

INFLUÊNCIA DA TEMPERATURA DE AUSTÊMPERA NA TENACIDADE À FRATURA DE UM FERRO FUNDIDO NODULAR COM CARBONETOS AUSTEMPERADO⁽¹⁾

Cíntia Cristiane Petry Mazzaferro⁽²⁾

André Ronaldo Froehlich⁽³⁾

Telmo Roberto Strohaecker⁽⁴⁾

Resumo

Neste trabalho, foi desenvolvido um ferro fundido nodular austemperado com carbonetos. Obteve-se o material com carbonetos ainda na fusão mediante controle do teor de silício. O material foi austenitizado a 900°C e austemperado a diferentes temperaturas, 260, 290 e 320°C, para verificar a influência da temperatura de austêmpera na tenacidade à fratura. As amostras fraturadas foram analisadas em microscópio eletrônico de varredura (MEV) para caracterizar os mecanismos atuantes na fratura. Como esperado, com o aumento da temperatura de austêmpera têm-se maiores teores de austenita retida, com diminuição da dureza. Com o aumento da temperatura de austêmpera também foram obtidos maiores valores de tenacidade à fratura, sendo que os valores de tenacidade obtidos para as temperaturas de 290° e 320°C foram bem próximos. A análise das fraturas no MEV revelou a presença de regiões com fratura intergranular apenas para o ferro fundido nodular austemperado a 260°C. Já para as temperaturas de 290 e 320°C o mecanismo de fratura foi quase-clivagem. Em todas as temperaturas de austêmpera utilizadas, os nódulos e os microrechupes presentes nas amostras favoreceram a deformação plástica da matriz adjacente a eles.

Palavras-chave: austêmpera – tenacidade – ferro nodular – carbonetos

(1) *Contribuição ao 60° Congresso Anual da ABM, de 25 a 28 de julho de 2005, em Belo Horizonte, MG.*

(2) *Engenheira Metalurgista, Mestre em Engenharia, Doutoranda no PPGEM – UFRGS.*

(3) *Engenheiro Metalurgista, Doutor, Pesquisador no PPGEM – UFRGS.*

(4) *Engenheiro Metalurgista, Prof. Doutor no PPGEM – UFRGS.*

Introdução

Os ferros fundidos nodulares com carbonetos austemperados (FFNCA) aliam a tenacidade da matriz ausferrítica produzida através da austêmpera com a resistência ao desgaste incentivada pela presença de carbonetos. Eles foram desenvolvidos recentemente – a primeira publicação que fala sobre as propriedades e possíveis aplicações destes materiais foi feita em 2000 (KEOUGH & HAYRYNEN 2000). Desde então, existem algumas publicações (BRANDENBERG & HAYRYNEN 2002; HAYRYNEN, BRANDENBERG & KEOUGH 2002) que ressaltam suas características, principalmente de excelente resistência ao desgaste associada com razoável tenacidade.

Apesar de já estarem sendo realizados ensaios para avaliar a resistência ao desgaste de FFNCA, não há nada publicado sobre a tenacidade à fratura deles.

Este trabalho representa a etapa inicial de desenvolvimento de um ferro fundido nodular com carbonetos obtidos no estado bruto de fusão e submetido a austêmpera e tem por objetivo verificar a influência da temperatura de austêmpera na sua tenacidade à fratura.

Materiais e Métodos

O ferro fundido nodular foi obtido em um forno a indução de média frequência com capacidade de 320 kg. O tratamento de nodulização foi efetuado a 1510°C, com 1,7% de FeSiMg, e a inoculação foi efetuada no jato do metal durante a transferência da panela de tratamento de nodulização para a panela de vazamento, utilizando 0,6% da liga inoculante. O teor de molibdênio dos ferros fundidos foi obtido através da adição de 0,25% de FeMo (60% Mo) ao banho metálico.

O metal líquido foi vazado em blocos em “Y” de 25 mm para a retirada dos corpos de prova de K_{IC} . Estes corpos de prova foram austenitizados a 900°C durante 2 horas e austemperados em três temperaturas diferentes, 260, 290 e 320°C, em banho de sal durante 2 horas.

Os ensaios de tenacidade à fratura foram realizados de acordo com a norma ASTM E399-91, em corpos de prova do tipo C(T) com 13 mm de espessura. Foram ensaiados três corpos de prova para cada temperatura, obtendo-se uma média dos valores.

A dureza dos materiais foi determinada através de ensaio Vickers, utilizando carga de 30kg, as microestruturas dos materiais foram analisadas em microscópio ótico e as fraturas, em microscópio eletrônico de varredura.

Resultados e Discussão

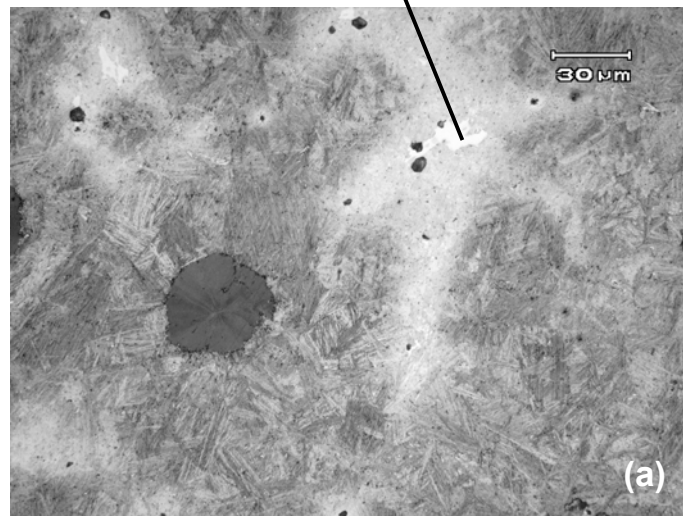
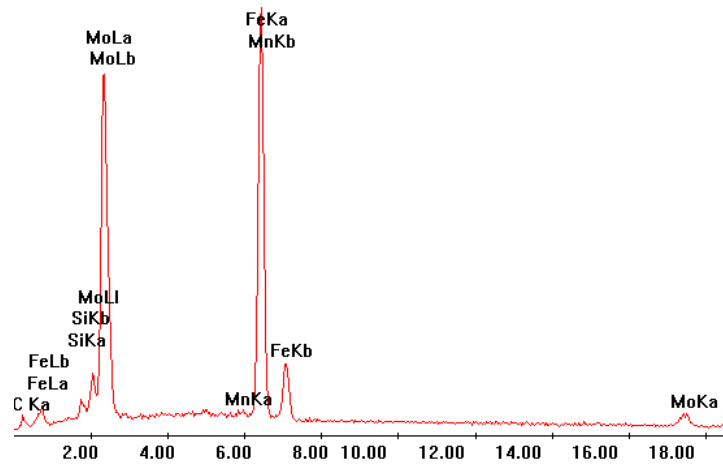
A composição química do ferro fundido nodular é mostrada na tabela I. O teor de silício deste material é menor em relação ao normalmente utilizado para os ferros fundidos nodulares visando incentivar a formação de carbonetos. O ferro fundido nodular obtido possui, em análise realizada de acordo com a norma ASTM A247, 75 nódulos por mm^2 e nodularidade de 80%.

Tabela I. Composição química do ferro fundido nodular.

%C	%Si	%Mn	%P	%S	%Mo	%Mg	CE
3,43	1,66	0,21	0,05	0,015	0,36	0,056	3,99

A figura 1 mostra a microestrutura obtida para cada temperatura de austêmpera empregada. Como podem ser observados, todos os materiais apresentam microestrutura de ferrita acicular com austenita retida e presença de carbonetos em regiões intercelulares. A análise por EDS revelou que estes carbonetos eram de molibdênio, provavelmente devido ao alto teor deste elemento no material, como mostrado na figura 1.

O ferro fundido nodular austemperado a 260°C, figura 1(a), apresenta uma microestrutura mais refinada, com agulhas de ferrita acicular mais finas e menor quantidade de austenita retida em comparação aos austemperados às outras temperaturas, enquanto que o austemperado a 320°C, figura 1(c), é o que apresenta agulhas de ferrita acicular maiores e mais grossas, além de maior quantidade de austenita retida.



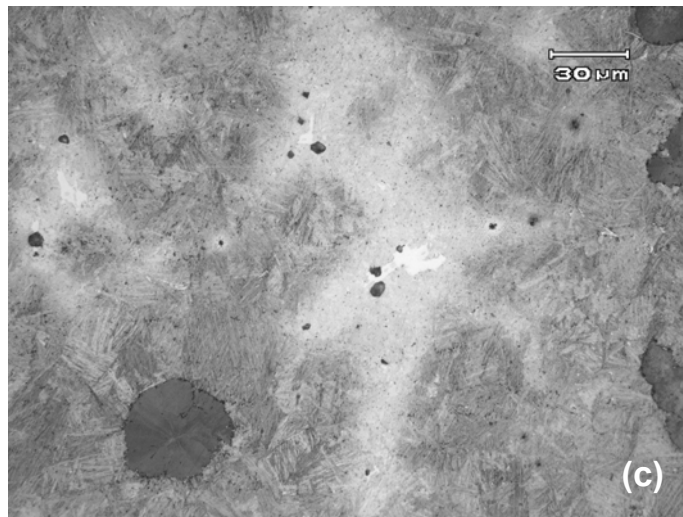
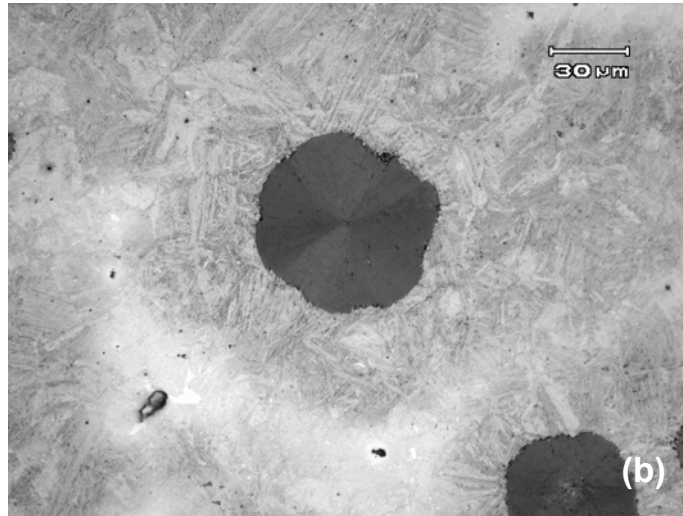


Figura 1. Microestruturas do ferro fundido nodular estudado: (a) austêmpera a 260°C; (b) austêmpera a 290°C; (c) austêmpera a 320°C. Nesta figura também é mostrado o espectro de energia dispersiva obtido por microsonda (EDS).

Na tabela II são mostrados os valores de dureza dos FFNCA, para cada temperatura de austêmpera. Como esperado, com a diminuição da temperatura de austêmpera há um aumento na dureza do material, devido à menor quantidade de austenita retida e à obtenção de agulhas de ferrita acicular mais finas.

Tabela II. Dureza dos materiais, de acordo com a temperatura de austêmpera empregada.

<i>Temperatura de austêmpera, °C</i>	260	290	320
<i>Dureza, HV₃₀</i>	599	546	478

A dependência da tenacidade à fratura com a temperatura de austêmpera é apresentada na figura 2. Com o aumento da temperatura de austêmpera há um aumento na tenacidade à fratura e os valores nas temperaturas de 290 e 320°C são bem próximos. Não existe em literatura nenhum dado sobre a tenacidade à fratura destes materiais, mas os valores obtidos para as temperaturas de 290 e 320°C são comparáveis aos apresentados por ferros fundidos nodulares perlíticos obtidos no estado bruto de fusão (classe GGG70) e também normalizados (classe GGG95) (FROEHLICH, 1995).

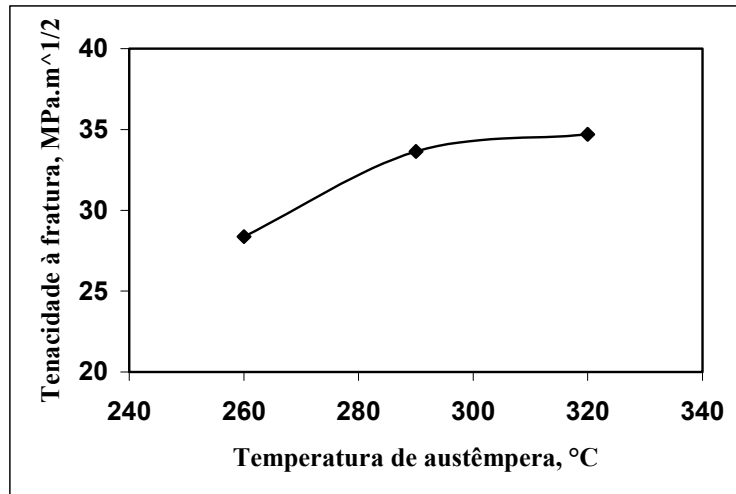
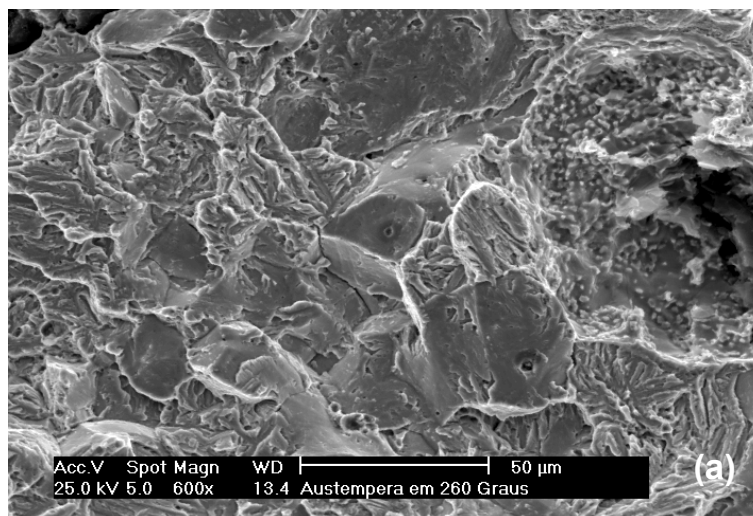


Figura 2. Dependência da tenacidade à fratura com a temperatura de austêmpera.

Na figura 3 são mostradas as fractografias dos corpos de prova de tenacidade à fratura, para cada temperatura de austêmpera empregada.



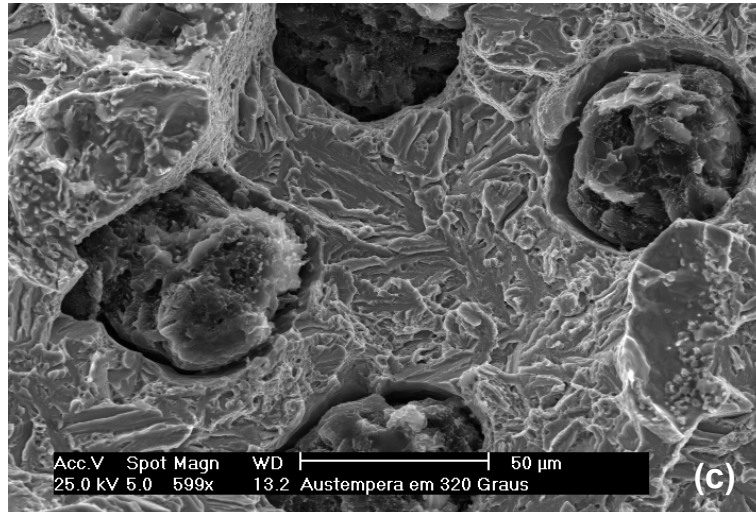
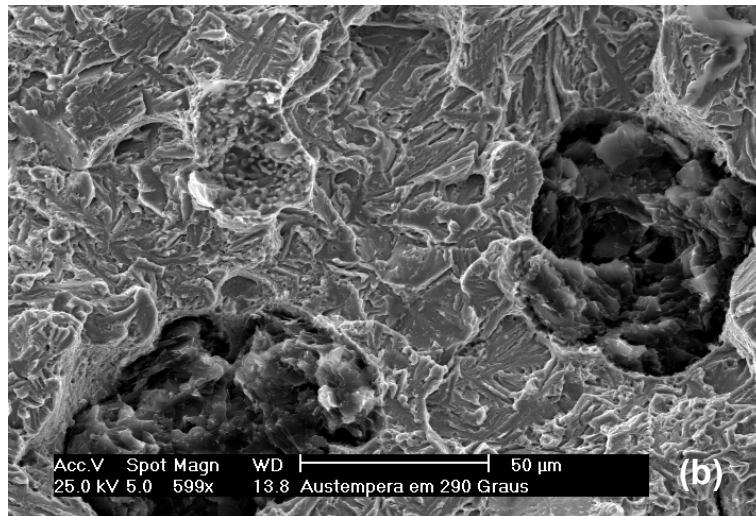


Figura 3. Fractografias do material estudado, para as temperaturas de austêmpera empregadas: (a)260°C; (b)290°C; (c)320°C.

Em todas as amostras o mecanismo de fratura predominante foi de quase-clivagem, e as fractografias mostram que o ferro nodular austemperado apresentou fratura intergranular em algumas regiões quando austemperado a 260°C (figura 3(a)), mas quando temperaturas maiores foram empregadas (figura 3(b) e (c)), não houve mais ocorrência deste tipo de mecanismo de fratura frágil. As amostras ensaiadas a 290 e 320°C apresentaram mecanismos de fratura muito semelhantes, o que era esperado devido aos valores de tenacidade à fratura estarem próximos.

Em todas as temperaturas de austêmpera empregadas percebeu-se a deformação da matriz adjacente aos nódulos de grafita e aos microrechupes, como evidenciado na figura 4 para o ferro fundido nodular austemperado a 260°C (esta fractografia também mostra uma região onde há ocorrência de fratura intergranular).

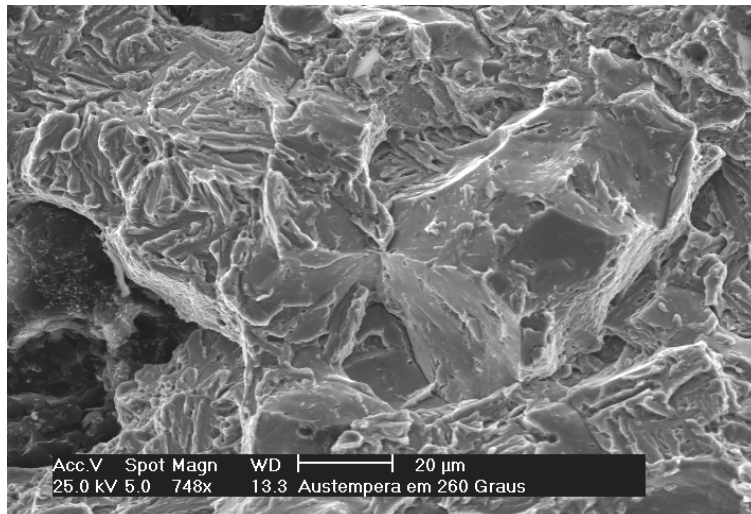


Figura 4. Fractografia do ferro fundido nodular austemperado a 260°C na região adjacente a um microrechupe, mostrando a deformação plástica da matriz próxima a ele.

Conclusões

-O baixo teor de silício presente neste ferro fundido nodular possibilitou a presença de carbonetos intercelulares. Devido ao alto teor de molibdênio do material, estes carbonetos caracterizavam-se principalmente como carbonetos de molibdênio.

-Com a diminuição da temperatura de austêmpera obteve-se agulhas de ferrita acicular mais finas e menores quantidades de austenita retida, o que acarretou em um aumento na dureza do material.

-Com o aumento da temperatura de austêmpera houve um aumento na tenacidade à fratura e os valores obtidos para as temperaturas de 290 e 320°C foram bem próximos.

-Em todas as amostras o mecanismo de fratura predominante foi de quase-clivagem com presença de regiões de fratura intergranular no ferro fundido nodular austemperado a 260°C. Já nas temperaturas maiores de austêmpera não houve mais ocorrência deste tipo de mecanismo de fratura frágil.

-Os nódulos e os microrechupes presentes nas amostras favoreceram a deformação plástica da matriz adjacente a eles em todas as temperaturas de austêmpera utilizadas.

Agradecimentos

Ao CNPq pelo suporte financeiro.

Referências Bibliográficas

BRANDENBERG, K. R., HAYRYNEN, K. L. 2002. Agricultural Applications of Austempered Ductile Iron. **Applied Process**. Disponível em: <<http://www.appliedprocess.com>>.

FROEHLICH, A. R. Avaliação da Tenacidade à Fratura e dos Mecanismos de Fratura de Ferros Fundidos Nodulares Perlíticos. Dissertação. PPGEM: UFRGS, 1995.

HAYRYNEN, K. L., BRANDENBERG, K. R., KEOUGH, J. R. 2002. Applications of Austempered Ductile Irons. **AFS Transactions**. V. 110. p. 929-938.

KEOUGH, J. R., HAYRYNEN, K. L. 2000. Carbide Austempered Ductile Iron (CADI). **Applied Process**. Disponível em: <<http://www.appliedprocess.com>>.

INFLUENCE OF AUSTEMPERING TEMPERATURE ON FRACTURE TOUGHNESS OF A CARBIDIC AUSTEMPERED DUCTILE IRON

Abstract

A ductile iron with as-cast carbides was developed using a low silicon content and low carbon equivalent. Specimens were austenitized at 900°C and austempered at 260, 290 and 320°C, to verify the influence of austempering temperature on fracture toughness. The specimens fracture surface were analysed in scanning electron microscope (SEM) to characterize the fracture mechanism. Increasing austempering temperature increases the retained austenite content, and decreases hardness. Higher fracture toughness level values were obtained for 290 and 320°C austempering temperature. The SEM analyses showed regions of intergranular fracture for specimens austempered at 260°C, and for the samples austempered at 290 and 320°C quasi-cleavage predominated. For all austempering temperatures used, graphite nodules and microshrinkage favored plastic deformation of matrix near them.

Key-words: austempering – toughness – ductile iron – carbides