

INFLUÊNCIA DOS PARÂMETROS DE AUSTENITIZAÇÃO PARA FABRICAÇÃO DO FERRO NODULAR AUSTEMPERADO A PARTIR DA ZONA CRÍTICA ¹

Eliana Franco ²

César Edil da Costa ³

Joãnesson Araujo Stahlschmidt ⁴

Wilson Luiz Guesser ⁵

Resumo

O ferro fundido nodular austemperado a partir da zona crítica, denominado NAZC neste trabalho, tem se apresentado como um material emergente devido ao seu interessante conjunto de propriedades mecânicas. O principal objetivo deste trabalho é avaliar os parâmetros de austenitização para a fabricação NAZC. Inicialmente, amostras de ferro nodular foram austenitizadas dentro da zona crítica e temperadas para avaliação da parcela de austenita (martensita na temperatura ambiente), a qual se transformaria em ausferrita no estudo posterior de austêmpera. O tratamento de austêmpera resulta em uma microestrutura dual de ausferrita e ferrita pró-eutetóide. A partir da análise dos resultados de têmpera, foram realizados tratamentos de austêmpera e então observados os parâmetros que levam as determinadas microestruturas. Em ambos os tratamentos, as amostras foram caracterizadas por microscopia óptica e análise de imagem. Tratamentos de austêmpera realizados a uma temperatura de austenitização de 790 °C e tempos de 3 e 4 horas levaram a uma microestrutura final que deve apresentar um interessante conjunto de propriedades mecânicas.

Palavras-chave: Austêmpera; Zona crítica; Ferrita pró-eutetóide; Ausferrita.

INFLUENCE OF AUSTENITIZING PARAMETERS TO MANUFACTURE AUSTEMPERED DUCTILE CAST IRON FROM CRITICAL ZONE

Abstract

The austempered ductile cast iron from the critical zone, called NAZC in this work, has been presented as a material emerging material due to its interesting range of mechanical properties. The main objective of this study is to evaluate the austenitizing parameters to manufacture NAZC. Initially, ductile iron specimens were austenitized within the critical zone and quenched to evaluate the amount of austenite (martensite at room temperature), which would become ausferrite later in the study of austempering. The treatment of austempering results in a dual microstructure of ausferrite and proeutectoid ferrite. From the analysis of austempering results, were performed austempering treatments and then observed the parameters that lead to certain microstructure. In both treatments, the specimens were characterized by optical microscopy and image analysis. Austempering treatments performed at a temperature of 790 °C and times of 3 and 4 hours led to a final microstructure which should present an interesting set of mechanical properties.

Key words: Austempering; Critical zone; Proeutectoid ferrite; Ausferrite.

¹ *Contribuição técnica ao 63º Congresso Anual da ABM, 28 de julho a 1º de agosto de 2008, Santos, SP, Brasil*

² *Aluna de mestrado da Universidade Estadual de Santa Catarina.*

³ *Prof. da Universidade Estadual de Santa Catarina, Doutor em Engenharia Mecânica.*

⁴ *Academico do Curso de Engenharia Mecânica - UDESC*

⁵ *Prof. da Universidade Estadual de Santa Catarina e pesquisador da Indústria de Fundição Tupy, Doutor em Engenharia Metalúrgica.*

1 INTRODUÇÃO

O NAZC - Nodular Austemperado a partir da Zona Crítica apresenta de um modo geral as características dos nodulares austemperados, associando altos valores de resistência mecânica com alto alongamento, bem superiores aos nodulares de matriz de perlita e ferrita.^(1,2) O termo resistência mecânica refere-se ao limite de resistência à tração e ao limite de escoamento.

A microestrutura desse material apresenta uma matriz dual, constituída por ferrita pró-eutetóide ou equiaxial e ausferrita. A ausferrita é constituída por ferrita bainítica e austenita de alto carbono, essa última também chamada de austenita retida, estável ou austenita não transformada.⁽³⁾ A presença de ferrita pró-eutetóide confere a essa nova classe de material uma maior tenacidade, diminuindo assim a sua sensibilidade à presença de pequenos defeitos (microrechupes, entalhes de usinagem).⁽²⁾ Além disso, a sua usinabilidade é superior à dos nodulares austemperados convencionais, de modo que esse material é também denominado de nodular austemperado usinável. As propriedades de NAZC tornam esse material aplicável na indústria automotiva em componentes do chassi e da suspensão, devido a excelente ductilidade; em virabrequins, para aplicações que requerem alta resistência mecânica; e em componentes submetidos à fadiga.⁽⁴⁾

O tratamento térmico para obtenção de NAZC consiste em duas etapas, austenitização dentro da zona crítica seguida de austêmpera. Um esquema do tratamento térmico para obtenção de NAZC é apresentado na Figura 1.

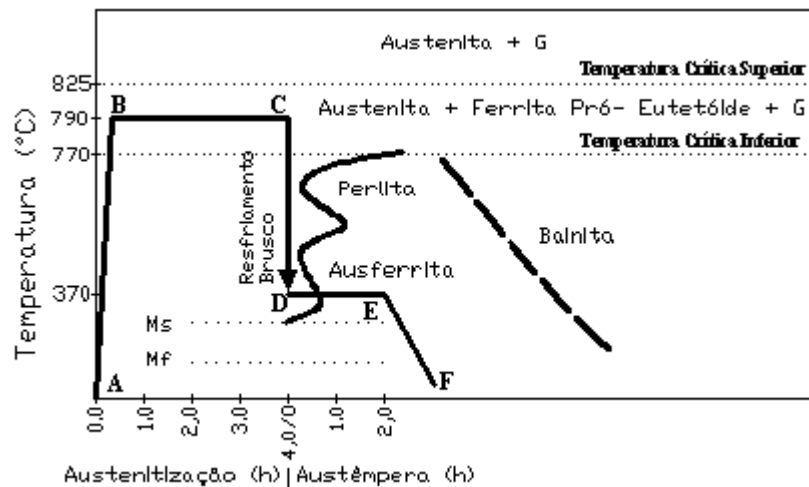


Figura 1 - Esquema do tratamento térmico para obtenção de NAZC.

O primeiro passo do tratamento consiste no aquecimento do material para a temperatura de austenitização, A-B. O passo seguinte consiste na austenitização dentro da zona crítica, patamar B-C, nessa etapa obtém-se uma microestrutura mista contendo ferrita pró-eutetóide e austenita. Após austenitização segue o resfriamento para a temperatura de austêmpera, passo C-D, que deve ser completado rápido o suficiente para evitar a formação de perlita.⁽⁵⁾ O patamar D-E é a etapa de austêmpera, nessa

etapa a austenita formada durante austenitização se transforma em ausferrita. Finalmente, a peça é resfriada até a temperatura ambiente (E-F).

Na etapa de austenitização a microestrutura permanece à temperatura constante por um intervalo de tempo suficiente para produzir uma microestrutura mista contendo ferrita pró-eutetóide e austenita saturada em carbono. Os nódulos de grafita representam um estoque de carbono e promovem a saturação de carbono através de um processo de difusão. Nesse caso, o percurso da difusão será tanto menor quanto maior a quantidade de nódulos, caracterizada pela contagem de nódulos por unidade de área. A quantidade de carbono dissolvido na austenita é determinada pelo tempo e pela temperatura de austenitização.⁽⁵⁾

Os contornos de células eutética são regiões com maior potencial para a nucleação da austenita devido à concentração de Mn nessas regiões. Como o Mn diminui a temperatura de austenitização, o processo de austenitização se inicia nessas regiões ricas em Mn. O Si, assim como o Mn, é outro elemento importante para o NAZC, pois esse elemento aumenta a temperatura de austenitização. A segregação do Si próximo aos nódulos de grafita é a razão da ausência de austenita nessas regiões nos primeiros estágios de austenitização.⁽³⁾

Na etapa de austêmpera, a decomposição de austenita tem seu início com a formação de ferrita bainítica, provocando a rejeição de carbono para a austenita adjacente às agulhas de ferrita bainítica, já que a solubilidade de carbono na ferrita é muito baixa. Esse elemento rejeitado para a austenita ainda não transformada provoca a estabilização da mesma. No decorrer da reação, a difusão de carbono à frente das placas de ferrita torna-se mais difícil e o crescimento das placas de ferrita cessa, resultando em uma matriz austenita-ferrítica, chamada ausferrítica.⁽⁶⁾

A escolha da temperatura de austenitização é dependente da composição química do ferro nodular e das propriedades mecânicas desejadas.⁽⁴⁻⁶⁾ A temperatura de austenitização deve ser escolhida de forma que o componente esteja na zona crítica, campo de fase austenita + ferrita + grafita, e de acordo com a quantidade de ausferrita e ferrita pró-eutetóide que se deseja na microestrutura final, ou seja, de acordo com as propriedades mecânicas desejadas. O tempo de austenitização é adicionalmente afetado pelo teor de elementos de liga do ferro nodular e tamanho da seção.⁽⁵⁾ O silício aumenta as temperaturas crítica superior e inferior, bem como a distância entre elas. Outros elementos, como o alumínio e molibdênio têm efeito similar ao do silício, enquanto o manganês, níquel e cobre diminuem as temperaturas crítica superior e inferior, bem como a distância entre elas.⁽⁷⁾

Alguns autores avaliaram as temperaturas de austenitização levando em consideração somente o efeito do Si, o elemento que mais afeta a zona crítica. Conforme esses autores a zona crítica no sistema estável (campo de coexistência das fases ferrita, austenita e grafita) estaria em torno de 770°C - 825°C para um teor de Si em torno de 2,4%.⁽⁷⁾ Outros autores levaram em consideração o efeito de outros elementos de liga além do Si.⁽⁸⁾

A escolha da temperatura e tempo de austêmpera são dependentes das propriedades finais desejadas. Faixas típicas de temperatura utilizadas são 240°C-400°C.⁽⁵⁾ O tempo à temperatura de austêmpera é dependente da escolha da temperatura bem como do teor de liga, recomenda-se um período de 60 min a

180 min.⁽⁴⁾ Um tempo de austêmpera extremamente longo causaria a decomposição da austenita estabilizada em ferrita e carbonetos, tornando a estrutura frágil.^(5,6)

Como apontado anteriormente, as microestruturas estão relacionadas às propriedades mecânicas, desta forma através do controle dos parâmetros de austenitização e austêmpera é possível controlar a microestrutura e conseqüentemente as propriedades mecânicas.

Para obter uma boa resistência mecânica associada a uma substancial ductilidade a microestrutura deve apresentar no máximo 50% de ausferrita.⁽⁹⁾ Uma microestrutura com 47% de ausferrita exibiu a melhor combinação de propriedades mecânicas quando se requer alta ductilidade. A resistência mecânica desse material é muito maior do que a resistência de classes ferríticas (está no mesmo nível que de classes perlíticas) e está associada com uma ductilidade de quase que quatro vezes maior do que de classes perlíticas. Por outro lado, uma microestrutura com 75% de ausferrita exibiu a melhor combinação de resistência mecânica e ductilidade quando se requer alta resistência mecânica. Esse material apresentou uma resistência mecânica muito maior do que classes perlíticas e uma ductilidade quase maior que duas vezes a ductilidade de classes perlíticas, ou uma ductilidade pouco menor do que de classes ferríticas.⁽¹⁰⁾

Além da resistência mecânica e ductilidade, os materiais austemperados a partir da zona crítica, quando apresentam uma boa distribuição entre as fases ferrita pró-eutetóide e ausferrita, proporcionam boas propriedades de fadiga. Isso ocorre porque o microconstituente ausferrita reforça o material em regiões que atuam como sítios para iniciação de microfissuras, poros e nódulos de grafita.⁽⁹⁾

O trabalho experimental que se segue objetivou estudar o processo de austenitização, identificando os locais de início de austenitização e sua cinética.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

Para execução dos experimentos foi utilizado um ferro fundido nodular de matriz ferrítica, contendo 0,6% Cu - 0,2%Mo - 1,0% Ni, elementos que fornecem a temperabilidade necessária. As amostras foram retiradas da parte útil de blocos Y de 25 mm de espessura (norma NBR 6916)⁽¹¹⁾ e apresentaram dimensões de 20 x 20 x 25 (em mm).

Inicialmente foram realizados tratamentos térmicos de têmpera para avaliação dos parâmetros de austenitização. Para realização dos experimentos foram adotadas temperaturas de austenitização dentro da zona crítica de 770°C e 800°C e tempos de 0,5 h a 8 h em cada uma das duas temperaturas. O tratamento térmico consistiu das seguintes etapas: pré-aquecimento do forno de banho de sal para colocação das amostras, colocação das amostras e austenitização na temperatura e tempo planejados e têmpera em água. A temperatura do forno foi controlada através de termopar tipo K.

Após os tratamentos térmicos de têmpera as amostras foram caracterizadas por microscopia óptica e análise de imagem. Através dessas análises foram baseados os parâmetros de austenitização a serem utilizados nos tratamentos de austêmpera do estudo posterior.

Um esquema dos tratamentos de austêmpera é apresentado na Figura 2, a etapa de austenitização dentro da zona crítica foi realizada a 770°C, 780°C e 790°C por 4 h, a 790°C por 3 h e 800°C por 2 h.

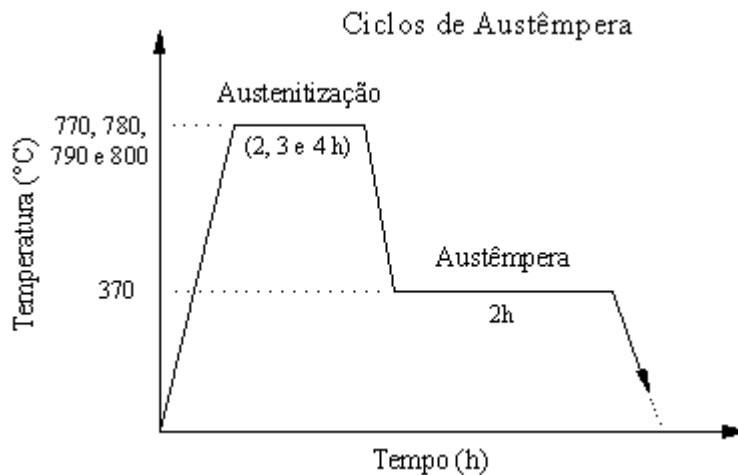


Figura 2 - Esquema dos tratamentos térmicos de austêmpera.

A etapa de austêmpera foi realizada a 370°C por 2h; a temperatura de 370°C foi selecionada para se obter ausferrita superior, uma estrutura mais refinada com melhores propriedades mecânicas; o tempo de 2 h foi selecionado para que o material fosse tratado dentro da janela do processo para essa temperatura, a fim de maximizar as propriedades mecânicas. A etapa de austenitização foi realizada da mesma forma que a austenitização para têmpera: pré-aquecimento do forno de banho de sal para colocação das amostras, colocação das amostras e austenitização na temperatura e tempo planejados. A etapa de austêmpera foi realizada em banho de sal, constituindo-se das seguintes etapas: transporte da amostra do banho de austenitização para o banho de austêmpera, manutenção na temperatura e tempo planejados, retirada da amostra e resfriamento ao ar.

As amostras austemperadas também foram caracterizadas por microscopia óptica e análise quantitativa.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

As principais microestruturas obtidas nos tratamentos térmicos de austenitização dentro da zona crítica seguidos de têmpera são apresentadas na Figura 3.

O aumento do tempo de austenitização dentro da zona crítica promoveu a nucleação da austenita (martensita na temperatura ambiente) em maior quantidade na microestrutura.

A Figura 3 mostra que a 770°C a nucleação de austenita ocorre junto aos contornos de grão ferríticos, nas regiões de contornos de células eutéticas (maiores distâncias entre os nódulos de grafita). Com o aumento do tempo, a austenitização propaga-se para o interior dos grãos de ferrita dessas regiões intercelulares, bem como para os contornos de grãos ferríticos próximos aos nódulos de grafita. A microestrutura

austenitizada a 770°C por 4 h (Figura 3 (d)) apresenta aproximadamente 50% de martensita (medida feita através de análise de imagem) e deve representar uma situação de equilíbrio, visto que não há considerável mudança nas microestruturas com tempos de austenitização superiores a esse.

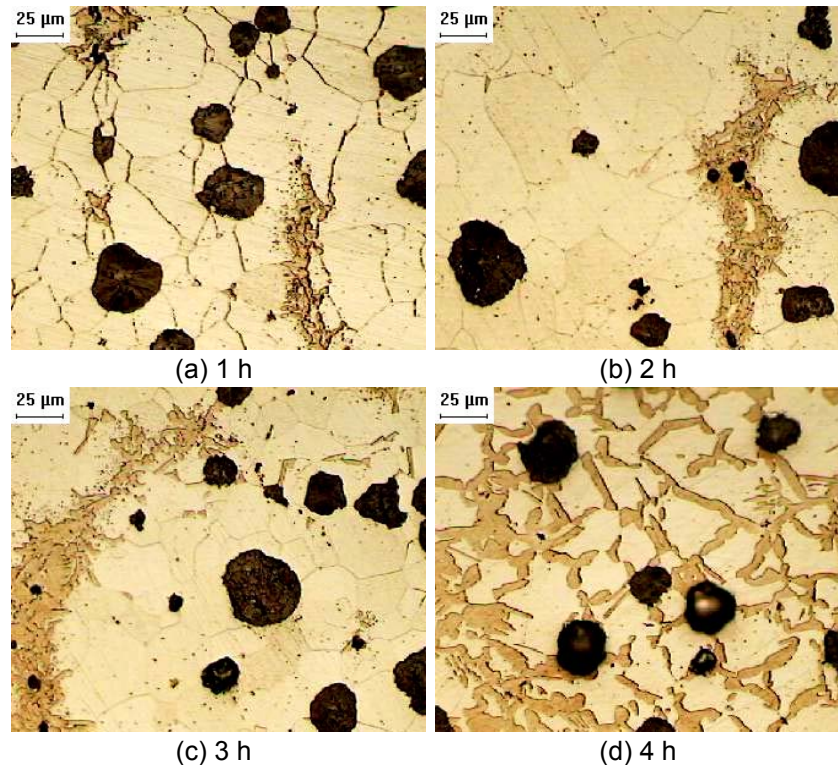


Figura 3 - Micrografias de amostras com microestrutura prévia ferrítica e parcialmente austenitizadas a 770°C por: 1h (a), 2h (b) e 3h (c) e então temperadas em água. Ataque: Nital 2%.

A nucleação preferencial de austenita junto aos contornos de grão ferríticos pode ser atribuída à difusão do carbono preferencialmente pelos contornos de grão, fenômeno que é particularmente importante em baixas temperaturas. Como o processo de austenitização é controlado pela difusão de carbono, as regiões junto aos contornos de grão ferríticos representam então os primeiros locais de transformação da ferrita em austenita.

Por outro lado, a concentração do processo de austenitização a 770°C nos contornos de célula eutética deve estar relacionada à segregação de elementos de liga, em particular do Si (para junto do nódulo de grafita) e do Mn (para o contorno de célula eutética, afastado dos nódulos de grafita) conforme previsto pela literatura.⁽³⁾ O Si aumenta a temperatura de austenitização, enquanto o Mn abaixa essa temperatura. Esses efeitos resultam então em variação da temperatura de austenitização ao longo da microestrutura, como indicado na Figura 4. O tratamento a 770°C resulta desta forma em concentração da austenita formada nos contornos de célula eutética. Na temperatura de austenitização de 800°C, em tempos curtos como 0,5 h, a austenita nucleou por toda a microestrutura, resultando em aproximadamente 60% de martensita na microestrutura final. A temperatura de 800°C provavelmente atinge a temperatura de

formação de austenita das regiões ricas em Si. No entanto, um tratamento que se complete em um tempo maior (como 770°C por 4 h) pode ser mais interessante quando peças de grande porte são tratadas, tendo em vista que há maior tempo para homogeneização da microestrutura da peça.

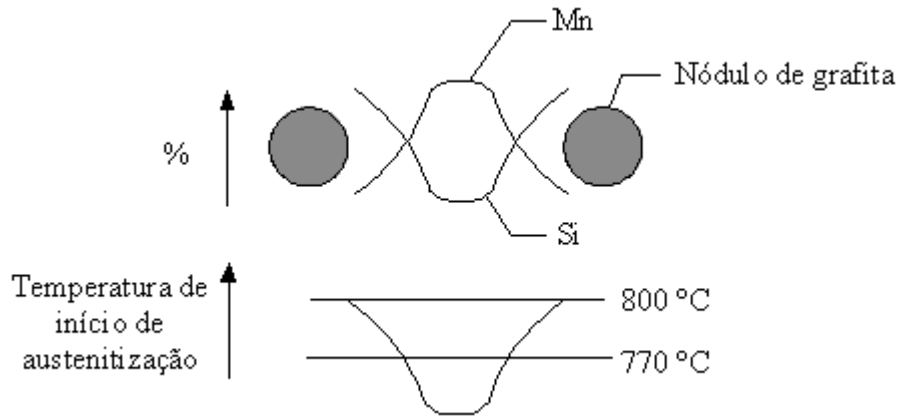


Figura 4 - Representação esquemática dos efeitos de segregação de Si e Mn sobre a temperatura de início de austenitização.

As principais micrografias dos tratamentos de austêmpera a partir da zona crítica são apresentadas na **Figura 5**. Através de microscopia óptica foi observado que a microestrutura composta por ferrita pró-eutetóide e ausferrita é bastante homogênea do centro até a extremidade da amostra austemperada. Da mesma forma que o material temperado, também foi observado que quando o tempo, a temperatura de austenitização ou ambos aumentam a quantidade de ausferrita na microestrutura também aumenta. Resultados de análise de imagem desses materiais são apresentados na Tabela 1.

Os resultados deste estudo de austêmpera a partir da zona crítica mostraram que é possível controlar a microestrutura e conseqüentemente as propriedades mecânicas a partir do controle da temperatura e tempo de austenitização e das condições de austêmpera. As amostras austenitizadas dentro da zona crítica a 790°C por 3 h e 4 h e austemperadas a 370°C por 2 h são constituídas por 49% e 64% de ausferrita respectivamente ou 51% e 34% de ferrita pró-eutetóide respectivamente (Tabela 1). Essas microestruturas devem apresentar um interessante conjunto de propriedades mecânicas.

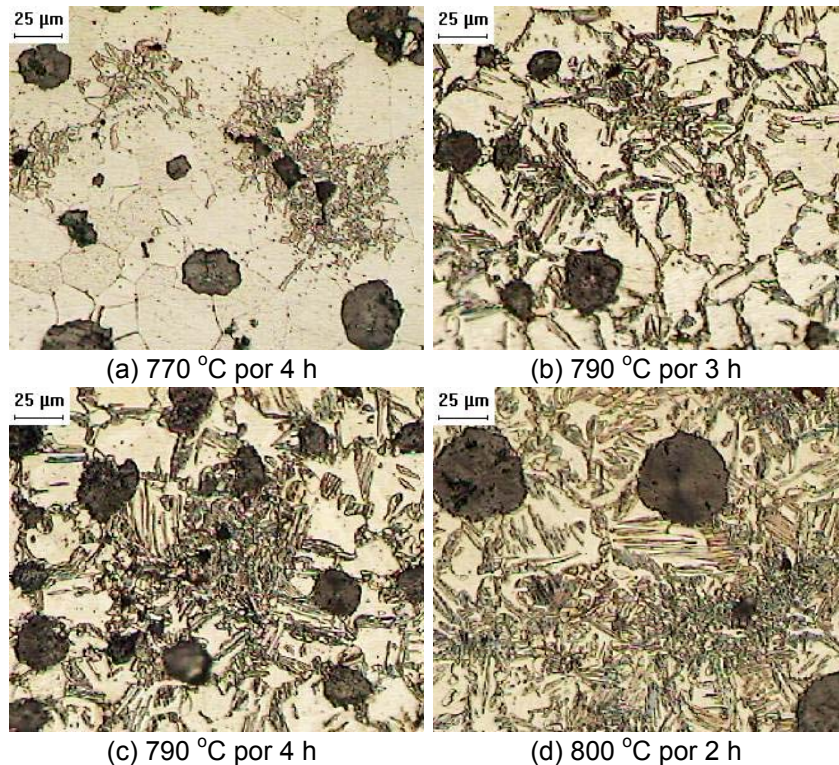


Figura 5 - Amostras previamente ferríticas austenitizadas a diversas condições: (a) 770°C por 4 h, (b) 790°C por 3 h, (c) 790°C por 4 h e (d) 800°C por 2 h; e austemperadas a 370°C por 2 h. Ataque: Nital 2%.

Tabela 1 - Análise quantitativa de amostras inicialmente ferríticas austenitizadas a diversas temperaturas e tempos e austemperadas a 370°C por 2h.

Amostra	Matriz (% de Ferrita)
770°C por 4h	95
780°C por 4h	59
790°C por 3h	51
790°C por 4h	36
800°C por 2h	6

A microestrutura com 49% de ausferrita deve associar altos valores de ductilidade, similares àqueles de classes ferríticas, associados a uma resistência mecânica próxima a de classes perlíticas; enquanto a microestrutura com 64% de ausferrita deve apresentar uma ductilidade pouco menor do que a de classes ferríticas e uma resistência mecânica superior a de classes perlíticas.

Outra característica importante destes materiais austemperados a partir da zona crítica é a boa distribuição entre as fases ferrita pró-eutetóide e ausferrita, mesmo próxima aos contornos de célula (zonas de última solidificação) e nódulo de grafita, o que deve conferir boas propriedades de fadiga, já que poros e nódulos de grafita atuam como sítios para iniciação de microfissuras conforme literatura.⁽⁹⁾

4 CONCLUSÃO

- Na temperatura da zona crítica de 770°C, a austenitização inicia-se junto aos contornos de grão ferríticos, em regiões de contornos de células eutéticas.
- Com o aumento do tempo, a austenitização propaga-se para o interior dos grãos ferríticos, bem como para os contornos de grão ferríticos juntos aos nódulos de grafita.
- É possível controlar a microestrutura e conseqüentemente as propriedades mecânicas a partir do controle da temperatura e tempo de austenitização e austêmpera.
- As amostras austenitizadas dentro da zona crítica a 790°C por 3 h e 4 h e austemperadas a 370°C por 2 h são constituídas por 49 e 64% de ausferrita respectivamente, conseqüentemente essas microestruturas devem apresentar um interessante conjunto de propriedades mecânicas.
- Os materiais austemperados a partir da zona crítica deste estudo apresentam uma boa distribuição entre as fases ferrita pró-eutetóide e ausferrita, mesmo próxima aos contornos de célula (zonas de última solidificação) e nódulo de grafita.

Agradecimentos

À CAPES e à UDESC pela oportunidade de realização deste estudo.

À Fundição Tupy, pelo fornecimento de amostras para a realização deste estudo.

REFERÊNCIAS

- 1 DRUSCHITZ, A. P.; FITZGERALD, D. C. Madi: Introducing a new, machinable, austempered ductile iron. In: SAE WORLD CONGRESS, 2003, Detroit. **Artigo**...Warrendale: SAE International, 2003. Não paginado.
- 2 ROUSIÈRE, D.; ARANZABAL, J. Development of mixed (ferrito-ausferritic) structures for spheroidal graphite irons. **Metallurgical Science and Technology**, [S.l.], v. 18, p. 24-29, 2000.
- 3 ERDOGAN, M.; KILICLI, V.; DEMIR, B. Transformation characteristics of ductile iron austempered from intercritical austenitizing temperature ranges. **Journal of Materials Science**, publicado online, DOI 10.1007/s10853-006-1415-7, 2006.
- 4 DRUSCHITZ, A. P.; FITZGERALD, D. C. Internet Corporation. **Machinable austempered cast iron article having improved machinability, fatigue performance, and resistance to environmental cracking and a method of making the same**. 7,070,666, 04 Júlio 2006. Patente.
- 5 HAYRYNEN, K. L. The production of austempered ductile iron (ADI). In: WORLD CONFERENCE ON ADI, 2002, Louisville. **Artigo**...Illinois: American Foundry Society, 2002. p. 1-6.
- 6 TRUDEL, A.; GAGNÉ, M. Effect of composition and heat treatment parameters on the characteristics of austempered ductile irons. **Canadian Metallurgical Quarterly**, Britain, v. 36, n. 5, p. 289-298, 1997.
- 7 GUESSER, W. L.; TSCHIPSCHIN, André P. Decomposição da Austenita. 1992. Trabalho não publicado - Escola Politécnica da USP, São Paulo, 1992.
- 8 GERVAL, V.; LACAZE, J. Critical temperature range in spheroidal graphite cast irons. **ISIJ International**, [S.l.], vol 40, p. 386-392, 2000.

- 9 VERDU, C.; ADRIEN, J.; REYNAUD, A. Contribution of dual phase (a,G,b) heat treatment to the fatigue properties of SG cast irons. **Giessereiforschung**, [S.l.], v. 57, n. 4, p. 34-41, 2005.
- 10 KILICLI, V.; ERDOGAN, M. Tensile properties of partially austenitized and austempered ductile irons with dual matrix structures. **Materials Science and Technology**, [S.l.], v. 22, n. 8, p. 919-928, 2006.
- 11 ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6916: Ferro fundido nodular ou ferro fundido com grafita esferoidal. 1981.