quanto maior a quantidade de ferrita acicular na estrutura, maior a sua resistência mecânica e menor a sua ductilidade. Para altas temperaturas de austêmpera (350°C - 400°C) obtêm-se menor quantidade de ferrita acicular e maior quantidade de austenita estável, o que implica em alta tenacidade e ductilidade, porém com resistência à tração e dureza menores.⁽⁶⁾

Zimba⁽⁷⁾ verificou que a resistência ao desgaste por abrasão do ADI é muito superior a do ferro fundido nodular no estado bruto de fundição, e em relação ao aço beneficiado com dureza equivalente apresenta resistência ao desgaste duas vezes maior. Nos seus ensaios, observou que ocorreu a transformação superficial da austenita retida em martensita. Este fenômeno aumenta a dureza superficial do ADI e com isso sua resistência ao desgaste.^(8,9) Como se trata de uma transformação apenas superficial, a tenacidade do material não é perdida. Com isso, o ADI exibe uma rara combinação de alta resistência mecânica, tenacidade e resistência ao desgaste.

Hasseb⁽⁸⁾ também analisou o comportamento tribológico de um ferro fundido nodular temperado e revenido em relação a um ADI com o mesmo nível de dureza.

A maior resistência ao desgaste apresentada pelo ADI pode ser explicada pela diferença microestrutural. O ferro fundido nodular temperado e revenido consiste principalmente de martensita revenida. Este tipo de estrutura é instável devido ao aquecimento causado pelo atrito durante o ensaio, que provoca o “amolecimento” da martensita e diminuição da dureza. Por outro lado, o ADI que continha uma quantidade de austenita retida em torno de 23%, após o ensaio de desgaste não apresentou presença da mesma superficialmente, indicando que durante o ensaio a austenita transformou-se em martensita, aumentando-se a dureza superficial. O outro constituinte do ADI, a ferrita acicular, é menos propenso a instabilidade térmica do que a martensita, e pode suportar encruamento durante o ensaio de desgaste, e consequentemente obter maior dureza.

Tomando-se como base as características funcionais de um par tribológico, as ações para a proteção ao desgaste estão diretamente relacionadas à superfície do material. Esta é a razão para o aumento da importância dos sistemas de revestimentos. Desta forma o desenvolvimento e aperfeiçoamento de revestimentos contra desgaste e a sua seleção para usos específicos requerem a caracterização do comportamento do material sob os parâmetros tribológicos relevantes.

Os processos de mudança de superfície de um material podem ser definidos como tratamentos nos qual a superfície e o substrato são projetados para produzir em conjunto propriedades que não são alcançadas por um deles isoladamente.

A boretção envolve o processo de difusão do Boro no substrato a altas temperaturas. A boretção, que é um processo de endurecimento superficial, pode ser feita nos metais por meio de substâncias gasosas, como diborano ou haletos de boro, em meio líquido, como o bórax fundido, ou alternativamente por meio de agentes boretantes sólidos.

Neste trabalho, foram produzidos três ferros fundidos nodulares com diferentes composições químicas e que foram posteriormente boretados e austemperados para a verificação dessas composições e tratamentos nas resistências ao desgaste dos mesmos.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

A Figura 1 mostra o fluxograma representativo do procedimento experimental realizado.

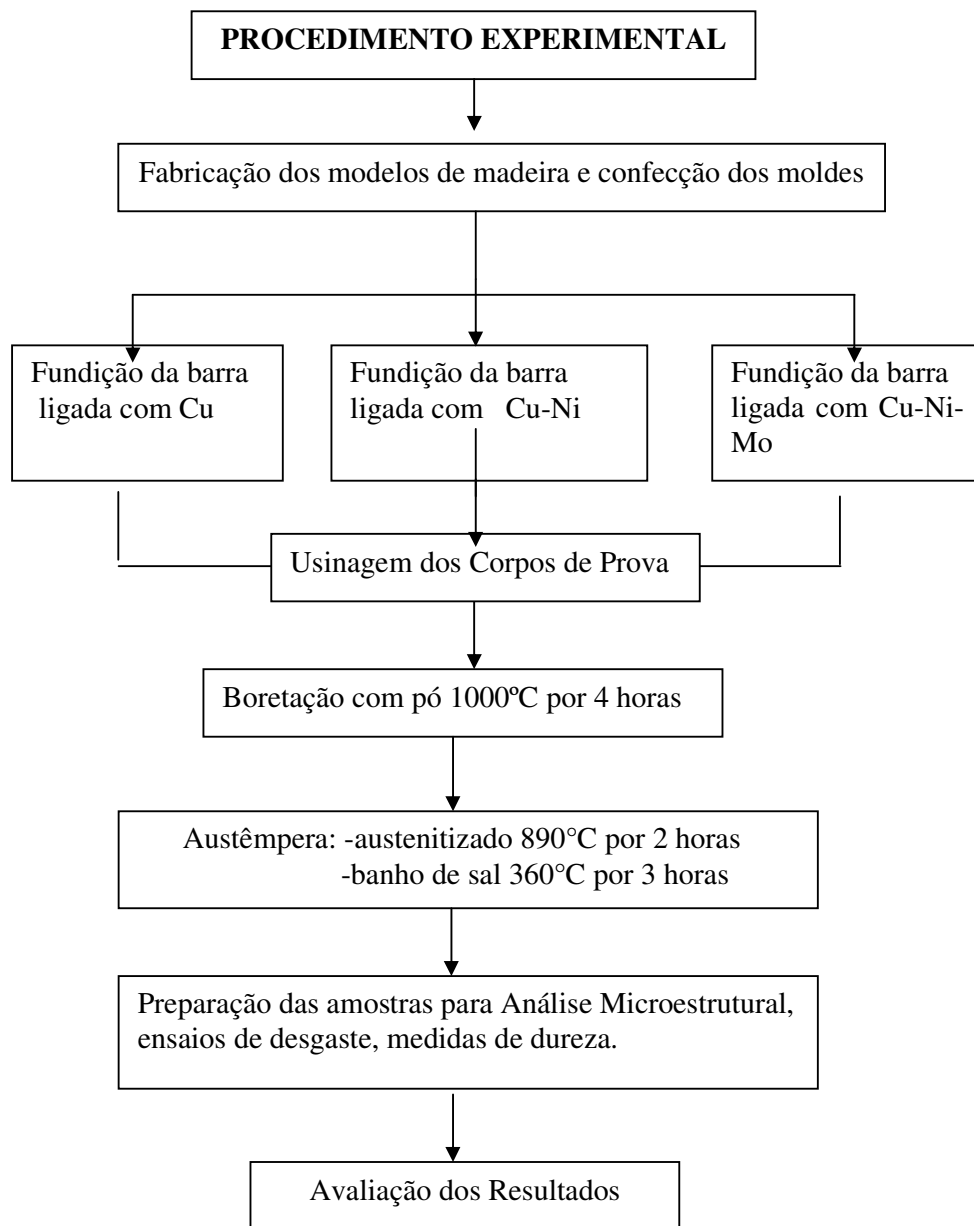


Figura 1. Fluxograma representativo do procedimento experimental realizado.

Os materiais no estado bruto de fusão foram obtidos da fundição de 20% de sucata de aço, 40% de ferro gusa e 1,6% de Fe-Si em pedras. Adicionou-se grafite granulado (carburante) o suficiente para o acerto do carbono e carboneto de silício para corrigir o silício. Na panela, foram adicionados 1,2% de Mg-Ca para a formação de grafita na forma de nódulos. O restante da carga foi composto de retorno de fundição (peças fundidas refugadas e massalotes). Foi utilizado um Forno de Indução marca Inductoterm, com temperatura ajustada em 1.500°C. O vazamento foi realizado em torno de 1.360°C em moldes de areia para a obtenção das amostras.

Foram produzidas barras cilíndricas de ferros fundidos nodulares, com três composições químicas diferentes:

- ferro fundido nodular ligado com Cu;
- ferro fundido nodular ligado com Cu-Ni; e
- ferro fundido nodular ligado com Cu-Ni-Mo.

As análises químicas foram realizadas por espectrometria, em amostras retiradas da mesma corrida das barras. Os resultados das análises químicas estão apresentados na Tabela 1. A última linha desta tabela apresenta o valor do Carbono Equivalente (C.E.) de acordo com a Equação :

$$C.E. = \%C + \frac{\%Si}{3} + \frac{\%P}{3} \quad (\text{Eq. 01})$$

Tabela 1. Composições Químicas médias dos ferros fundidos nodulares produzidos (% em peso)

	Barra Cu	Barra Cu-Ni	Barra Cu-Ni-Mo
%C	3,70	3,82	3,80
%Si	2,73	2,67	2,55
%Mn	0,21	0,20	0,26
%Cu	0,71	0,72	0,72
%Ni	-	1,22	1,62
%Mo	-	-	0,25
C.E. [%]	4,61	4,71	4,65

Para a boretação das amostras foi utilizado um pó composto de 82% B₄C, 15% Na₂B₂O₇ e 3% de NH₄Cl. As amostras foram colocadas em um cadinho de aço, cobertas por pó boretante e o cadinho foi selado e colocado em um forno convencional a 1.000°C durante 4 horas. Após a boretação as amostras foram austemperadas.

As amostras boretadas e austemperadas foram submetidas a medidas de durezas, análises micrográficas e ensaios de desgaste. As análises micrográficas foram realizadas transversalmente às camadas obtidas nas amostras, que foram embutidas em baquelite, lixadas até lixa 600, polidas e atacadas com nital 2%.

As microdurezas das camadas e dos substratos das amostras boretadas foram obtidas por meio de um microdurômetro digital Vickers.

Os ensaios de microdesgaste foram realizados com máquina do tipo esfera fixa sem o uso de abrasivos, com o objetivo de simular desgaste do tipo adesivo. Foram usadas também amostras sem tratamento de boretação, apenas austemperadas, para fins de comparação.

Foram adotadas as seguintes condições para realização dos ensaios de microdesgaste:

- esfera de aço AISI 52100 com dureza média de 850 HV e rugosidade superficial média (Ra) de 0,08 µm;
- diâmetro da esfera: 25,4 mm;
- carga: 2,46 N;
- rotação da esfera: 350 rpm; e
- tempo de ensaio para cada condição considerada: 10 min, 15 min, 20 min e 30 min, correspondendo às distâncias percorridas de 279 m; 419 m; 559 m e 838 m respectivamente.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Na Figura 1 são apresentadas as micrografias dos ferros fundidos produzidos neste trabalho austemperados e boretados. Pode-se observar que as microestruturas dos substratos consistem de “ausferrita” com dureza média de 421 HV, e sobre o mesmo uma camada de boreto com espessura de 30 μm e dureza média de 1235 HV (Tabela 2). Pode-se observar também abaixo das camadas, uma projeção intergranular das mesmas, que apresentaram durezas semelhantes as das camadas, indicando a difusão preferencial do boro pelos contornos de grãos.

Tabela 2. Durezas e espessura das camadas das amostras boretadas-austemperadas

	ADI Cu	ADI Cu-Ni	ADI Cu-Ni-Mo
Dureza camada HV	1170	1056	1481
Dureza substrato HV	403	425	436
Espessura da camada μm	22	30	38

As espessuras das camadas de boretos formadas nas amostras aumentaram à medida que foram adicionados elementos ligantes ao ferro fundido.

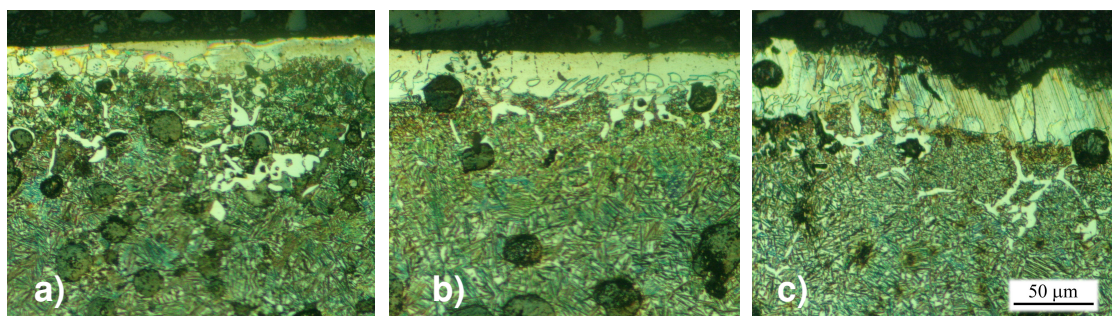


Figura 1. Micrografias ópticas das amostras a) ADI Cu boretado; b) ADI Cu-Ni boretado; c) ADI Cu-Ni-Mo boretado.

Na Figura 2 são apresentados os resultados dos ensaios de desgaste realizados em amostras dos ferros austemperados ou boretados-austemperados.

Com relação ao desgaste das amostras apenas austemperadas, o ADI -Cu foi o que apresentou o maior desgaste, resultado este que condiz com o fato dele apresentar a menor dureza. Já as outras duas amostras tiveram comportamento de desgaste semelhantes, assim como também as suas durezas são relativamente próximas.

No caso das amostras boretadas, pode-se notar que houve redução do desgaste nas três amostras em relação às não boretadas. Além disso, no caso do ADI Cu e ADI Cu-Ni ocorreu um aumento significativo do volume desgastado após 419 m de ensaio, provavelmente porque o desgaste ultrapassa a camada e inicia-se o desgaste do substrato, o que não ocorre na amostra ADI Cu-Ni-Mo, que é justamente a que possui a camada mais espessa, indicando que para esta amostra o desgaste ocorreu unicamente na camada até a distância máxima de ensaio percorrida.

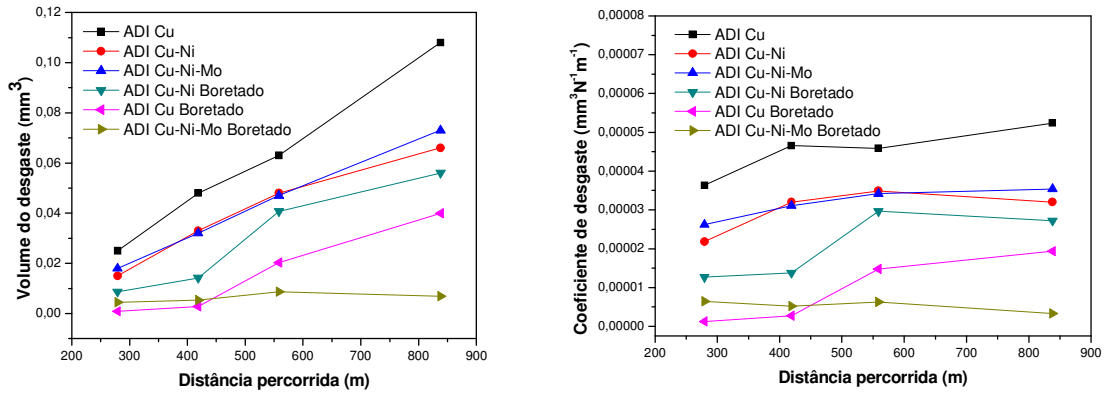


Figura 2. Comportamento de desgaste das amostras boretadas e não boretadas.

As calotas formadas em todas as amostras, não boretadas ou boretadas, apresentaram o mesmo aspecto, verificando-se os sulcos característicos de desgaste abrasivo (Figuras 3a e 3b). Apesar dos ensaios terem sido realizados sem o uso de abrasivos, ou seja, o desgaste inicial é do tipo adesivo, com o decorrer dos mesmos, partículas destacadas do material que podem ter aderido à esfera passaram a atuar como abrasivos, que produziram tais sulcos.

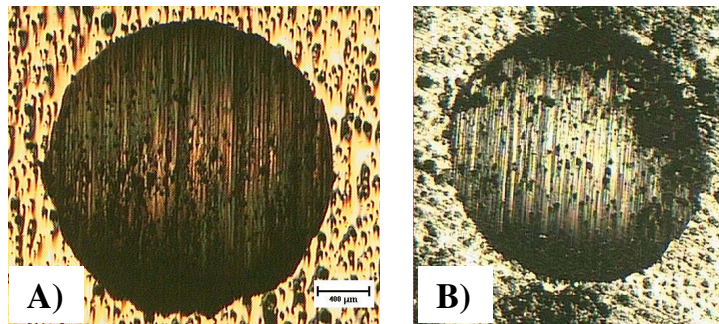


Figura 3. Aspectos das calotas obtidas no ensaio de microdesgaste após 838 m de ensaio a seco; A) ADI ligado ao Cu; B) ADI ligado ao Cu-Ni boretado.

4 CONCLUSÕES

A boretção com pó formou camadas de elevadas durezas nas três amostras, sendo que a maior dureza ocorreu no caso do ADI Cu-Ni-Mo, assim como a maior espessura de camada.

Das amostras não boretadas, o ADI Cu foi o que apresentou maior desgaste, enquanto que as demais apresentaram comportamentos semelhantes, o que está relacionado às suas durezas.

O tratamento de boretção foi bastante efetivo no melhoramento da resistência ao desgaste no caso das três amostras, em comparação com as não boretadas, sendo que o ADI Cu-Ni-Mo boretado foi o que apresentou o melhor desempenho.

Agradecimentos

Agradecimentos a CAPES pelas bolsas concedidas a F.A.P. Fernandes e S.C. Heck.

REFERÊNCIAS

- 1 HAMID, A. A. S.; ELLIOTT, R. Influence of austenitizing temperature on austempering of Mn-Mo-Cu alloyed ductile iron – Part 2: Mechanical properties. *Materials Science and Technology*, v. 13, n.1, p. 24-30, 1997.
- 2 KIM, Y.-J.; SHIN, H.; PARK, H.; LIM, J. D. Investigation into mechanical properties of austempered ductile iron (ADI) in accordance with austempering temperature. *Materials Letters*, v.62, n. 3, p. 357-360, 2008.
- 3 PUTATUNDA, S. K. Development of austempered ductile cast iron (ADI) with simultaneous high yield strength and fracture toughness by a novel two-step austempering process. *Materials Science & Engineering*, v. 315A, n. 1, p.70-80, 2001.
- 4 PRASAD, R. P.; PUTATUNDA, S. K. Investigations on the fracture toughness of austempered ductile irons austenitized at different temperatures. *Material Science and Engineering*, v. 349, n.1, p. 136-149, 2003.
- 5 TRUDEL, A.; GAGNÉ, M. Effect of composition and heat treatment parameters on the characteristics of ADI. *Canadian Metallurgical Quarterly*, v. 36, n.5, p. 289-298, 1997.
- 6 MALLIA, J.; GRECH, M.; SMALLMAN, R. E. Effect of silicon content on transformation kinetics of austempered ductile iron. *Materials Science and Technology*, v. 14, n. 5, p. 452-460, 1998.
- 7 ZIMBA, J.; SIMBI, D. J.; NAVARA, E. Austempered ductile iron: an alternative material for earth moving components. *Cement & Concrete composites*, v. 25, n. 6, p. 643-649,
- 8 HASSEB, A. S. M. A.; ISLAM M. A.; ALI BEPARI, M. Tribological behavior of quenched and tempered, in Austempered Ductile Iron at the same hardness level. *Wear*, v. 244, n.1-2, p. 15-19, 2000.
- 9 RONG, Z.; et al. Development and characterization of a wear resistant bainite/martensite ductile iron by combination of alloying and a controlled cooling heat-treatment. *Wear*, v. 250, n.1-12, p. 529-534, 2001.