

INFLUÊNCIA DO NÚMERO DE NÓDULOS DE GRAFITA NAS PROPRIEDADES MECÂNICAS DO FERRO FUNDIDO NODULAR AUSTEMPERADO¹

Clênio Silva²

Denilson José do Carmo³

Dagoberto Brandão Santos⁴

Resumo

Nos últimos anos, o ferro fundido nodular austemperado emergiu como um importante material da engenharia por apresentar excelentes propriedades mecânicas. Estas propriedades, resultantes de uma microestrutura formada de nódulos de grafita e ausferrita, incluem alta resistência mecânica, ductilidade, tenacidade, boa resistência ao desgaste e boa usinabilidade. Apresenta-se neste trabalho a influência do número de nódulos de grafita no limite de resistência à tração, limite de escoamento, alongamento e na dureza Brinell de um ferro fundido nodular austemperado. Foram obtidas 43 amostras com uma variação de 90 a 800 nódulos de grafita/mm², utilizando variações na velocidade de resfriamento, na taxa de inoculação e no tipo de processo de nodularização. Todas as amostras, apresentando a mesma composição química, foram austenitizadas na temperatura de 885°C por 2 horas, resfriadas e mantidas em banho de sais na temperatura de 360°C por 1,5 horas. Análises metalográficas por microscopia óptica, análises por microscopia eletrônica de varredura e difração de raios-X foram realizadas com o objetivo de correlacionar as propriedades mecânicas obtidas com a microestrutura. Os resultados obtidos nos ensaios mecânicos mostraram uma tendência no aumento do limite de resistência à tração à medida que se aumentou o número de nódulos de grafita. Já o limite de escoamento se mostrou sem alterações. Foram observados que o alongamento aumentou sensivelmente e a dureza Brinell diminuiu gradativamente com o aumento do número de nódulos de grafita.

Palavras-chave: Ferro fundido nodular austemperado; ADI, Nódulos de grafita.

THE INFLUENCE OF GRAPHITE NODULE COUNT ON MECHANICAL PROPERTIES OF AUSTEMPERED DUCTILE IRON

Abstract

In recent years, austempered ductile cast irons (ADI) has emerged as a major engineering material because of its excellent mechanical properties. These properties, as result of a microstructure containing spheroidal graphite and ausferrite, include high strength, ductility, toughness, good wear resistance and machinability. The present work describes the influence of graphite nodule count on the ultimate tensile strength, yield strength, elongation and Brinell hardness of an austempered ductile iron. It was obtained 43 samples with between 90 and 800 graphite nodule/mm² using different cooling rate, inoculation rate and nodularization process variations. All the samples, having the same chemical composition, were austenitized at 885°C for 2 hours, then quenched and kepted in a salt bath of 360°C for 1,5 hours. Metallography, scanning electron microscopy (SEM) and X-ray diffraction analysis were performed to correlate the mechanical properties attained with the microstructural observation. The results of this investigation indicated a tendency of the ultimate tensile strength to increase with the nodule count while the yield strength didn't change. It was observed that the elongation increased significantly and the Brinell hardness decreased as nodule count was increased.

Key words: Austempered ductile iron; ADI; Graphite nodule.

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

² Engenheiro Industrial Mecânico, M.Sc, Assistente de Tecnologia do SENAI/CETEF

³ Engenheiro Industrial Mecânico, M.Sc, Assistente de Tecnologia do SENAI/CETEF

⁴ Membro da ABM, Engenheiro Metalúrgico, Mestre, Dr., Professor Adjunto do Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais da UFMG

1 INTRODUÇÃO

O desenvolvimento do ferro fundido nodular austemperado, ADI, em 1970, deu um novo impulso nas aplicações do ferro fundido nodular, graças à excelente combinação de resistência mecânica e tenacidade. O sucesso na obtenção do ADI depende, dentre outras variáveis, da qualidade da peça obtida no processo de fundição. Algumas exigências para as peças fundidas são impostas no sentido de garantir as propriedades mecânicas após o tratamento de austêmpera. Podem-se citar como exigências a ausência de inclusões, carbonetos, microrrechupes e porosidades diversas. As propriedades mecânicas, principalmente a tenacidade podem-se reduzir drasticamente caso as peças fundidas apresentem os defeitos acima mencionados. Outras exigências se referem a um número mínimo de nódulos de grafita que deve estar em torno de 100 nódulos/mm² e grau de nodularização mínimo em torno de 85%. No entanto, sabe-se que, no processo de fundição, o número de nódulos de grafita nas peças fundidas é fortemente afetado pelo processo de fundição adotado, velocidade de resfriamento, composição química do metal base, temperatura e tempo de manutenção do metal no forno de fusão, tratamento de inoculação, tipo e granulometria do inoculante e pela adição de elementos químicos especiais etc, podendo variar de 50 a 2000 nódulos/mm².⁽¹⁻³⁾ Este trabalho pretende mostrar, para uma mesma composição química e ciclo de tratamento térmico, os resultados da influência do número de nódulos de grafita nas propriedades mecânicas (limite de resistência à tração, limite de escoamento, alongamento e dureza) do ferro fundido nodular austemperado.

2 METODOLOGIA⁽⁴⁾

Foram obtidos 22 blocos Y de ferro fundido nodular, espessura de 25mm conforme norma ASTM A 897M⁽⁵⁾. Apenas o comprimento dos blocos foi alterado para 330mm para permitir a retirada de dois corpos de prova no mesmo plano, ou seja, alinhados com a face inferior do bloco Y, conforme Figura 1.

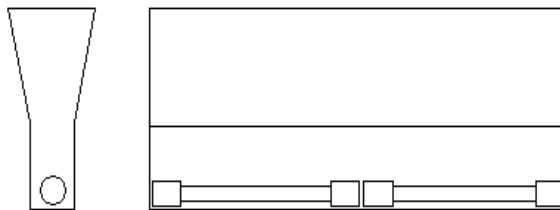


Figura 1. Desenho do bloco Y mostrando o local de retirada dos corpos de prova.

Dentre as diversas técnicas apontadas pela literatura⁽³⁾ para se obter ferros fundidos nodulares com número de nódulos de grafita diferentes, neste trabalho experimental, foram utilizadas conjuntamente as seguintes técnicas: (1) variação do processo de nodularização; (2) variação da taxa de inoculação e (3) variação da velocidade de resfriamento. A variação do processo de nodularização foi realizada através da utilização de dois processos distintos: (1) Processo Sanduíche e (2) Processo *In mold*. A variação da taxa de inoculação foi realizada com a adição na panela de diferentes quantidades de inoculante com granulometria de 1 a 3mm: (1) Processo Sanduíche – 0,30 e 0,50% de inoculante Fe-Si 75% e (2) Processo *In mold* – 0,20% de inoculante Fe-Si75%. A variação da velocidade de resfriamento nos 22 blocos Y

foi obtida através da inserção de resfriadores metálicos e mantas exotérmicas próximos às cavidades dos moldes.

Foram realizadas três fusões em forno elétrico à indução, de 120 kW, frequência de 3200Hz e capacidade de cadinho de 120kg utilizando carga metálica composta de 95% de gusa, 3,3% de sucata de aço, 0,7% cobre e 1% de níquel. Os tratamentos de nodularização foram realizados nas temperaturas entre 1500 e 1510°C.

De cada bloco Y foi seccionada uma barra de seção transversal de 17x25mm e comprimento de 330mm para o tratamento de austêmpera. Todas as amostras foram austenitizadas na temperatura de 885°C por 2 h, resfriadas e mantidas em banho de sais na temperatura de 360°C por 1,5 h e lavadas em água à 60°C por 10 min.

Foram realizados ensaios de tração, escoamento, alongamento, dureza Brinell e dureza Vickers. Análises metalográficas, microscopia eletrônica de varredura e difração de raios-X foram realizadas com o objetivo de correlacionar propriedades mecânicas e microestrutura.

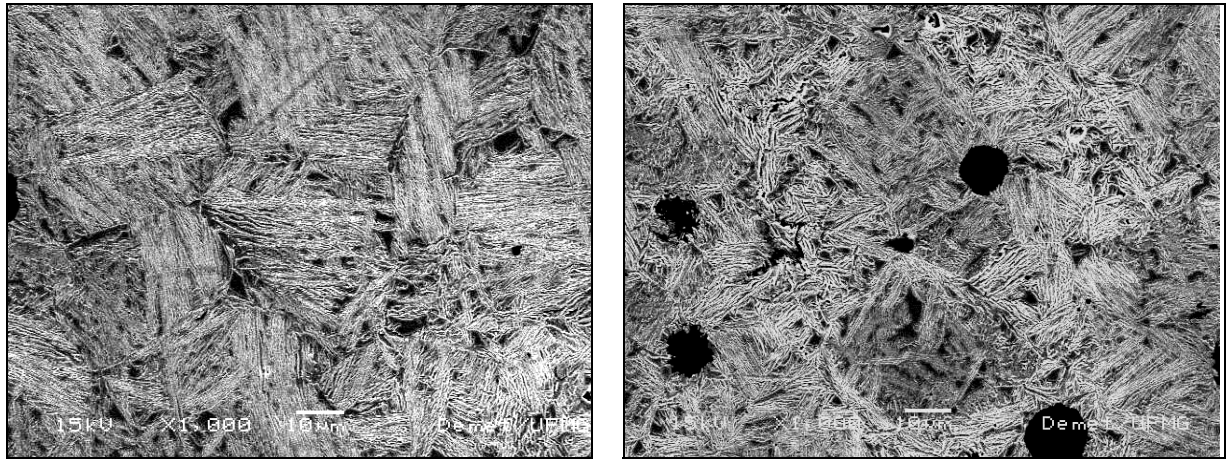
3 RESULTADOS E DISCUSSÃO ⁽⁴⁾

Os resultados das análises químicas das três fusões de ferro fundido nodular são apresentados na Tabela 1.

Tabela 1. Resultados das análises químicas obtidas nas fusões de ferro fundido nodular (%).

Elementos	Faixa prevista	Sanduíche 0,3% inoculação	Sanduíche 0,5% inoculação	<i>In mold</i> 0,2% inoculação
C	3,4 a 3,6	3,52	3,56	3,50
Si	2,4 a 2,6	2,56	2,52	2,54
Mn	0,35 máx	0,077	0,072	0,068
P	0,04 máx	0,0305	0,036	0,029
S	0,02 máx	0,0129	0,0128	0,019
Cu	0,7	0,6874	0,6979	0,692
Ni	1,0	1,0338	1,0063	0,972
Mg	0,03 a 0,06	0,0402	0,0498	0,0406

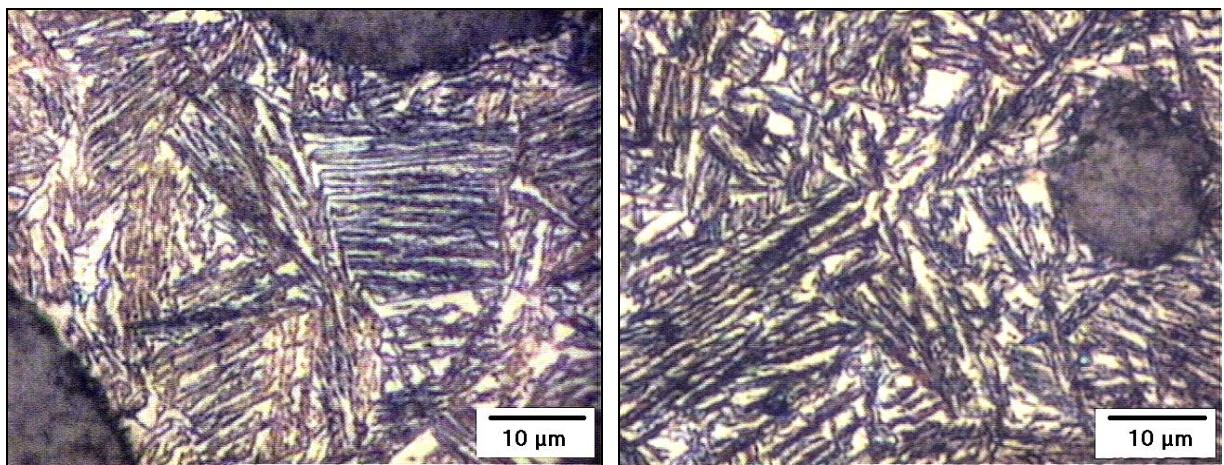
Em função das técnicas utilizadas, o número de nódulos de grafita/mm² obtido nos corpos de prova variou de 90 a 800. Todas as amostras apresentaram grafita nodular, homogeneamente distribuída, com grau de nodularidade igual ou superior a 92% atendendo às recomendações mínimas encontradas na literatura.^(6,7) Foi observado que o grau de nodularidade aumentou à medida que se aumentou o número de nódulos/mm², o que pode ser atribuído ao progressivo aumento da velocidade de resfriamento imposto aos moldes e ao processo de nodularização *In mold*. As fotomicrografias obtidas através de microscopia eletrônica de varredura (Figura 2) em duas amostras mostram a variação do tamanho dos feixes de ferrita acicular em função do número de nódulos de grafita. Foi observada uma diminuição progressiva dos tamanhos dos feixes de ferrita acicular à medida que se aumentou o número de nódulos/mm².



(a)

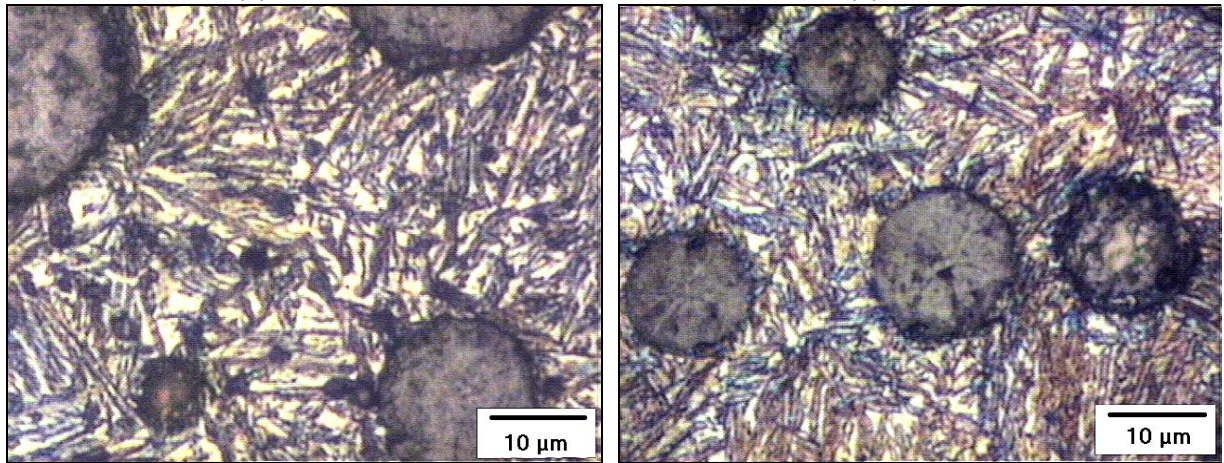
(b)

Figura 2. Fotomicrografia de uma amostra com: (a) 90 nódulos/mm², (b) 784 nódulos/mm², MEV.



(a)

(b)



(c)

(d)

Figura 3. Fotomicrografias obtidas através de microscopia óptica de 4 amostras: (a) 98 nódulos/mm², (b) 216 nódulos/mm², (c) 660 nódulos/mm² e (d) 784 nódulos/mm².

Este fenômeno pode ser atribuído à nucleação da ferrita acicular que se dá preferencialmente na interface grafita-matriz e nos contornos de grãos. Foi observado que nas amostras com alto número de nódulos de grafita, os pacotes dos feixes da ferrita acicular foram se transformando em novelos.⁽⁸⁾ Estes novelos de ferrita acicular se apresentam fina e aleatoriamente distribuídos. A Figura 3 mostra

fotomicrografias de 4 amostras obtidas através de microscopia óptica evidenciando o refinamento progressivo da ferrita acicular à medida que se aumentou o número de nódulos de grafita.

Limite de Resistência à Tração e Limite de escoamento

Como pode ser observado na Figura 4, houve uma pequena tendência de aumento no limite de resistência à tração à medida que se aumentou o número de nódulos/mm². Já o limite de escoamento não apresentou nenhuma variação significativa.

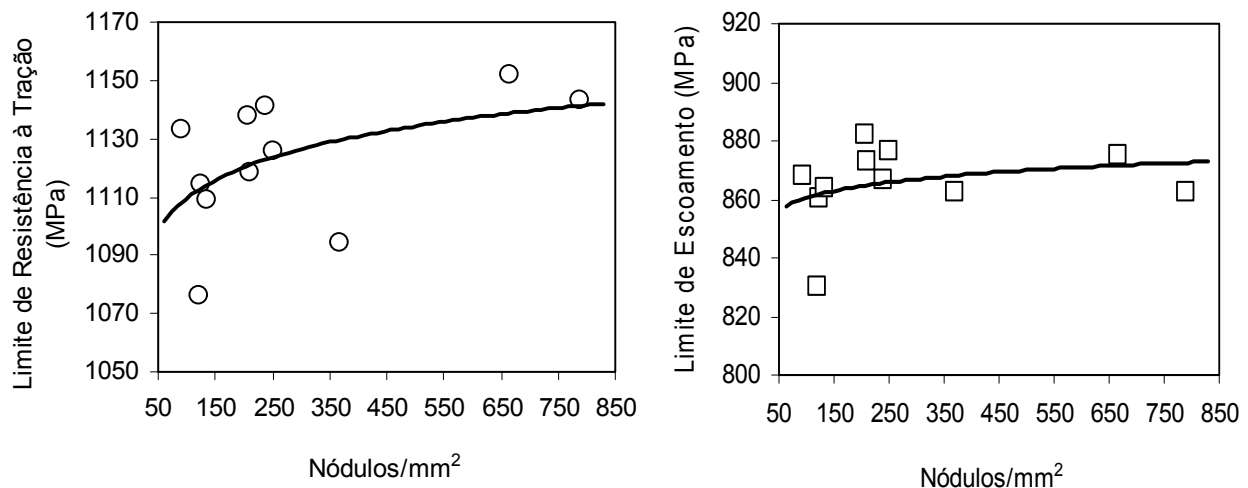


Figura 4. Variação do limite de resistência à tração e limite de escoamento em função do número de nódulos de grafita/mm².

Estudos realizados por DAÍ *et al.*⁽⁹⁾ investigando a iniciação e propagação de trincas em corpos de prova de ADI com 0,5mm de espessura, submetidos à tração, mostraram que as microtrincas iniciam primeiramente na interface grafita-matriz. Somente após a trinca propagar em torno do nódulo de grafita é que microtrincas nucleiam na matriz adjacente à interface grafita-matriz. O estudo também mostra que, à medida que a deformação plástica aumenta, a trinca se propaga na matriz sempre na interface ferrita-austenita, mudando de direção cada vez que encontra um feixe de ferrita acicular com orientação diferente. Uma hipótese para a pequena variação, tanto do limite de resistência à tração quanto do limite de escoamento é que, se por um lado, o refinamento dos feixes de ferrita acicular aumenta a resistência mecânica,⁽¹⁰⁾ por outro lado, um elevado número de nódulos de grafita diminui as distâncias lineares entre estes, o que corresponde às regiões ocupadas por matriz metálica. Sendo assim, acredita-se que dois fenômenos devem agir simultaneamente quando a microestrutura é submetida a uma tensão de tração. Enquanto o aumento do número de nódulos de grafita tende a aumentar o número de microtrincas, a matriz metálica refinada, composta de ferrita acicular e austenita, tende a absorver maior quantidade de energia dificultando a propagação destas microtrincas. Os resultados deste trabalho mostraram que o efeito positivo do refinamento da ausferrita prevaleceu sobre o efeito negativo do aumento do número de nódulos.

Quatro outros aspectos também devem ser considerados para explicar o aumento do limite de resistência à tração. O primeiro deles é que a propagação de uma microtrinca também é anulada quando esta atinge um nódulo de grafita. Uma vez que a propagação de uma microtrinca foi anulada em um nódulo, a nucleação de outra microtrinca, do outro lado deste mesmo nódulo, exige maiores níveis de tensões. O segundo aspecto é a influência do grau de nodularidade. Foi observado que o grau de nodularidade aumentou à medida que aumentou o número de nódulos de grafita. Sabe-se que a concentração de tensões em um nódulo de grafita mais esferoidizado é menor se comparado com o nível de tensões em um nódulo de grafita menos esferoidizado.⁽²⁾ Desta forma, as cavidades mais esféricas preenchidas com grafita, predominantes nas amostras com alto número de nódulos, necessitam maior nível de tensões para nuclear uma microtrinca na interface grafita-matriz. O terceiro aspecto é que um alto número de nódulos geralmente está associado a uma matriz com ferrita acicular refinada na forma de novelos.⁽⁸⁾ Na ferrita acicular dos aços, a propagação de uma microtrinca sofre desvios de direção a cada momento que encontra placas com orientações diferentes. Isto confere aos aços melhores propriedades mecânicas, principalmente tenacidade.⁽¹⁰⁾ No ADI, uma vez que a microtrinca nucleia na interface grafita-matriz e tende a se propagar sempre pela interface ferrita acicular-austenita, a energia absorvida para a propagação desta microtrinca é maior devido à intensa mudança de direção desta. Este fator tende a aumentar a resistência mecânica para microestruturas com alto número de nódulos. O quarto aspecto é que a matriz metálica quando deformada sofre o fenômeno de encruamento, o que exige quantidades crescentes de tensão para continuar o processo de deformação plástica.

Alongamento e Dureza Brinell

Os resultados mostraram um aumento expressivo no alongamento com conseqüente queda na dureza Brinell à medida que se aumentou o número de nódulos de grafita (Figura 5). A variação no alongamento pode ser atribuída, principalmente, ao aumento progressivo do grau de nodularidade da grafita com conseqüente melhoria na homogeneização da microestrutura à medida que aumentou o número de nódulos^(2,11,12). O principal fator que afeta o alongamento é a presença de grandes regiões ricamente segregadas entre os nódulos de grafita.^(12,13) Nos últimos momentos do processo de solidificação, elementos como o manganês, cromo, molibdênio e magnésio são segregados para os contornos das células eutéticas. Esses elementos, concentrados entre os nódulos de grafita, atrasam o início de transformação da ausferrita. O resultado é uma microestrutura heterogênea apresentando em volta dos nódulos de grafita, austenita estabilizada com alto teor de carbono, e, nas regiões intercelulares, austenita não-estabilizada com baixo teor de carbono, sendo, portanto, metaestável. Conseqüentemente, quando submetidos a um esforço de tração, parte da austenita metaestável, presente nos contornos das células eutéticas, transforma-se em martensita. Uma vez formada, a presença de martensita serve como um ponto de nucleação de trinca, diminuindo assim o limite de resistência à tração e o alongamento. Para aumentar o alongamento é essencial diminuir essas regiões de alta segregação entre os nódulos de grafita, o que é possível com o aumento do número de nódulos de grafita.⁽¹²⁾

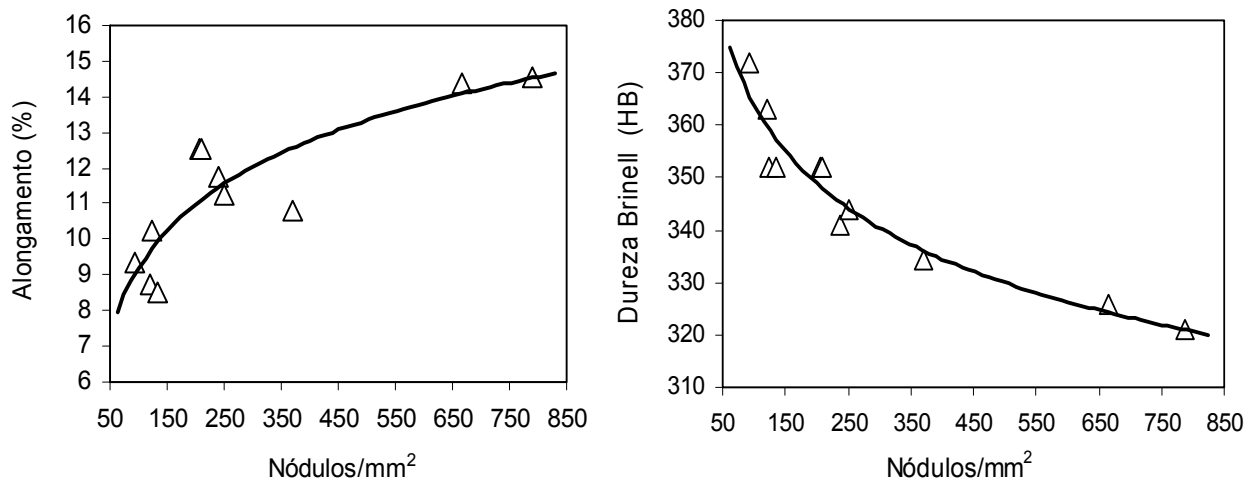


Figura 5. Variação do alongamento e dureza Brinell em função do número de nódulos de grafita/mm².

A Figura 6 mostra duas fotomicrografias apresentando as regiões segregadas entre os nódulos de grafita com austenita não estabilizada. Foi observada uma redução progressiva das regiões segregadas à medida que se aumentou o número de nódulos, como pode ser visto na Figura 7. Em amostras com alto número de nódulos de grafita, os elementos foram segregados de maneira mais distribuída, gerando uma microestrutura mais homogênea. Acredita-se que a influência do número de nódulos de grafita nas propriedades mecânicas seja bastante pronunciada em ADI cuja composição química esteja presente, em maiores concentrações, elementos formadores de carbonetos como manganês e molibdênio.

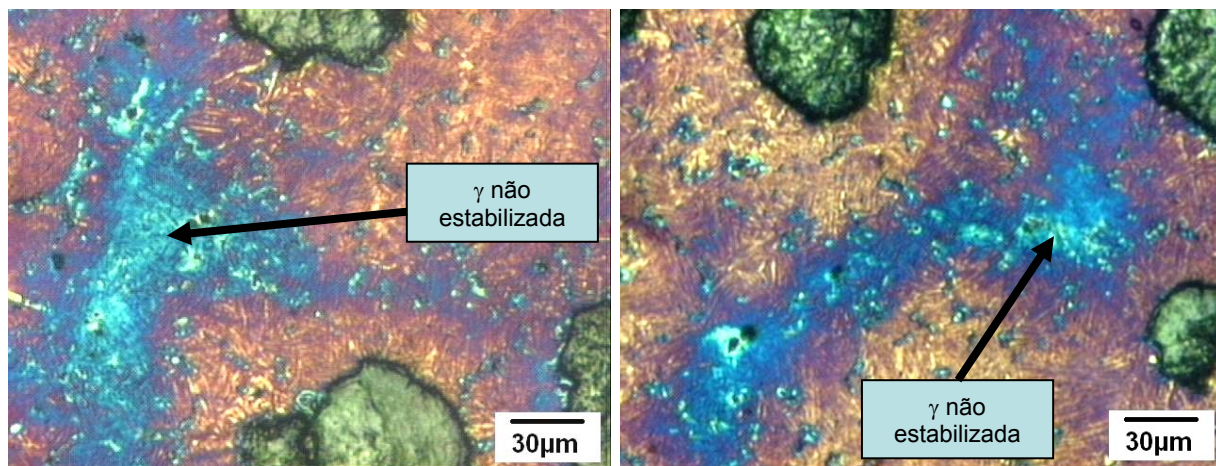


Figura 6. Fotomicrografias de uma amostra com 90 nódulos/mm² apresentando as regiões segregadas entre os nódulos de grafita com austenita não estabilizada. Microscopia óptica.

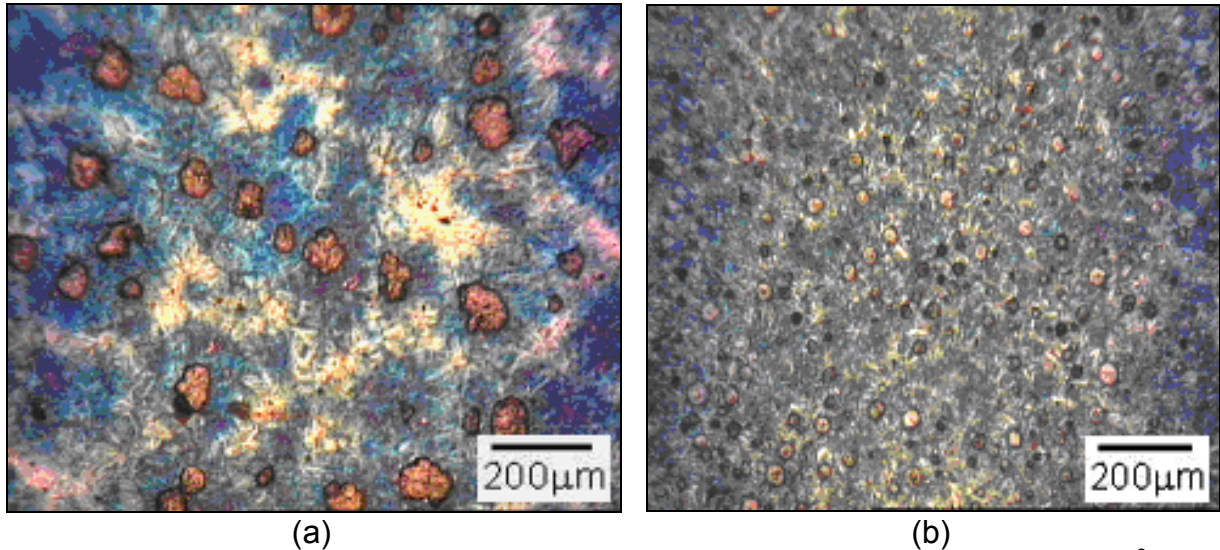


Figura 7. Regiões segregadas entre os nódulos de grafita: (a) amostra com 98 nódulos/mm² e (b) amostra com 784 nódulos/mm². Microscopia óptica.

Embora não se saiba ao certo as concentrações de austenita estabilizada e austenita não estabilizada presente nas amostras analisadas, a Figura 8a mostra a correlação encontrada entre a fração volumétrica de austenita total e o alongamento realizado em 09 amostras submetidas à difração de raios-X. Os resultados mostraram uma razão de proporcionalidade entre a austenita total e o alongamento. A fração volumétrica de austenita estabilizada é maior nas vizinhanças dos nódulos de grafita, tendo em vista que nestas regiões há uma concentração menor de elementos formadores de carbonetos.⁽¹⁴⁾ Desta forma, acredita-se que um maior número de nódulos de grafita tende a promover a formação de uma maior quantidade de austenita estabilizada, devido à maior superfície específica gerada pelos nódulos. A presença de maiores frações volumétricas de austenita estável, à temperatura ambiente, permite uma maior deformação plástica do material, uma vez que a austenita possui um maior número de planos de escorregamento.

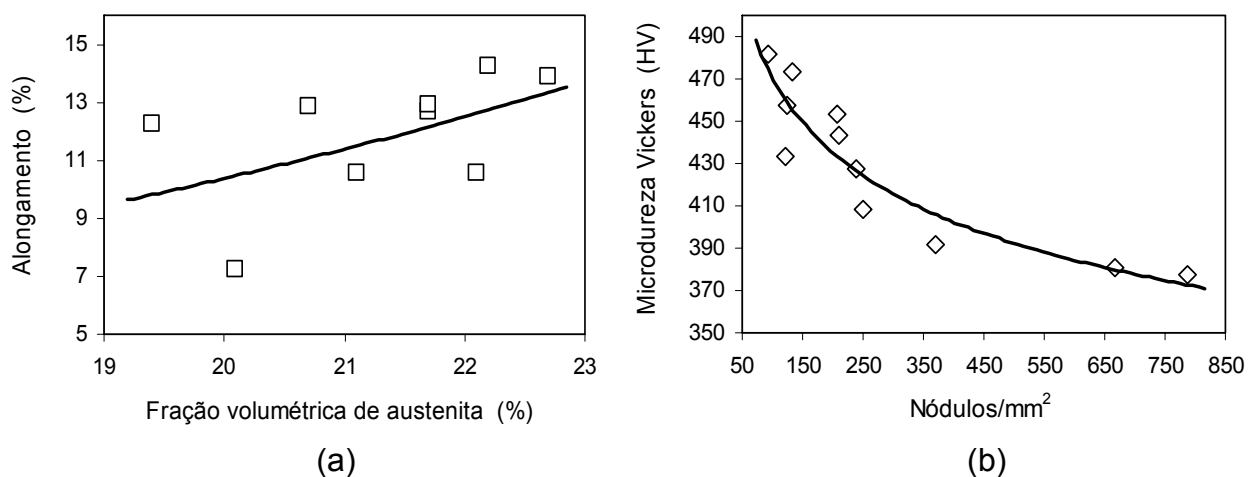


Figura 8. (a) Variação do alongamento em função da fração volumétrica de austenita, (b) Variação da dureza Vickers em função do número de nódulos de grafita/mm².

Foram realizados ensaios de microdureza Vickers (Figura 8b) na matriz metálica de todas as amostras. Foi observada uma diminuição na dureza da matriz metálica à medida que se aumentou o número de nódulos de grafita, o que está associada, provavelmente, à presença de maior fração volumétrica de austenita estabilizada. A queda da dureza Brinell (Figura 5) pode estar associada com o aumento progressivo da fração volumétrica de austenita estabilizada à medida que se aumentou o número de nódulos de grafita e à maior homogeneização da microestrutura. Acredita-se que parte da austenita não estabilizada, presente em proporções consideráveis nas amostras com baixo número de nódulos de grafita, se transforma em martensita quando submetida à deformação mecânica, o que explica os resultados de dureza mais elevados.

4 CONCLUSÕES

Foi avaliada a influência do número de nódulos de grafita nas propriedades mecânicas do ADI considerando uma amostragem que apresentou uma variação de 90 a 800 nódulos/mm². Todas as outras variáveis de processo foram mantidas constantes. A análise dos resultados obtidos nas condições experimentais utilizadas neste trabalho permite concluir que:

- O fator “**número de nódulos de grafita**” exerceu uma influência significativa no alongamento do ADI. À medida que se aumentou o número de nódulos de grafita, o alongamento aumentou de 7 para 15%.
- Mesmo apresentando uma ausferrita mais refinada, as amostras com alto número de nódulos de grafita apresentaram pequeno aumento no limite de resistência à tração, aumento este da ordem de 4%.
- Os resultados do limite de escoamento se mostraram insensíveis à variação do número de nódulos de grafita.
- Tanto a dureza Brinell como a microdureza Vickers diminuíram à medida que se aumentou o número de nódulos de grafita.

Agradecimentos

Os autores agradecem ao Sistema FIEMG (Federação das Indústrias do Estado de Minas Gerais) e a Plantar Siderúrgica pelo apoio na realização do trabalho.

REFERÊNCIAS

- 1 CARMO, D.J. **Desenvolvimento do processo tecnológico de fabricação de peças em ferro fundido nodular austemperado (ADI)**. (Dissertação de mestrado em Engenharia Metalúrgica e de Minas da Universidade Federal de Minas Gerais), Belo Horizonte: 2003. 191 p.
- 2 MELO, G.H.T.; CARMO, D.J. Correlação entre microestrutura e propriedades mecânicas do ferro fundido com grafita esferoidal. Itaúna: SENAI/CETEF, 1992.
- 3 SANTOS, A B.S.; BRANCO, C.H.C. **Metalurgia dos ferros fundidos cinzentos e nodulares**. São Paulo: IPT, 1989. 205p.
- 4 SILVA, C. **Influência do número de nódulos de grafita nas propriedades mecânicas do ferro fundido nodular austemperado**. (Dissertação de mestrado em Engenharia Metalúrgica e de Minas da Universidade Federal de Minas Gerais), Belo Horizonte: 2005. 101p.
- 5 AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM A 897M-90**: Standards specific for austempered ductile iron casting [Metric] 1. West Conshohocken, 1997.
- 6 CROCKER, M. ADI é alternativa para as fundições de ferro fundido nodular. **Fundição e Serviços**, v. 9, n. 69, p. 18-22, Set. 1998.
- 7 HAYRYNEN, K.L. The production of austempered ductile iron (ADI). In: WORLD CONFERENCE ON ADI, 2002. **Proceedings...** [s.n.t.], 2002.
- 8 SHIH, T.S.; CHAU, S.Y.; CHANG, C.H.; LI, C. Optimization of austenitizing treatment of austempered ductile irons.(96-72).**AFS TRANSACTIONS**, 1996. p.557-564.
- 9 DAÍ, P.Q.; HE, Z.R.; ZHENG, C.M.; MAO, Z.Y. In-situ SEM observation on the fracture of austempered ductile iron. **Materials Science and Engineering**, A-319-321, p.531-534, 2001.
- 10 BHADESHIA, H.K.D.H. Bainite in steels: transformations, microstructure and properties. 2.ed. Cambridge: ION Communications, 2001.
- 11 DEFOIRDT, F. Research, development and industrial applications of ADI at ferromatrix foundries. In: WORLD CONFERENCE ON AUSTEMPERED DUCTILE IRON, 1991, Chicago. **Proceedings...** Chicago: AFS, 1991, p.113-124.
- 12 OKAZAKI, K.; ASAI, M.T.; KUSUNOKI, H.; SAKAHARA, S. Application of ADI to automotive parts. In: WORLD CONFERENCE ON AUSTEMPERED DUCTILE IRON, Chicago, 1991. **Proceedings...**Chicago: AFS, 1991. p.288-299.
- 13 KOVACS, B.V. The effect of alloying elements and their segregation in ADI. In: WORLD CONFERENCE ON AUSTEMPERED DUCTILE IRON. Chicago 1991, Chicago. **Anais...** Des Plaines: AFS,1991. v. 1, p.201-270.
- 14 YESCAS, M.A.; BHADESHIA, H.K.D.H.; MACKAY, D.J. Estimation of the amount of retained austenite in austempered ductile cast iron using neural networks. **Materials Science and Engineering**, A-311, p.162-173, 2001.