

EFEITO DO TEMPO E DA TEMPERATURA DE TRATAMENTO TÉRMICO NA MICROESTRUTURA E NA DUREZA DE UM FERRO FUNDIDO NODULAR

B. C. M. Ribeiro¹; C. Braga²;; A. C. S. Bezerra²; S. C. S. Martins²; R. L. B. Diniz¹, W. Lopes², E. C. S. Corrêa²

(1) TEKSID; (2) CEFET/MG

CEFET/MG - Departamento de Engenharia de Materiais, Av. Amazonas 5253 - Nova Suíça - Belo Horizonte - MG, Brasil, CEP: 30.421-169. E-mail:

elaine@deii.cefetmg.br

RESUMO

Ferros fundidos são empregados com frequência devido à combinação de propriedades importantes para a engenharia e à possibilidade de obtenção de peças com formas complexas e dimensões variadas. Considerando os ferros fundidos nodulares, as características da grafita, como dimensões e proporção, em conjunto com os demais aspectos de sua microestrutura, influenciam diretamente nas propriedades e aplicações. Neste trabalho foi investigada a influência da realização de tratamentos térmicos de recozimento de ferritização e de decomposição de carbonetos na microestrutura e na dureza de um ferro fundido nodular, tendo como variáveis temperatura e tempo. Os resultados foram determinados por meio de microscopia óptica, microscopia eletrônica de varredura, ensaios de microdureza Vickers e dureza Brinell. Foi possível evidenciar a influência dos tratamentos térmicos na redução da proporção da perlita na matriz, no aumento das dimensões dos nódulos de grafita, na elevação da proporção das regiões ferríticas e na redução da dureza em diferentes níveis.

Palavras-chave: ferro fundido nodular, tratamentos térmicos, recozimento

INTRODUÇÃO

Ferros fundidos são materiais amplamente utilizados em muitos setores da indústria que, mesmo com o descobrimento e desenvolvimento de inúmeros materiais avançados, mantem sua importância devido às suas boas propriedades mecânicas, resistência ao desgaste, processamento simples e relativo baixo custo, sendo uma escolha ideal para muitas aplicações, especialmente na fabricação de componentes automotivos^(1,2,3,4).

Ferros fundidos nodulares são aqueles que apresentam a grafita em nódulos de morfologia preferencialmente esférica. Para isso, o processamento do material envolve a utilização, e, grande parte das vezes, de certo teor de magnésio (Mg). O Mg se combina facilmente com o enxofre e oxigênio formando, respectivamente, MgS e MgO. Esta reação reduz o percentual de elementos tensoativos, favorecendo a formação da grafita nodular^(5,6,7). Sabe-se que a morfologia da grafita e outras características microestruturais dos ferros fundidos nodulares exercem influência direta em suas propriedades mecânicas. A morfologia predominantemente esférica da grafita, por exemplo, apresenta menor efeito de concentração de tensões⁽⁶⁾, dessa forma, nódulos de grafita esféricos em uma matriz ferrítica constituem um ferro fundido com boa combinação de resistência ao impacto e ductilidade. Se a matriz for predominantemente perlítica, o material apresentará, por sua vez, elevada resistência mecânica e resistência ao desgaste⁽⁸⁾.

A composição química e a taxa de resfriamento são parâmetros importantes para determinar a microestrutura final do ferro fundido e, conseqüentemente, suas propriedades⁽⁹⁾. Nas últimas décadas, foram reportadas melhorias tanto na composição química dos ferros fundidos como nos processamentos térmicos, para a obtenção de diferentes características microestruturais da matriz e melhor controle da morfologia da grafita⁽¹⁰⁾. Entretanto, apesar dos avanços tecnológicos e surgimento de vários modelos teóricos sobre a morfologia esferoidal da grafita em ferros fundidos nodulares, percebe-se a falta de uma teoria universal que explique de maneira aprofundada os mecanismos de formação da grafita⁽¹¹⁾. Dentro desse contexto, o objetivo do presente trabalho envolveu a análise dos efeitos dos parâmetros do tratamento térmico de ferritização e de decomposição de carbonetos na microestrutura e nas propriedades mecânicas de um ferro fundido nodular originalmente de matriz perlítica.

MATERIAIS E MÉTODOS

Para a realização dos experimentos foi utilizada liga de ferro fundido nodular obtida por processo convencional de fundição com resfriamento dentro do molde. As amostras apresentavam seção de 30 mm, matriz predominantemente perlítica, dureza média de 311 HB e composição química conforme detalhada na Tabela 1.

Tabela 1 – Composição química (% em peso).

CT	Si	Mn	S	Mo	Sn	Cr
3,60	2,61	0,419	0,09	0,00	0,070	0,01
Cu	P	Pb	Ti	Nb	Ni	
1,10	0,049	0,0002	0,0293	0,00	0,0081	

A caracterização do material, antes e após tratamentos térmicos, foi conduzida por meio de microscopia óptica, microscopia eletrônica de varredura, ensaios de microdureza Vickers e de dureza Brinell. Os tratamentos térmicos foram realizados em diferentes temperaturas e tempos de encharque, avaliando a interferência destes parâmetros na microestrutura e propriedades do material. As temperaturas utilizadas foram de 690 °C, 760 °C, 860 °C e 900 °C e tempos de encharque de 30 min, 60 min, 120 min e 240 min, totalizando dezesseis condições distintas. As duas primeiras temperaturas compreenderam o tratamento térmico de recozimento de ferritização, um subcrítico e outro intercrítico. As demais temperaturas compreenderam o tratamento térmico de recozimento de decomposição de carbonetos^(7,8). Destaca-se que todas as amostras foram resfriadas ao ar.

As dezesseis amostras obtidas após tratamentos térmicos, bem como as amostras no estado inicial, foram submetidas à preparação metalográfica convencional: corte, embutimento, lixamento, polimento com pasta de diamante em diferentes granulometrias e ataque químico com Nital 3%. O procedimento de análise e aquisição de imagens por meio do microscópio óptico (MO) foi realizado em duas etapas. Inicialmente as amostras foram fotografadas sem a realização do ataque químico, com a finalidade de observar a morfologia e a dimensão dos nódulos de grafita. Posteriormente foram obtidas imagens da microestrutura com o ataque, analisando a interferência dos diferentes tratamentos térmicos na matriz

perlítica do ferro fundido nodular. Foram obtidas 30 fotomicrografias sem ataque e 30 com ataque para cada condição de tratamento térmico.

Por meio de um software para análise de imagens foi realizada a avaliação da morfologia da grafita, medindo a área dos nódulos presentes nas trinta imagens referentes às amostras sem ataque químico. Esse procedimento foi realizado para cada condição de tratamento térmico e ainda para as amostras no estado inicial. Os valores referentes à área média dos nódulos de grafita foram analisados para as dezesseis condições. Foi medido também o tamanho médio da grafita em amostras no estado inicial.

Além da microscopia óptica, foram realizadas imagens geradas a partir de elétrons retroespalhados, por meio de microscopia eletrônica de varredura (MEV), em duas ampliações distintas. Nesta etapa foram avaliadas as condições de tratamento térmico de recozimento de ferritização (690 °C e 760 °C), com os tempos de encharque de 30 min, 60 min, 120 min e 240 min. Apenas essas condições de tratamento foram avaliadas no MEV, uma vez que as demais não apresentaram variação significativa na microestrutura e na morfologia da grafita.

Para avaliar a influência das diferentes condições de tratamento térmico na dureza do material, foram realizados ensaios de microdureza Vickers em todas as amostras. Nos ensaios foi utilizada carga de 1,0 kg com tempo de 15 s, sendo que cada amostra foi submetida a 10 testes. As medições foram realizadas na matriz do material em regiões livres de nódulos de grafita, justamente para verificar a influência do tratamento térmico na dureza da matriz. Foram realizados também ensaios de dureza Brinell. Foi empregada uma carga de 750 kgf, com tempo de penetração de 15 s e penetrador de esfera de aço com 5 mm de diâmetro, sendo realizada 4 medidas em cada amostra. O ensaio Brinell foi realizado para verificar a influência dos diferentes tratamentos térmicos na dureza média do material.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Caracterização do material no estado inicial

As imagens obtidas por MO e MEV da amostra no estado inicial são apresentadas na Figura 1. Observa-se uma matriz predominantemente perlítica e grafita com morfologia nodular. A dureza média determinada para a matriz foi de 312 HV e para o material como um todo, englobando a matriz e os nódulos de grafita, foi

de 311 HB. Com relação à área da grafita, foi encontrado um valor médio de $988,853 \mu\text{m}^2$.

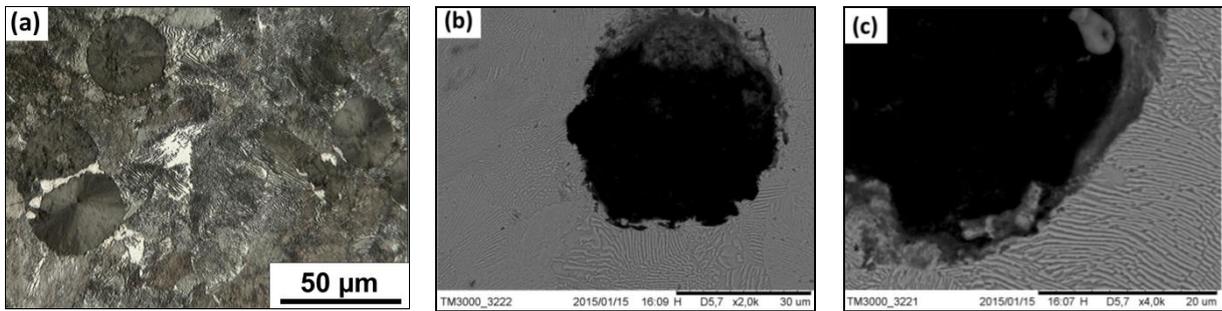


Figura 1 – Análise metalográfica da amostra no estado inicial: (a) MO, (b) e (c) MEV com aumentos distintos.

Caracterização após tratamentos térmicos

Na Figura 2 são mostradas as fotomicrografias (MO) referentes às amostras tratadas a 690°C . Verifica-se ainda a ocorrência de esferoidização da perlita com o tratamento, especialmente para o tempo de 240 min, no qual ocorreu aumento mais acentuado de regiões ferríticas. Observa-se também uma discreta elevação das dimensões dos nódulos de grafita com o aumento do tempo de encharque.

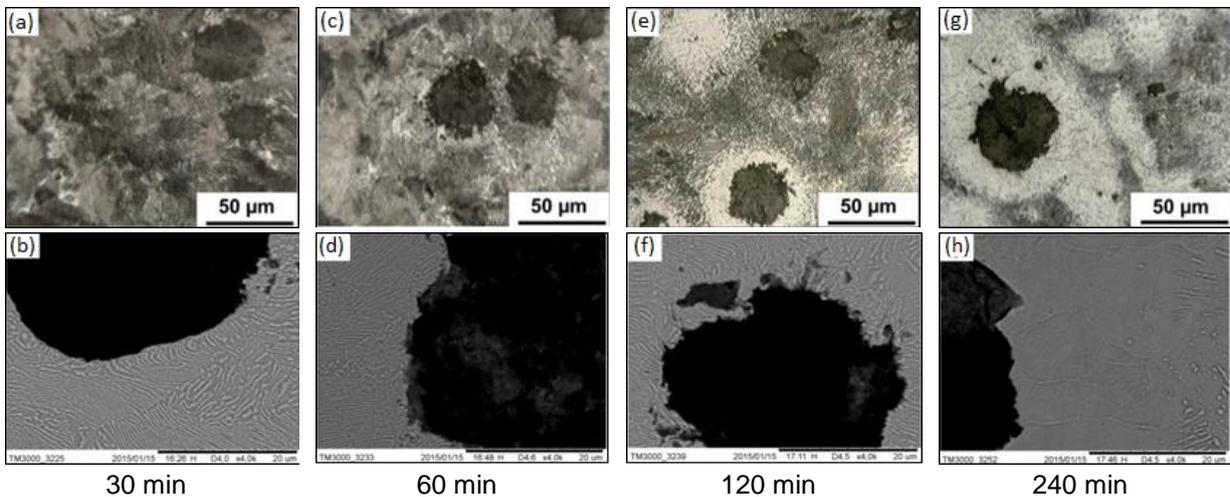


Figura 2 – Fotomicrografias do ferro fundido nodular tratado termicamente a 690°C obtidas em MO (a, c, e, g) e obtidas em MEV (b, d, f, h).

No que diz respeito ao ensaio de microdureza Vickers, dureza Brinell e ao tamanho do nódulo de grafita, as amostras tratadas termicamente a 690°C apresentaram redução da dureza média e um discreto aumento do tamanho médio

nódulo de grafita à medida que se aumentou o tempo de encharque, como pode ser observado na Tabela 2.

Tabela 2 – Ferro fundido nodular tratado a 690 °C.

Tempo de encharque	30 min	60 min	120 min	240 min
Microdureza Vickers (HV)	310	309	284	236
Dureza Brinell (HB)	285	285	270	229
Área média do nódulo de grafita (μm^2)	1104	1218	1436	1485

Similarmente ao que foi observado nas amostras tratadas a 690 °C, observou-se, nas amostras tratadas a 760 °C (Figura 3), que à medida que se aumentou o tempo de tratamento térmico, também houve uma diminuição das regiões com perlita e, conseqüentemente, um aumento das regiões ferríticas, mas dessa vez o aumento dessas regiões foi mais acentuado que o observado a 690 °C. Verifica-se que o espaçamento das lamelas de perlita aumentou, sendo que nas regiões ao redor dos nódulos de grafita foi onde também ocorreu uma elevação mais acentuada na proporção de ferrita. Observa-se ainda um aumento perceptível das dimensões dos nódulos de grafita e percebe-se que a perlita mudou de morfologia à medida que o tempo de encharque foi aumentando.

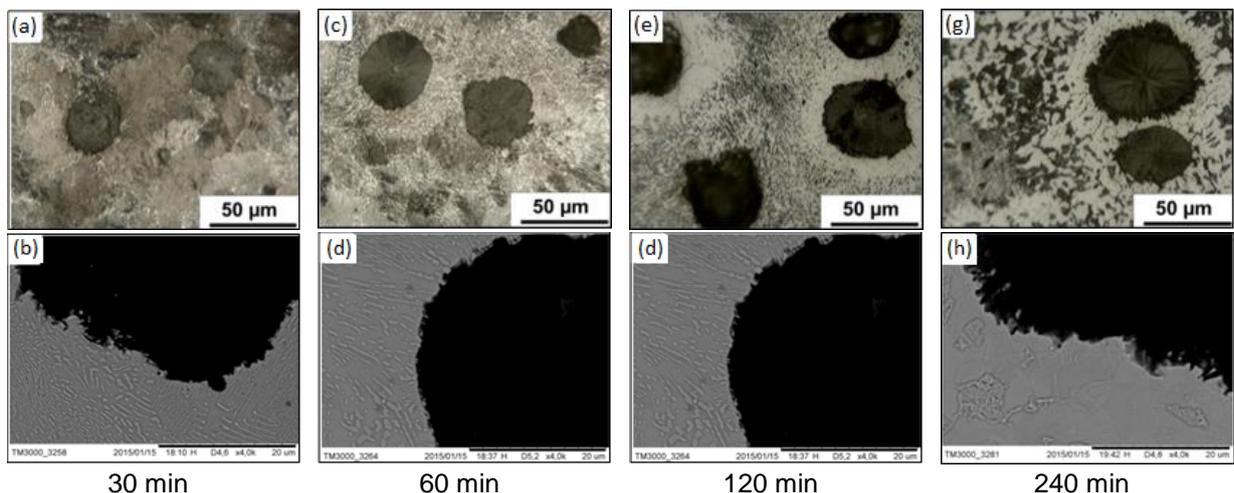


Figura 3 – Fotomicrografias do ferro fundido nodular tratado termicamente a 760 °C obtidas em MO (a, c, e, g) e obtidas em MEV (b, d, f, h).

Quanto aos resultados de dureza e tamanho do nódulo de grafita, as amostras tratadas termicamente a 760 °C apresentaram redução da dureza média e discreta elevação do tamanho dos nódulos de grafita à medida que se aumentou o

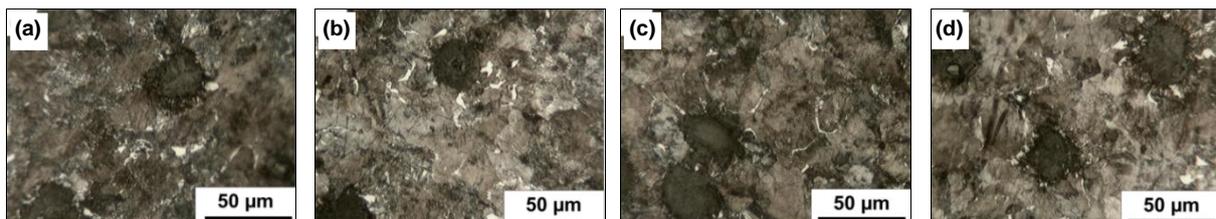
tempo de encharque, porém, de forma mais acentuada que a 690 °C, conforme pode ser observado na Tabela 3.

Tabela 3 – Ferro fundido nodular tratado a 760 °C.

Tempo de encharque	30 min	60 min	120 min	240 min
Microdureza Vickers (HV)	288	279	253	220
Dureza Brinell (HB)	255	255	235	221
Área média do nódulo de grafita (μm^2)	1236	1444	1604	1696

Nas amostras submetidas ao recozimento de ferritização tanto na temperatura de 690 °C como a 760 °C foi possível observar a decomposição da cementita presente na perlita em ferrita e grafita. Essa decomposição é possível devido à difusão do carbono para os nódulos de grafita, que tiveram a sua área aumentada como consequência. A redução percentual das regiões perlíticas com o aumento das regiões ferríticas fez com que a peça reduzisse a dureza à medida que o tempo de encharque foi elevado de 30 para 240 min. Maiores tempos de recozimento permitem a transformação da estrutura perlítica da matriz para uma estrutura ferrítica e ativa o mecanismo de difusão dos átomos de carbono, o que resulta em nódulos de grafita de maior diâmetro e com alteração na morfologia⁽⁹⁾.

A Figura 4 apresenta as fotomicrografias das amostras tratadas termicamente a 860 °C nos diferentes tempos de encharque. Diferentemente do que aconteceu com as amostras tratadas a 690 e 760 °C, não houve redução da região perlítica à medida que se aumentou o tempo de encharque e, conseqüentemente, não se verificou aumento de regiões ferríticas. A microestrutura permaneceu semelhante para os diferentes tempos de encharque, sendo próxima daquela apresentada para o material no estado inicial, onde havia matriz predominantemente perlítica. Por esse motivo, as amostras submetidas a 860 °C não foram analisadas por meio do MEV.



Tempos de encharque de: (a) 30 min; (b) 60 min; (c) 120 min; (d) 240 min.

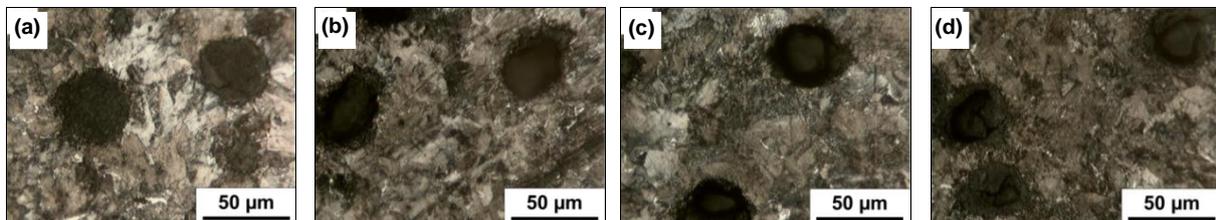
Figura 4 – Ferro fundido nodular tratado termicamente a 860 °C.

Conforme pode ser observado na Tabela 4, as amostras tratadas a 860 °C não apresentaram alteração considerável dos valores médios de dureza ou do tamanho do nódulo de grafita à medida que se aumentou o tempo de encharque.

Tabela 4 – Ferro fundido nodular tratado a 860 °C.

Tempo de encharque	30 min	60 min	120 min	240 min
Microdureza Vickers (HV)	320	318	320	317
Dureza Brinell (HB)	316	316	321	318
Área média do nódulo de grafita (μm^2)	1017	1081	999	1124

Nas amostras tratadas termicamente a 900 °C (Figura 5), assim como aconteceu com as amostras tratadas a 860 °C, não houve redução da região perlítica à medida que se aumentou o tempo de encharque. A microestrutura permaneceu semelhante mesmo após a variação do tempo de tratamento. Além disso, a microestrutura se mostrou similar àquela apresentada para o material no estado inicial e para as amostras tratadas a 860 °C. Por esse motivo as amostras submetidas a 900 °C também não foram analisadas por meio do MEV.



Tempos de encharque de: (a) 30 min; (b) 60 min; (c) 120 min; (d) 240 min.

Figura 5 – Ferro fundido nodular tratado termicamente a 900 °C.

No tratamento térmico realizado a 900 °C não foi possível observar alterações consideráveis nos resultados de dureza e tamanho do nódulo de grafita com o aumento no tempo de encharque, conforme pode ser observado na Tabela 5.

Tabela 5 – Ferro fundido nodular tratado a 900 °C.

Tempo de encharque	30 min	60 min	120 min	240 min
Microdureza Vickers (HV)	323	332	329	337
Dureza Brinell (HB)	321	321	313	321
Área média do nódulo de grafita (μm^2)	964	1006	1048	987

Nas amostras tratadas a 860 °C e 900 °C não foi observado o fenômeno de decomposição da cementita. A dureza média do material não apresentou alterações significativas com o aumento do tempo de encharque. Entretanto, ao comparar os resultados de dureza dessas amostras com os valores referentes à amostra no estado inicial, percebe-se uma elevação na dureza média do material. Esse aumento na dureza é explicado devido à diferença na taxa de resfriamento. O material no estado inicial sofreu resfriamento dentro molde, a partir da temperatura de austenitização, portanto a uma taxa de resfriamento mais lenta do que as amostras tratadas termicamente a 860 °C e 900 °C resfriadas ao ar. Quando a taxa de resfriamento é reduzida, ocorre também a redução na dureza do ferro fundido devido à transformação gradual de perlita em ferrita, bem como ao coalescimento de carbono nos nódulos de grafita⁽¹²⁾.

Comparação gráfica dos valores obtidos para os diferentes tratamentos térmicos

A comparação dos valores de microdureza Vickers e de dureza Brinell, para as diferentes condições de tratamentos térmicos é apresentada na Figura 6. Verifica-se que para as amostras tratadas a 690 °C e 760 °C houve uma redução de dureza à medida que se aumentou o tempo de encharque. Essa redução de dureza está relacionada ao aumento das regiões de ferrita observadas nos tratamentos térmicos de 690 e 760 °C, principalmente para os tempos de encharque de 120 e 240 min. Já para as amostras tratadas a 860 e 900 °C não foi verificada uma redução de dureza à medida que se aumentou o tempo de encharque, da mesma forma que não foi verificado o aumento de regiões de ferrita para essas temperaturas.

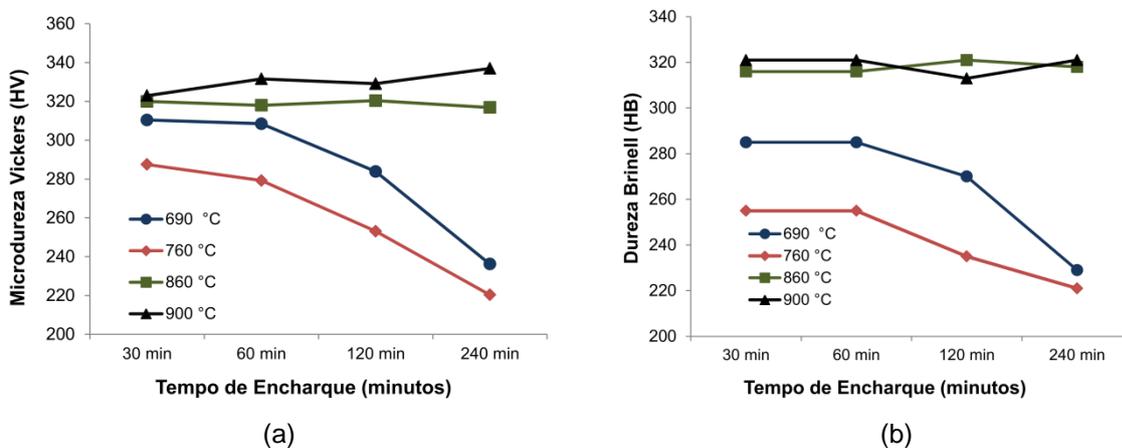


Figura 6 – Valores de dureza para as diferentes condições de tratamento térmico.

Além dos valores de microdureza Vickers e de dureza Brinell, foram comparadas as dimensões dos nódulos de grafita para as diferentes condições de tratamento térmico, conforme apresentado na Figura 7. É possível verificar que para as amostras tratadas a 690 °C e 760 °C houve um aumento do tamanho do nódulo de grafita à medida que se aumentou o tempo de encharque. Já para as amostras tratadas a 860 e 900 °C não foi verificada uma alteração do tamanho da grafita, com valores próximos ao material no estado inicial.

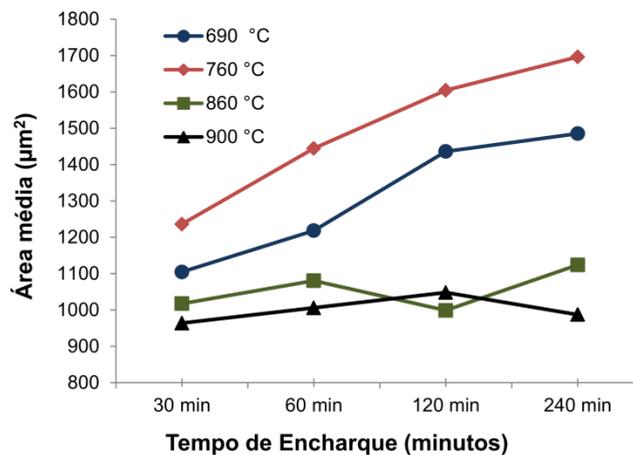


Figura 7 – Tamanho médio do nódulo de grafita para as diferentes condições de tratamento térmico.

CONCLUSÃO

As amostras de ferro fundido nodular submetidas ao recozimento de ferritização, tanto subcrítico quanto intercrítico, apresentaram o fenômeno de decomposição da cementita presente na perlita em ferrita e grafita. Como consequência dessa decomposição, ocorreu também o aumento na área dos nódulos de grafita, devido à difusão do carbono. Com a elevação gradual do tempo de encharque de 30 para 240 min observou-se também a redução na dureza média do material, o que é explicado pela redução percentual das regiões perliticas.

As amostras tratadas acima da temperatura de austenitização, a 860 °C e 900 °C, não apresentaram o fenômeno de decomposição da cementita, nem a redução da dureza média do material. Observou-se, entretanto, uma elevação na dureza média das amostras quando comparadas às amostras do material no estado inicial, o que é explicado pela maior taxa de resfriamento das amostras que foram resfriadas ao ar após tratamento térmico.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à CAPES, à FINEP e à FAPEMIG pelo apoio financeiro à instituição e concessão de bolsas de mestrado. À TEKSID, ao CEFET-MG e ao Departamento de Engenharia de Materiais DEMAT.

REFERÊNCIAS

- (1) CHUANG, C. et al. 3D quantitative analysis of graphite morphology in high strength cast iron by high-energy X-ray tomography. *Scripta Materialia*, v.106, p.5-8, 2015.
- (2) MURCIA, S.C.; PANIAGUA, M.A.; OSSA, E.A. Development of as-cast dual matrix structure (DMS) ductile iron. *Materials Science & Engineering A*, v.566, p.8-15, 2013.
- (3) HERVAS, I.; BETTAIEB, M.B.; THUAULT, A.; HUG, E. Graphite nodule morphology as an indicator of the local complex strain state in ductile cast iron. *Materials and Design*, v.52, p.524-532, 2013.
- (4) ZOU, J.; SHIMIZU, K.; CAI, Q. Effects of Cr content and annealing temperature on microstructure and wear characteristics of cast ausferrite nodular iron. *Journal of Iron and Steel Research*, v.22, n.11, p.1049-1054, 2015.
- (5) GHAHREMANINEZHAD, A.; RAVI-CHANDAR, K. Deformation and failure in nodular cast iron. *Acta Materialia*, v.60, p.2359-2368, 2012.
- (6) COLPAERT, H. Metalografia dos produtos siderúrgicos comuns. Revisão técnica: André Luiz V. da Costa e Silva. 4.ed. São Paulo: Blücher, 2008. 651p.
- (7) GUESSER, L.G. Propriedades mecânicas dos ferros fundidos. 1.ed. São Paulo: Blücher, 2009.
- (8) GONZAGA, R.A. Influence of ferrite and pearlite content on mechanical properties of ductile cast irons. *Materials Science & Engineering A*, v.567, p.1-8, 2013.
- (9) ASM HANDBOOK VOL 9. Metallography and Microstructures. Ohio: ASM International, 2004.
- (10) IACOVIELLO, F.; COCCO, V.D. Influence of the graphite elements morphology on the fatigue crack propagation mechanisms in a ferritic ductile cast iron. *Engineering Fracture Mechanics* (2016), <http://dx.doi.org/10.1016/j.engfracmech.2016.03.041>
- (11) CHAUS, A.S. Special features of the microstructure of cast iron with spheroidal graphite. *Metal Science and Heat Treatment*, v.57, n.7-8, p.419-427, 2015.
- (12) BEHNAM, M.M.J.; DAVAMI, P.; VARAHRAM, N. Effect of cooling rate on microstructure and mechanical properties of gray cast iron. *Materials Science & Engineering A*. v.528, p.583-588, 2010.

EFFECT OF TIME AND HEAT TREATMENT TEMPERATURE ON MICROSTRUCTURE AND HARDNESS OF A NODULAR CAST IRON

ABSTRACT

Cast irons are frequently used in mechanical industry due to the combination of important properties for engineering and the possibility of obtaining parts with complex shapes and various dimensions. Considering the nodular cast iron, graphite characteristics, such as size and proportion, with other aspects of their microstructure, directly influence the properties and applications of such materials. In this study, the influence of annealing and carbides decomposition heat treatments in the microstructure and hardness of a nodular cast iron was investigated, by varying temperature and time. Results were determined by optical microscopy, scanning electron microscopy, Vickers microhardness and Brinell hardness testing. It was possible to demonstrate the influence of heat treatments in reducing the proportion of pearlite in the matrix, increasing the size of graphite nodules, increasing proportion of ferritic regions, and the reduction of hardness at different levels.

Keywords: nodular cast iron, heat treatment, annealing