

PRODUÇÃO, TRATAMENTO, CARACTERIZAÇÃO E AVALIAÇÃO DE PROPRIEDADES DE IMPACTO DE TRÊS DIFERENTES CLASSES DE FERROS FUNDIDOS¹

Avaliação comparativa da resistência ao impacto de ferros fundidos nodulares austemperados, nodular e temperado e revenido e ferro fundido branco

*Charles Leonardo Israel²
Telmo Roberto Strohaecker³
Paulo Henrique Sanchez Cardoso⁴*

Resumo

Este trabalho buscou avaliar a resistência ao impacto Charpy de três ferros fundidos diferentes, relacionando-a com fatores metalúrgicos e com propriedades mecânicas. Foi avaliada a resistência ao impacto Charpy em corpos de prova com e sem entalhe de um ferro fundido nodular austemperado – FFNA - com 0,4% de Mo (temperaturas de austêmpera em 260 e 300 °C), de um ferro fundido nodular temperado em sais e revenido a 200 °C – FFNTR - e de um ferro fundido branco com alto teor de Cr – FFBAC - temperado ao ar e revenido a 400 °C. Foi verificada a quantidade de nódulos nos nodulares, percentual de austenita retida, os limites de resistência à tração e valores de dureza, bem como, foram realizadas análises fractográficas nos corpos de prova ensaiados. Em ambas as condições dos corpos de prova (com e sem entalhe) o ferro fundido nodular austemperado em 300°C apresentou a maior resistência ao impacto, relacionada à sua elevada quantidade de austenita retida (aproximadamente 21%). Nas superfícies de fratura dos corpos de prova nodulares, inclusive dos temperados e revenidos, foram observados aspectos relacionados com deformação plástica ao redor dos nódulos de grafita. A presença de dimples foi relacionada com o baixo teor de fósforo verificado nas análises químicas.

Palavras-chave: Ferro fundido; Charpy; Austêmpera; Austenita retida.

PRODUCTION, TREATMENT, CHARACTERIZATION AND EVALUATION OF IMPACT PROPERTIES IN THREE DIFFERENT CLASSES OF CAST IRONS

Abstract

This work aims to evaluate the Charpy impact resistance of three different materials, relating the Charpy tests with their metallurgical features and their mechanical properties. The first material was an austempered ductile cast iron (austempering temperatures of 260 and 300°C), the second was a quenched and tempered ductile cast iron and the third was a high chromium cast iron (quenched and tempered – 400°C). Optical microscopy, tension and hardness tests were employed in the mechanical characterization of the materials. In the evaluation of the impact resistance, Charpy tests were made, and the fracture surfaces were analysed with SEM. It was observed that in the impact tests, the austempered ductile iron in the temperature range of 300°C was the material with higher toughness. In this material, low hardness and low graphite amount, allied to the low retained austenite level, were the main factors acting in the higher impact resistance of the 300°C austempered cast iron.

Key words: Cast iron; Charpy tests; Austempering; Retained austenite.

¹ Contribuição técnica apresentada na *61º Congresso Anual* da ABM, de 24 a 27 de julho de 2006, Rio de Janeiro – RJ

² Engenheiro Mecânico, Mestre em Engenharia, Doutorando no PPGEM UFRGS

³ Engenheiro Metalurgista, Prof. Doutor no PPGEM – UFRGS.

⁴ Engenheiro Mecânico, Prof. Doutor na FEAR – Universidade de Passo Fundo.

INTRODUÇÃO

Incontáveis são as vantagens da utilização dos ferros fundidos na indústria, principalmente na manufatura em larga escala de componentes com geometria complexa. Contudo, os principais problemas na utilização dos ferros fundidos sempre estiveram relacionados com a baixa tenacidade e ductilidade destes materiais quando comparadas com os aços. Nesta lacuna se apresenta o ferro fundido nodular austemperado (FFNA) ou *Austempered Ductile Iron* (ADI), um material com as vantagens dos ferros fundidos, como fundibilidade e produtividade, e que apresenta ainda excelentes valores de resistência mecânica e tenacidade.

Comparando com os ferros fundidos nodulares tradicionais, os austemperados permitem, para o mesmo nível de ductilidade, mais que duplicar a resistência à tração, aliando-se a isso as melhorias conseguidas nas propriedades de resistência ao desgaste e à fadiga, amplamente reportadas na literatura.⁽⁰⁾

A seleção de ferros fundidos para aplicação em peças que sofrem contato com elementos abrasivos e que são simultaneamente submetidas a esforços de impacto é tarefa que exige considerável cuidado, já que são características em que o acréscimo de uma propriedade significa o detrimento de outra.

Atualmente, diante das severas solicitações de abrasão e erosão, têm sido utilizados com relativo êxito, os ferros fundidos brancos com alto cromo. Sua excepcional resistência ao desgaste por abrasão e erosão é resultado, principalmente, do seu alto teor de carbonetos duros, podendo ser aumentada pela adição de outros elementos de liga e tratamentos térmicos adequados, contudo sendo normalmente inviabilizada a sua resistência ao impacto.⁽⁰⁾

Reconhecidamente, sempre que um componente necessita de alta resistência ao desgaste, opta-se por utilizar o ferro fundido branco alto cromo (FFBAC) com elevada quantidade de elementos de liga, o que muitas vezes acaba não sendo uma boa opção, porque este material apresenta grande fragilidade e elevado custo de fabricação.

Para o FFNTR, estudado neste trabalho, não foram utilizados elementos de liga. Já, para o ferro fundido nodular austemperado (FFNA), utilizou-se o acréscimo de Mo na liga e duas temperaturas diferentes de austêmpera, 260 e 300°C. O molibdênio é um importante agente endurecedor adicionado ao ferro nodular. Entretanto, pode segregar na fronteira das células durante a solidificação, formando carbonetos e limitando, muitas vezes, sua adição a 0,3%.⁽⁰⁾

Um inconveniente do emprego do molibdênio como elemento de liga é a forte tendência à formação de carbonetos em seções mais finas, o que não ocorre com o níquel, o cobre e o estanho. Para peças de menor velocidade de solidificação, peças mais espessas, podem ser empregados teores de até 0,8% de Mo sem que ocorra a formação de carbonetos. Esse elemento também pode ser empregado para aumentar a resistência de ferros fundidos nodulares ferríticos obtidos após recozimento. Todavia, esse uso pode não ser aconselhável no caso de se necessitar de elevada resistência ao impacto.⁽⁰⁻⁰⁾

À quantidade de grafita também é um importante fator a ser considerado. Com o aumento do número de nódulos, há uma redução do valor de energia absorvida no impacto. Isso pode ser explicado pelo mecanismo de iniciação e propagação de trincas, o qual consiste em deformação plástica localizada nas regiões de matriz entre nódulos, resultando em microestricção, formação e coalescimento de microcavidades. Formam-se assim microtrincas, as quais se ligam à trinca principal, reduzindo a resistência ao impacto. Esses fenômenos ocorrem mais facilmente à medida que aumenta o número de nódulos.⁽⁰⁾

PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Produção das Amostras

O FFN e o FFNA foram fundidos em forno à indução *Inductotherm*, capacidade nominal de 320kg, 950Hz, 150kVA e 450V. A carga foi constituída de 92% de ferro gusa e 8% de sucata de aço. O tratamento de nodulização foi realizado na panela com 1,5% de FeSiMg (46% de Si e 6,2% de Mg) e a inoculação no jato do metal líquido, com 0,5% de FeSi75. A temperatura de fusão foi de 1540 °C. A diferença existente entre FFN e FFNA foi a adição de 0,25%FeMo (60%Mo) no FFNA, aumentando, assim, o teor de Mo na liga e, conseqüentemente, a sua temperabilidade.

O metal obtido em cada fusão foi vazado em coquilha (para a obtenção da amostra para análise química) e, para os FFNs foram fundidos blocos em “Y”, de 25 mm de espessura, de onde foram retirados corpos-de-prova para a realização dos ensaios de tração e de impacto (para o FFBA não foi realizado o ensaio na condição com entalhe). Os corpos-de-prova foram usinados e, em seguida, realizados os tratamentos térmicos; posteriormente, foram retificados para atendimento das normas orientativas dos ensaios.

O tratamento térmico do ferro fundido nodular austemperado foi o seguinte:

Pré-aquecimento a 450 °C por aproximadamente 2h, austenitização do material a 900°C durante 2h em banho de sal e posterior austêmpera durante 2h em temperaturas de 260 °C para um lote, e a 300 °C para outro lote, ambas em banho de sais.

Para o tratamento térmico do ferro fundido nodular temperado e revenido, tem-se a seguinte seqüência:

Pré-aquecimento a 450°C por aproximadamente 2h, austenitização do material a 900 °C durante 2h em banho de sal, posterior têmpera em banho de sais e revenimento subsequente durante 2h a 200 °C.

O ferro fundido branco utilizado neste trabalho pode ser classificado segundo a Norma ASTM A532, classe IID. As amostras foram fundidas e tratadas em uma fundição de aços especiais, sendo que no processo de moldagem foi utilizada areia cura-frio (resina fenólica), molde e macho pintados com tinta refratária silico-aluminosa. As peças foram temperadas ao ar, com temperatura de austenitização de 900 °C e revenimento a 480 °C.

Ensaaios

Os corpos-de-prova para ensaios de tração foram usinados e, posteriormente, sofreram tratamento térmico, sendo em número de três para cada condição. Os ensaios foram realizados segundo a Norma ASTM E8M-00b⁽⁰⁾ com o diâmetro da parte útil de 12,5 mm. Para os ensaios de dureza foi utilizada a escala Brinell, com esfera de 10mm de diâmetro e carga de 3000kgf. Os ensaios foram realizados segundo a Norma ASTM E10-01,⁽⁰⁾ em número de cinco para cada condição.

Os ensaios Charpy foram realizados à temperatura ambiente, 21 °C e obedeceram à norma ASTM E23-01⁽⁹⁾ em corpos de prova com e sem entalhe, com exceção do FFBA, que foi ensaiado apenas em corpos de prova sem entalhe.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Tabela 1 apresenta a composição química dos dois nodulares, destacando-se apenas a diferença no teor de Mo. A composição do ferro fundido branco também está apresentada.

Tabela 1. Composição química do ferro fundido nodular (FFN) e do ferro fundido nodular austemperado (FFNA) e ferro fundido branco alto cromo (FFBAC). Valores em pontos percentuais.

	C	Si	Mn	Mo	P	Mg	S	Cr	Ni	CE
FFN	3,81	2,30	0,21	0,08	0,05	0,04	0,01	-	-	4,6
FFNA	3,72	2,39	0,21	0,42	0,05	0,04	0,01	-	-	4,5
FFBAC	2,99	1,18	0,83	1,12	0,048	0,04	0,035	18,51	0,91	3,4

A Tabela 2 apresenta os resultados dos ensaios mecânicos realizados nos ferros fundidos aqui estudados.

Tabela 2. Propriedades mecânicas do ferro fundido nodular e do ferro fundido nodular austemperado – média de três amostras (S- indica desvio padrão e * – Não Determinado).

Propriedades Mecânicas	FFNA260°C		FFNA300°C		FFNTR		FFBAC	
	Média	S	Média	S	Média	S	Média	S
Dureza HB	414	7,0	397	4,0	549	5,0	544	43
Limite de Resistência a Tração (MPa)	1291,3	13,5	1189,8	59,6	1150,6	67	*	*
Limite de Escoamento (MPa)	*	*	1048,5	194,9	*	*	*	*
Alongamento (%)	*	*	1,9	0,4	*	*	*	*

Observa-se na Tabela 2 que o FFNA260°C apresentou dureza e resistência à tração maiores que o FFNA300°C, em razão da sua temperatura de austêmpera ser inferior.

Numa comparação entre o FFNA300°C e o FFNTR, ambos apresentam limite de resistência à tração similares, embora o FFNA300°C apresente dureza inferior ao FFNTR. Acredita-se que a austenita retida presente no FFNA300°C em maior quantidade que o FFNA260°C, conforme será observado posteriormente, seja a responsável pela presença de valores de tensão de escoamento e alongamento.

Ao contrário do que foi observado por Valdebenito,⁽¹⁰⁾ o teor de molibdênio utilizado como elemento de liga não afetou o limite de resistência à tração das amostras de FFNA, nem foi observada presença de carboneto de molibdênio nas regiões intercelulares dos ferros fundidos nodulares austemperados.

A Figura 1 apresenta as micrografias das amostras. A caracterização microestrutural foi realizada através de análise de imagem com o software ImageTool em amostras extraídas dos corpos de prova de impacto, conforme indicado na Tabela 3.

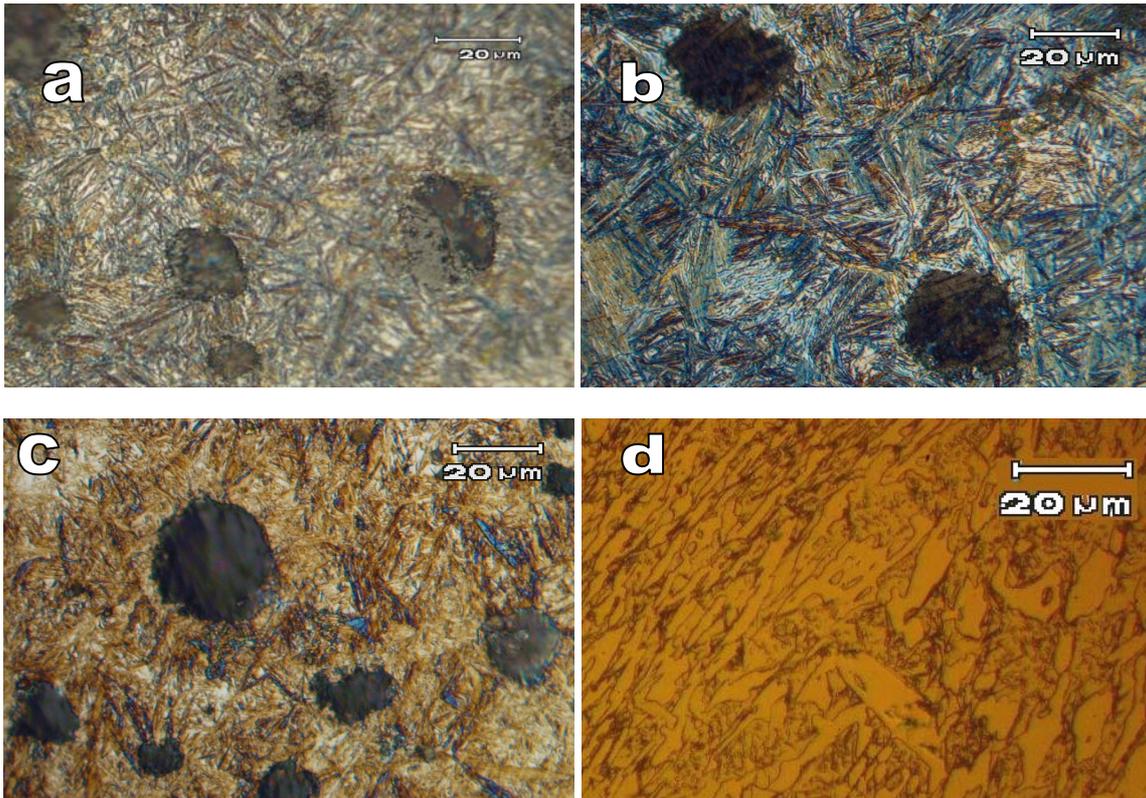


Figura 1. Micrografia do ferro fundido. (a)-Ferro fundido nodular austemperado a 260 °C. (b)- Austemperado a 300 °C. (c)-Temperado e revenido. (d)-Ferro fundido branco alto cromo. Amostras de ferro nodular atacadas com nital 2% e ferro fundido branco com vellela.

Tabela 3. Microconstituintes dos ferros fundidos nodulares.

	FFNA260°C	FFNA300°C	FFNTR
Matriz	Ferrita acicular 88% Austenita retida 12%	Ferrita acicular 79% Austenita retida 21%	Martensita revenida Austenita retida <5%

A Tabela 4 indica a quantidade de grafita por unidade de área presente nas amostras. A diferença observada da quantidade de nódulos/mm² entre o FFNA e FFNTR é uma indicação da presença de molibdênio nos FFNA por ser um elemento que significativamente reduz a eficiência do inoculante.⁽¹¹⁾

Tabela 4. Número de nódulos por mm² encontrado nos corpos-de-prova de impacto dos Ferros Fundidos Nodulares.

	FFNA260°C		FFNA300°C		FFNTR	
	Média	S	Média	S	Média	S
Com entalhe	184,6	53,9	262,4	11,7	368,7	36,7
Sem entalhe	204,4	34,8	316,8	39,5	368,5	59,3

Como pode ser observado na Figura 2a, e indicado na Tabela 5, para os corpos-de-prova com entalhe, a dispersão dos resultados foi muito baixa em razão da orientação da fratura provocada pelo entalhe, o que não ocorre com os resultados dos corpos-de-prova sem entalhe. Pode-se constatar também que o FFNA300°C apresentou a maior energia de impacto tanto para as amostras com como para as sem entalhe.

Tabela 5. Resultados do ensaio de impacto em corpos-de-prova com e sem entalhe (* - Não Determinado).

	FFNA260°C		FFNA300°C		FFNTR		FFBAC	
	Média	S	Média	S	Média	S	Média	S
Com entalhe	6,0J	0,1	8,6J	0,2	4,3J	0,2	*	*
Sem entalhe	39,1J	26,3	67,2J	29,4	35,1J	14,4	7,9J	2,6

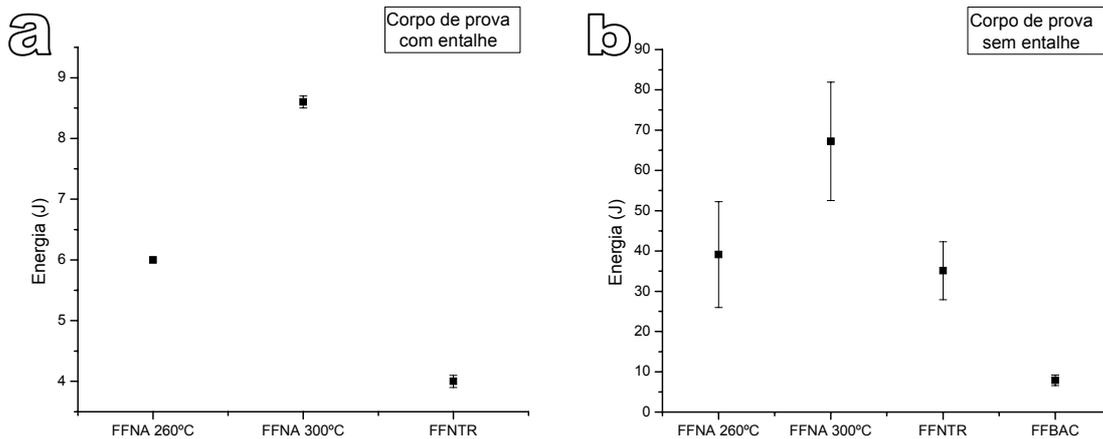


Figura 2. Gráfico comparativo dos resultados de impacto Charpy (a) Corpo-de-prova com entalhe; (b) Corpo-de-prova sem entalhe.

Observando ainda a Figura 2b, verifica-se que os resultados entre FFNA260°C e o FFNTR foram muito similares na condição sem entalhe; na condição com entalhe, a diferença foi consideravelmente maior para o FFNA260°C, que pode ser explicada pelo fato do FFNTR apresentar uma quantidade superior de grafita em média de 368nódulos/mm² contra o FFNA260°C com média de 184/mm² (a quantidade de nódulos foi obtida dos corpos-de-prova de impacto). Um maior número de nódulos leva a uma baixa energia, pois existe menor distância para o coalescimento de alvéolos. Além do FFNTR apresentar ainda dureza consideravelmente maior, aumentando sua sensibilidade ao entalhe.

Para todas as amostras observadas no MEV procurou-se posicionar no local onde, provavelmente, deve ter ocorrido o início da formação da trinca (lado oposto da ação do cutelo).

De modo geral, as amostras de ferro fundido nodular (Figura 3 e Figura 4) apresentaram deformação ao redor dos nódulos de grafita, evidenciando deformação plástica da matriz adjacente a eles e presença de *dimples* nas amostras, mais pronunciadas naquelas com maior energia absorvida no ensaio de impacto.

As imagens a seguir da Figura 3, referem-se aos corpos-de-prova de impacto com entalhe.

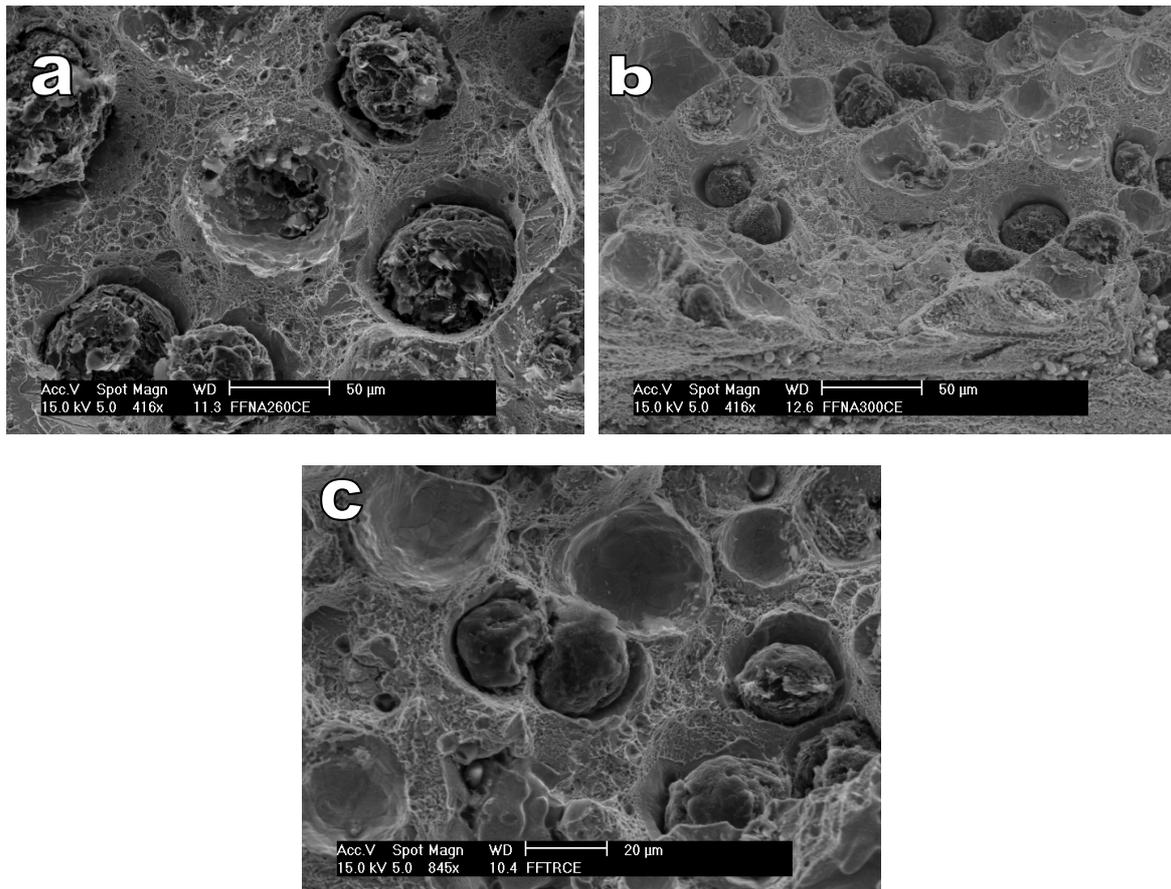


Figura 3. Fractografia obtida por MEV da superfície de fratura do corpo-de-prova de impacto com entalhe (a)-Ferro fundido nodular austemperado 260 °C, (b)-Nodular austemperado a 300 °C, (c)-Nodular temperado e revenido.

Para as ligas de fundido nodulares estudadas, não se observou a presença de fratura característica de clivagem, que, de certa forma, esperava-se encontrar no FFNTR, em razão da sua microestrutura martensítica. Um dos fatores que podem ter influenciado na presença predominantemente de dimples nas amostras de FFN foi o baixo teor de fósforo e silício encontrados nas amostras.

Em todas as ligas de ferro nodular ensaiadas, verificou-se decoesão dos nódulos de suas cavidades durante o processo de fratura e, para as amostras com maior tenacidade no ensaio de impacto Charpy, os corpos-de-prova apresentaram maior deformação ao redor dos nódulos de grafita.

As imagens a seguir, obtidas através de microscopia eletrônica de varredura, referem-se aos corpos-de-prova de impacto sem entalhe.

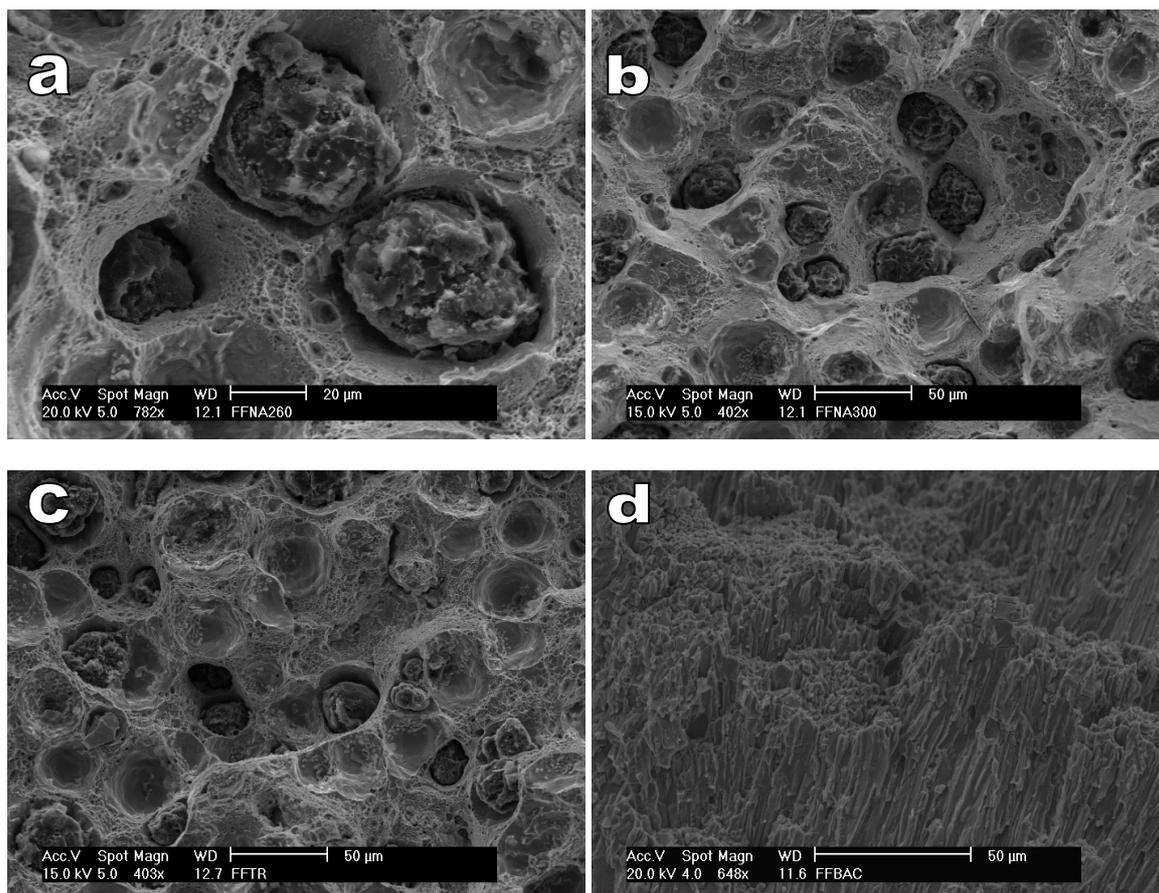


Figura 4. Fractografia obtida por MEV da superfície de fratura do corpo-de-prova de impacto sem entalhe A-Ferro fundido nodular austemperado 260 °C, B-Nodular austemperado a 300 °C, C-Nodular temperado e revenido D-Ferro Fundido Branco Alto Cromo.

As superfícies de fratura apresentaram-se de forma irregular (fratura não facetada), característica de fraturas em materiais dúcteis em todos os ferros fundidos nodulares. Nas amostras de FFBAC, conforme a Figura 4c, observa-se a formação de feixes de carbonetos e nenhuma deformação plástica, evidenciando a fragilidade deste material.

CONCLUSÕES

A temperatura de austêmpera determina a quantidade de austenita retida. Maiores quantidades de austenita retida devem ser processadas com maiores temperaturas de austêmpera (para uma mesma temperatura de austenitização).

A pequena dispersão de resultados encontrada para os ensaios de impacto com entalhe é resultado do mesmo funcionar como concentrador de tensões e de direcionar a propagação da trinca.

As propriedades de impacto das ligas avaliadas são, coerentes com as microestruturas avaliadas, entretanto, para os FFNAs, um pouco inferiores a alguns trabalhos consultados, provavelmente resultante do elevado teor de molibdênio utilizado como elemento de liga.

Para os materiais ensaiados, a tenacidade ao impacto é inversamente proporcional à dureza das amostras: quanto maior a dureza da amostra, menor a tenacidade ao impacto Charpy.

Nas fraturas observadas dos FFNAs o mecanismo de fratura encontrado foi o de dimples, tanto para as amostras com e sem entalhe, quanto para as amostras de

FFNTR. A provável causa desta observação é o baixo teor de fósforo encontrado nas amostras.

Para os ensaios de impacto Charpy tem-se novamente o FFNA300 com o melhor desempenho; os piores foram o FFBAC, na condição sem entalhe, e o FFNTR, nos ensaios com entalhe.

REFERÊNCIAS

SANTOS, Adalberto B. de Souza; BRANCO, C. H. Castello. Metalurgia dos ferros fundidos cinzentos e nodulares. Instituto de Pesquisas Tecnológicas – IPT. São Paulo, SP, 241p. 1977 (3º imp 1989).

ADLER, A. Thomas; DOĞAN, Ömer N. Erosive wear and impact damage of high-chromium white cast irons. *Wear*, n. 225 p. 174-180, 1999.

TRUDEL A.; GAGNÉ, M. Effect of composition and heat treatment parameters on the characteristics of austempered ductile irons. *Canadian Metallurgical Quarterly*, v. 36, n.5, p. 289-298, 1997.

BALZER, MARCOS. Ferro fundido nodular austemperado – ADI: obtenção e aplicações. In: CONGRESSO INTERNACIONAL DE NOVAS TECNOLOGIAS. Joinville, SC. Set. 2002. 1 CD-ROM.

YESCAS-GONZÁLEZ, Miguel A. Modelling the microstructure and mechanical properties of austempered ductile irons. Tese (Doutorado em Engenharia) – University of Cambridge, Cambridge. 2001. Disponível em <<http://www.msm.cam.ac.uk/phase-trans/2000/phd.html#miguel>>. Acesso em: 20 Dez. 03.

PETRY, Cíntia C. M. Avaliação das propriedades de impacto e dos mecanismos de fratura de ferros fundidos nodulares ferríticos. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1999.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. ASTM E8M-00b: Standard test methods for tension testing of metallic materials [metric]. West Conshohocken, July 2001. v. 03.01.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. ASTM E10-01: Standard test methods for Brinell hardness of metallic materials. West Conshohocken, April 2001. v. 03.01.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. ASTM E23-01: Standard test methods for *notched bar impact testing of metallic materials*. West Conshohocken, July 2001. v. 03.01.

VALDEBENITO, Marco E. Almazan. Comparação das propriedades mecânicas de ferro fundido nodular austemperado e martemperado/revenido. Trabalho de Diplomação - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2004.

ALBUQUERQUE, Albéria Cavalcanti de; SANTOS, Marco A. dos; WARMILING, Guido. Tenacidade à fratura de ferros nodulares austemperados. In: CONGRESSO ANUAL DA ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE METALURGIA E MATERIAIS, 56. Belo Horizonte. Anais... Julho 2001. p. 818 – 826.