



INFLUÊNCIA DO TEMPO DE TRATAMENTO TÉRMICO NA RESISTÊNCIA À CORROSÃO DO FERRO FUNDIDO NODULAR AUSTEMPERADO

Medeiros, Victor Henrique de Mattos⁽¹⁾, Melo, Ismael Nogueira Rabelo de⁽²⁾, Brito, Pedro Paiva⁽³⁾, Ramos, Pedro Augusto⁽⁴⁾

⁽¹⁾ Graduando em Engenharia de Controle e Automação - Instituto Federal de Minas Gerais (IFMG) - Campus Ibirité

⁽²⁾ Professor Colaborador - Instituto Federal de Minas Gerais (IFMG) - Campus Betim

⁽³⁾ Professor Colaborador - Departamento de Engenharia mecânica - Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais – PUC-MG

⁽⁴⁾ Professor orientador - IFMG - Campus Ibirité

RESUMO

O ferro fundido nodular austemperado (Austempered Ductile Iron) possui uma microestrutura formada por nódulos de grafita com uma matriz predominantemente perlítica com áreas de ferrita em torno dos nódulos de grafita, conhecida por “olho de boi”, após austenitização seguida pelo tratamento de austêmpera é formada uma matriz composta por austenita estabilizada com alto teor de carbono e ferrita acicular, conhecida como “ausferrita”. Essa microestrutura, que é obtida através do tratamento térmico de austêmpera, influencia diretamente as propriedades mecânicas e a resistência à corrosão do material. Neste trabalho, foram investigados a influência do tempo de austêmpera sobre a microestrutura do ADI. As amostras de ferro fundido nodular austemperado foram tratadas isotermicamente a 320°C por tempos variados e caracterizadas por microscopia ótica, microscopia eletrônica de varredura (MEV), difração de raios-X (DRX) além da realização de segmentação microestrutural por inteligência artificial. Os resultados demonstraram que o software ImageJ®, utilizado para segmentação microestrutural por inteligência artificial, classificou a microestrutura com alta precisão em comparação com a quantificação de fases convencional por DRX e também sugeriu mudanças na morfologia da grafita, causadas possivelmente pela difusão do carbono, efeito que pode afetar o comportamento mecânico do material.

Palavras-chave: Austêmpera; ADI; Evolução microestrutural; Segmentação microestrutural; Morfologia da grafita.



1 INTRODUÇÃO

O ferro fundido nodular austemperado (ADI) é amplamente utilizado na engenharia devido à sua microestrutura composta por nódulos de grafita em uma matriz de ausferrita, o que resulta em alta resistência, ductilidade, e resistência à fadiga e à corrosão (BRITO, 2019). Isso o torna ideal para aplicações em construção civil, automotiva, mineração e agrícolas.

O ADI estudado foi obtido por austêmpera de ferro fundido nodular bruto, modificando frações de ferrita e austenita, o que afeta suas propriedades mecânicas (AKINRIBIDE, 2022). A austêmpera envolve austenitização completa e resfriamento para 290-420°C, estabilizando a austenita residual pelo enriquecimento de carbono (Putatunda, 1997; Krawiec, 2023). Se o resfriamento for rápido, pode formar-se martensita, com maior dureza e menor ductilidade (BRITO, 2019). Tempos prolongados geram bainita, comprometendo a tenacidade do material.

O trabalho foca na evolução microestrutural do ADI, analisando a matriz e os nódulos de grafita conforme o tempo de austêmpera, utilizando o software ImageJ® para segmentação de imagens como alternativa à difração de raios-X (DRX). De forma adicional os nódulos de grafita também foram caracterizados pelo mesmo método, buscando possíveis alterações em sua morfologia após o tratamento térmico.

2 DESENVOLVIMENTO

2.1 Fundamentação Teórica

O processo de austêmpera do ferro fundido nodular é ilustrado na Figura 1, apresentando a sequência sobreposta ao diagrama de transformação isotérmica. O material é aquecido para completa austenitização e rapidamente resfriado para a temperatura de austêmpera (TA), entre 290 e 420°C, onde ocorre a transformação gradual da austenita em ferrita, enriquecendo a austenita residual com carbono. No Estágio I, a microestrutura obtida é de ferrita e austenita estabilizada. No entanto, se mantido por muito tempo em TA, há decomposição total para bainita, o que reduz ductilidade e tenacidade (Zimba; Simbi; Navara, 2003). O ADI atinge suas propriedades ideais entre o fim do Estágio I e início do Estágio II, configurando uma "janela de

processamento" (Darwish; Elliott, 1993; Hamid Ali; Elliott, 1996; Rao; Putatunda, 1997). A TA elevada aumenta a ductilidade e tenacidade, mas reduz a dureza (Zimba; Simbi; Navara, 2003).

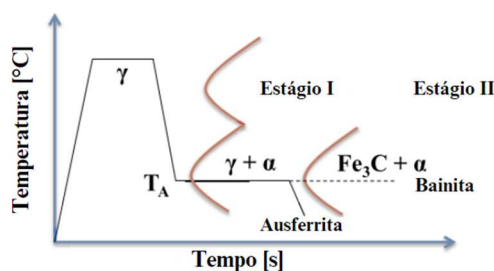


Figura 1 – Representação do tratamento térmico de austêmpera aplicado em ferro fundido nodular, segundo (BRITO, 2019)

2.2 Metodologia

O tratamento de austêmpera foi realizado a uma temperatura fixa de 320°C, por diferentes tempos de processamento, sendo eles: 10, 20, 30, 60 e 120 minutos. A composição química detalhada, obtida por espectrometria óptica, é apresentada na Tabela 1 (em %).

C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Al	Cu	Ti	Mg	Fe
3.1809	2.9426	0.3473	0.0461	0.0159	0.0315	0.0069	0.0164	1.0247	0.0078	0.0449	Balanco

Tabela 1 – Composição química do material utilizado no trabalho

As amostras passaram pela preparação metalográfica sendo submetidas ao lixamento e polimento padrão, seguido por ataque químico com Nital 2% para revelar as fases conforme apresentado na Figura 2. As propriedades de dureza foram avaliadas em HRC para melhor compreensão da resistência mecânica com a evolução do tratamento térmico.

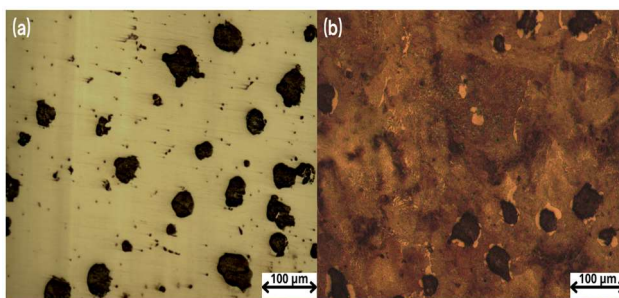


Figura 2 – Microscopia Ótica do ADI com ampliação de 200x (a) como fundido sem ataque, (b) como fundido após ataque com Nital 2%

2.2.1 Análise Microestrutural

Para a análise microestrutural, a caracterização de fases foi realizada por DRX (Difração de Raios-X), utilizando o método RIR para a quantificação de ferrita acicular e austenita. Em comparação ao ensaio convencional de DRX, o software ImageJ® foi utilizado para quantificação de fases conforme apresentado na Figura 3, assim como para a análise morfológica dos nódulos de grafita, utilizando imagens obtidas pelo MEV (Microscopia Eletrônica de Varredura) e microscopia ótica.

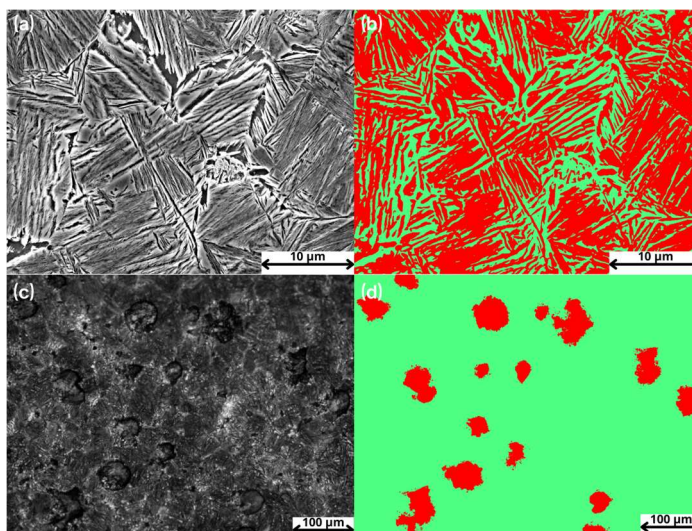


Figura 3 – (a) Imagem por MEV ADI 2500x após 120 min de austêmpera, (b) quantificação de fases ImageJ®, (c) Imagem por microscopia ótica ADI 200x após 120 min de austêmpera e (d) segmentação para análise dos nódulos de grafita ImageJ®.

2.2.2 Resultados e discussão

A análise da dureza sugeriu uma formação martensítica em tempos iniciais e a estabilização da dureza em valores mais baixos para tempos maiores, com um valor médio de 42 HRC, característico de uma microestrutura austemperada. O DRX indicou a presença predominante de ferrita acicular (que vai aumentando com o tempo de austêmpera) e austenita estabilizada com alto teor de carbono. A segmentação de fases no software ImageJ® demonstrou proximidade nos valores de frações de fase obtidos pelo DRX, considerando



ampliações de 2500x obtidas no MEV, validando sua eficácia como método alternativo nessas condições.

Em relação à morfologia da grafita, o ImageJ® identificou, com o uso de imagens obtidas por microscopia ótica na ampliação de 200x, um aumento no tamanho e perímetro das partículas de grafita, com redução na circularidade, sugerindo uma evolução para formas mais irregulares ao longo do tratamento, o que potencialmente influencia a resistência à corrosão do material.

3 CONCLUSÃO

Após os tratamentos térmicos de austêmpera no ADI a 320°C, observou-se inicialmente uma maior dureza aos 10 minutos, indicando a presença de martensita, devido à falta de estabilização da austenita seguida do resfriamento. Após 20 minutos, a dureza se estabilizou devido ao desenvolvimento de ferrita acicular e à estabilização da austenita rica em carbono.

A segmentação de imagem com ImageJ® foi fundamental, revelando uma redução na fração de austenita e um aumento na fração de ferrita acicular, com resultados consistentes em relação ao DRX.

Os nódulos de grafita apresentaram variações no tamanho: aumentaram aos 10 minutos, diminuíram aos 20 minutos e voltaram a crescer até 120 minutos, sugerindo difusão de carbono entre a matriz e a grafita. Estas variações potencialmente podem afetar a resistência à corrosão do material em algumas aplicações, porém análises mais aprofundadas entre a diferença de potencial entre matriz e nódulos precisam ser realizadas.

A análise da microestrutura através da segmentação de imagens se mostrou um método versátil e de baixo custo, permitindo caracterizações eficazes dos nódulos de grafita e da matriz, a depender das ampliações utilizadas.



REFERÊNCIAS

K. H. S. Silva, J. R. Carneiro, R. S. Coelho, H. Pinto, and P. Brito, **Influence of shot peening on residual stresses and tribological behavior of cast and austempered ductile iron**, *Wear*, vol. 440–441, Dec. 2019, doi: 10.1016/j.wear.2019.203099.

O. J. Akinribide et al., **A Review on Heat Treatment of Cast Iron: Phase Evolution and Mechanical Characterization**, Oct. 01, 2022, MDPI. doi: 10.3390/ma15207109.

P. Kejzlar, Z. Andrsova, M. Petrzilkova, B. Skrbek, A. Duchac, and D. Myszk, **Highly Accurate Structural Analysis of Austempered Ductile Iron Using EBSD Technique**, in *Materials Science Forum*, vol. 1081, Trans Tech Publications Ltd, 2023, pp. 125–130. doi: 10.4028/p-7xl336.

A. S. Darmawan, A. D. Anggono, A. Yulianto, B. W. Febriantoko, and A. Hamid, **Effect of Austempering Holding Time Variations of 30, 60, and 90 Minutes at 300 °c on the Microstructure and Toughness of Nodular Cast Iron**, in *Journal of Physics: Conference Series*, Institute of Physics, 2024. doi: 10.1088/1742-6596/2739/1/012029.

P. P. Rao and S. K. Putatunda, **Influence of Microstructure on Fracture Toughness of Austempered Ductile Iron**, 1997.

H. Krawiec, J. Lelito, M. Mróz, and M. Radoń, **Influence of Heat Treatment Parameters of Austempered Ductile Iron on the Microstructure, Corrosion and Tribological Properties**, *Materials*, vol. 16, no. 11, Jun. 2023, doi: 10.3390/ma16114107.

ZIMBA, J.; SIMBI, D. J.; NAVARA, E. **Austempered ductile iron: An alternative material for earth moving components**. 2003, [S.l: s.n.], 2003. p. 643–649.

DARWISH, N.; ELLIOTT, R. **Austempering of low manganese ductile irons: Part 1 processing window**. *Materials Science and Technology*, v. 9, n. 7, p. 572–585, 1993.

HAMID ALI, A. S.; ELLIOTT, R. **Austempering of an Mn–Mo–Cu alloyed ductile iron Part 2 – Structure–mechanical property relationships**. *Materials Science and Technology*, v. 12, n. 9, p. 780–787, 1996.

RAO, P. P.; PUTATUNDA, S. K. **Influence of microstructure on fracture toughness of austempered ductile iron**. *Metallurgical and Materials Transactions A*, v. 28, n. July, p. 1457–1470, 1997.