

# OTIMIZAÇÃO DOS PARÂMETROS DE AUSTENITIZAÇÃO DE UM FERRO NODULAR AUSTEMPERADO A PARTIR DA ZONA CRÍTICA

Eliana Franco <sup>1</sup>  
 César Edil da Costa <sup>2</sup>  
 Joânesson Stahlschmidt <sup>3</sup>  
 Wilson Luiz Guessser <sup>4</sup>

## 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 do 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 constituída por 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 a 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 h e 4 h levaram a uma microestrutura final que deve apresentar um interessante conjunto de propriedades mecânicas.

**Palavras-chave:** Ferro nodular austemperado; Austêmpera; Ferrita; Ausferrita.

## OPTIMIZATION OF AUSTENITIZING PARAMETERS OF A DUCTILE IRON AUSTEMPERED FROM THE CRITICAL ZONE

## Abstract

The austempered ductile cast iron from the critical zone, named NAZC in this work, has been presented as an emerging material due to its interesting range of mechanical properties. The main objective of this study is to evaluate the austenitizing parameters for NAZC manufacturing. 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 microstructure consisting of ausferrite and proeutectoid ferrite. From the analysis of quenching results, austempering treatments were performed and then the parameters that lead to certain microstructure were observed. In both treatments, the specimens were characterized by optical microscopy and image analysis. Austempering treatments performed at a temperature of 790°C and intervals of 3 h and 4 h led to a final microstructure which should present an interesting set of mechanical properties.

**Key words:** Austempered ductile iron; Austempering; Ferrite; Ausferrite.

<sup>1</sup>Aluna de mestrado da Universidade do Estado de Santa Catarina – UDESC. Rua Jacutinga, 74, Iriirú, Cep 89227-365, Joinville, SC, Brasil. E-mail: eliana\_franco@globocom

<sup>2</sup>Professor da Universidade do Estado de Santa Catarina – UDESC, Doutor em Engenharia Mecânica. Rua Jacarepaguá, 31, Bom Retiro, Cep 89223-040, Joinville, SC, Brasil. E-mail: edil@joinville.udesc.br

<sup>3</sup>Acadêmico do Curso de Engenharia Mecânica da Universidade do Estado de Santa Catarina – UDESC. Rua Arnaldo Moreira Douat, 150, apto 503º, Floresta, Cep 89211-000, Joinville SC, Brasil. E-mail: joanesson@ibest.com.br

<sup>4</sup>Professor da Universidade do Estado de Santa Catarina – UDESC, Gerente de Engenharia Metalúrgica da Tupy S/A, Doutor em Engenharia Metalúrgica. Rua Albano Schmidt, 3400, Boa Vista, Cep 89227-901, Joinville, SC, Brasil. E-mail: wguessser@tupy.com.br

## I INTRODUÇÃO

O Nodular Austemperado a partir da Zona Crítica, NAZC, 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.<sup>(1,2)</sup> A microestrutura desse material apresenta uma matriz constituída por ferrita pró-eutetóide ou equiaxial e ausferrita, além dos nódulos de grafita. A ausferrita é um constituinte, composto por pelo menos duas fases: ferrita bainítica e austenita de alto carbono (ferrita bainítica pode conter carbeto), a austenita de alto carbono também é chamada de austenita retida, estável ou austenita não transformada.<sup>(3)</sup>

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).<sup>(2)</sup> 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 do NAZC tornam esse material aplicável na indústria automotiva em componentes do chassi e da suspensão, devido à excelente ductilidade; em virabrequins, para aplicações que requerem alta resistência mecânica; e em componentes submetidos à fadiga.<sup>(4)</sup>

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.

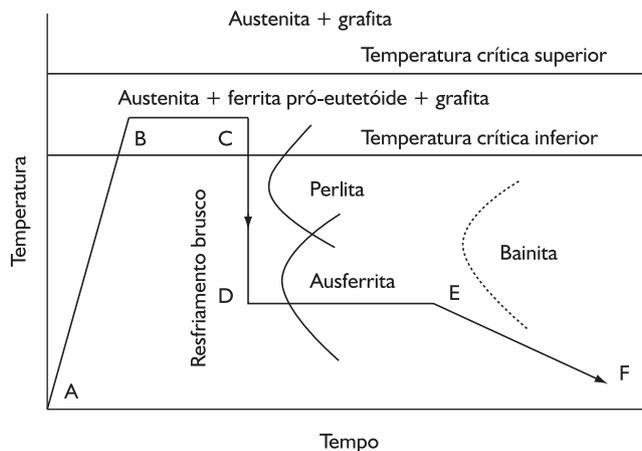


Figura 1. Esquema do tratamento térmico para obtenção de NAZC.<sup>(5)</sup>

Na etapa de austenitização (B-C) 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. A quantidade de carbono dissolvido na austenita é determinada pelo tempo e pela temperatura de austenitização,<sup>(5)</sup> no limite para tempos muito longos, a quantidade de carbono é determinada pelo diagrama de equilíbrio.

Os contornos de células eutética são regiões com maior potencial para a nucleação da austenita devido à concentração de Mn nessas regiões, uma vez que esse elemento diminui a temperatura de austenitização. O Si, assim como o Mn, é outro elemento importante para o NAZC, esse elemento aumenta a temperatura de austenitização. A segregação do Si próxima aos nódulos de grafita é a razão da ausência de austenita nessas regiões nos primeiros estágios de austenitização.<sup>(3)</sup>

Na etapa de austêmpera (D-E) a decomposição da austenita tem seu início com a formação de ferrita bainítica. A formação dessa fase provoca a rejeição de carbono para a austenita adjacente às agulhas de ferrita bainítica, já que a solubilidade de carbono na ferrita é muito baixa. Desta forma, a austenita é enriquecida por carbono, o que resulta na 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.<sup>(6)</sup>

A escolha da temperatura de austenitização é dependente da composição química do ferro nodular e das propriedades mecânicas desejadas.<sup>(4-6)</sup> A temperatura de austenitização deve ser escolhida de forma que o componente esteja na zona crítica (campo de coexistência das fases ferrita, austenita e 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.<sup>(5)</sup> O silício aumenta as temperaturas críticas 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 críticas superior e inferior, bem como a distância entre elas.<sup>(6)</sup>

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 a 825°C para um teor de Si de aproximadamente 2,4%.<sup>(6)</sup> Outros autores levaram em consideração o efeito de outros elementos de liga além do Si.<sup>(7)</sup>

(\*) GUESSE, W. L. *Decomposição da austenita*. São Paulo: Escola Politécnica da USP, 1992. [Trabalho não publicado].

A escolha da temperatura e tempo de austêmpera é dependente das propriedades finais desejadas. Faixas típicas de temperatura utilizadas são 240°C a 400°C.<sup>(5)</sup> 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.<sup>(4)</sup> Um tempo de austêmpera extremamente longo causaria a decomposição da austenita estabilizada em ferrita e carbonetos, resultando em uma estrutura frágil.<sup>(5,6)</sup>

Segundo alguns autores,<sup>(8,9)</sup> para obter uma boa resistência mecânica associada a uma substancial ductilidade a microestrutura deve apresentar no máximo 50% de ausferrita. 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.<sup>(8)</sup>

O trabalho experimental que segue objetivou estudar o processo de austenitização. Bem como, visou a obtenção de matrizes com 40% a 60% de ausferrita e a identificação dos locais de início da austenitização.

## 2 MATERIAL 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)<sup>(10)</sup> e apresentaram dimensões de 20 x 20 x 25 (em mm).

Inicialmente foram realizados tratamentos térmicos para avaliação dos parâmetros de austenitização, com resfriamento posterior em água. Para realização dos experimentos foram adotadas temperaturas de austenitização dentro da zona crítica de 770°C e tempos de 0,5 h a 8 h. O tratamento térmico consistiu das seguintes etapas: pré-aquecimento do forno de banho de sal para colocação das amostras, colocação das amostras, austenitização na temperatura e tempo planejados e resfriamento em água. A temperatura do forno foi controlada através de termopar tipo K. Após os tratamentos térmicos as amostras foram caracterizadas por microscopia óptica e análise quantitativa de imagem. Análises quantitativa de imagem foram realizadas através do analisador de imagens Image ProPlus TM versão 4.1.0.0. Em média foram analisados oito campos por amostra para quantificação e a fase medida foi ferrita total. Através dessas análises foram definidos 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. A etapa de austêmpera foi realizada a 370°C por 2 h; 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,

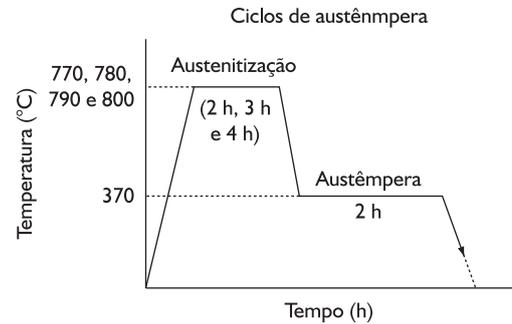


Figura 2. Esquema dos tratamentos térmicos de austêmpera.

a fim de maximizar as propriedades mecânicas. A etapa de austenitização foi realizada da mesma forma que o primeiro estudo: 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 resfriamento em água são apresentadas na Figura 3.

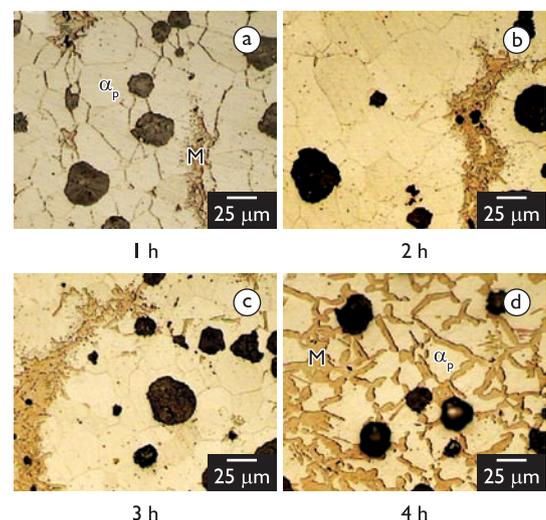
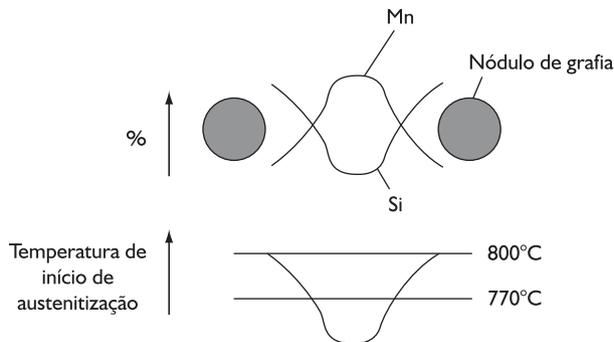


Figura 3. Micrografias de amostras com microestrutura prévia ferrítica, parcialmente austenitizadas a 770°C por: 1 h (a), 2 h (b), 3 h (c) e 4 h (d) e então resfriadas em água. Ataque: Nital 2%.  $\alpha_p$ : Ferrita pró-eutetóide; M: Martensita.

O aumento do tempo de austenitização dentro da zona crítica promoveu a formação da austenita (martensita na temperatura ambiente) em maior quantidade na microestrutura. A Figura 3 mostra que à 770°C a nucleação de austenita ocorre junto aos contornos de grão ferrítico, 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 ferrítico próximos aos nódulos de grafita.

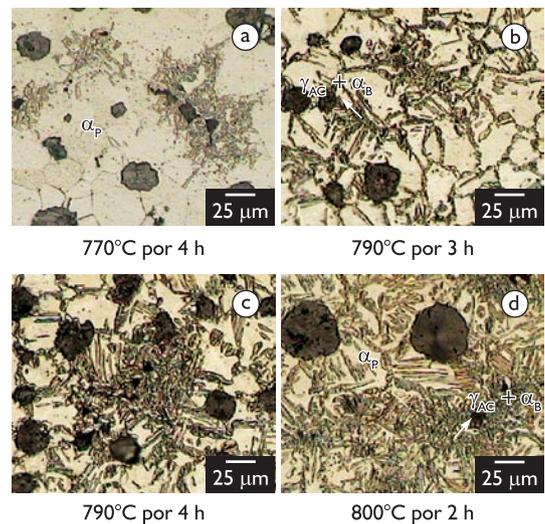
A nucleação preferencial de austenita junto aos contornos de grão ferrítico pode ser atribuída à difusão do carbono preferencialmente por esses contornos de grão, fenômeno que é particularmente importante a baixas temperaturas. Como o processo de austenitização é controlado pela difusão de carbono, as regiões junto aos contornos de grão ferrítico 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.<sup>(3)</sup> O Si aumenta a temperatura de austenitização, enquanto o Mn abaixa essa temperatura. Esses efeitos resultam em variação da temperatura de austenitização ao longo da microestrutura, como indicado na Figura 4. A região próxima ao nódulo de grafita apresenta maior concentração de Si, como esse elemento aumenta a temperatura de austenitização, essa região só é austenitizada a temperaturas maiores. Já o Mn se concentra no contorno de célula eutética, como esse elemento diminui a temperatura de austenitização, o contorno de célula é a região da amostra em que a austenitização se inicia. O tratamento a 770°C resulta desta forma em concentração da austenita formada nos contornos de célula eutética.



**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. Resultados de análise de imagem desses materiais são apresentados na Tabela I. Essa tabela apresenta a porcentagem de ferrita total da matriz. No entanto nesse trabalho essa medida foi considerada como a porcentagem de ferrita pró-eutetóide, já



**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%.  $\alpha_p$ : Ferrita Pró-eutetóide;  $\gamma_{AC} + \alpha_B$ : Austenita de alto carbono + Ferrita bainítica.

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

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

que o analisador de imagem identificou pontos de ferrita muito pequenos dentro do constituinte ausferrita comparados às regiões de ferrita pró-eutetóide.

Os resultados desse estudo de austêmpera mostraram que é possível controlar a microestrutura a partir do controle da temperatura e tempo de austenitização e austêmpera. As amostras austenitizadas a 790°C por 3 h e 4 h e austemperadas a 370°C por 2 h foram constituídas por 51% e 34% de ferrita pró-eutetóide respectivamente (Tabela I), conseqüentemente estima-se que essas microestruturas devam apresentar um interessante conjunto de propriedades mecânicas.

Outra característica importante desses materiais austemperados a partir da zona crítica é a boa distribuição entre as fases ferrita pró-eutetóide e ausferrita (Figura 5b a 5d), ou seja, ausferrita está presente em meio a ferrita pró-eutetóide mesmo próxima aos contornos de célula (zonas de última solidificação) e nódulos 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.<sup>(8)</sup>

## 4 CONCLUSÃO

Na temperatura da zona crítica de 770°C, a austenitização iniciou-se junto aos contornos de grão ferrítico, em regiões de contornos de célula eutética.

Com o aumento do tempo, a austenitização propagou-se para o interior dos grãos ferrítico, bem como para os contornos de grão ferrítico juntos aos nódulos de grafita.

As amostras austenitizadas dentro da zona crítica a 790°C por 3 h e 4 h e austemperadas a 370°C por 2 h foram 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 apresentaram uma boa distribuição entre as fases ferrita pró-eutetóide e ausferrita, mesmo próxima aos contornos de célula (zonas de última solidificação) e nódulos de grafita.

## Agradecimentos

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

À Fundação 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. Warrendale: SAE International, 2003.
- 2 ROUSIÈRE, D.; ARANZABAL, J. Development of mixed (ferrito-ausferritic) structures for spheroidal graphite irons. *Metallurgical Science and Technology*, v. 18, n. 1, p. 24-9, 2000.
- 3 ERDOGAN, M.; KILICLI, V.; DEMIR, B. Transformation characteristics of ductile iron austempered from intercritical austenitizing temperature ranges. *Journal of Materials Science*, v. 44, n. 5, p. 1394-403, Mar. 2009.
- 4 DRUSCHITZ, A. P.; FITZGERALD, D. C. *Machinable austempered cast iron article having improved machinability, fatigue performance, and resistance to environmental cracking and a method of making the same*. US Patent 70706664, July 2006.
- 5 HAYRYNEN, K. L. The production of austempered ductile iron (ADI). In: WORLD CONFERENCE ON ADI, 2002, Louisville. 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*, v. 36, n. 5, p. 289-98, Dec. 1997.
- 7 GERVAL, V.; LACAZE, J. Critical temperature range in spheroidal graphite cast irons. *ISIJ International*, v. 40, p. 386-92, 2000.
- 8 VERDU, C.; ADRIEN, J.; REYNAUD, A. Contribution of dual phase ( $\alpha, \text{G}, \beta$ ) heat treatment to the fatigue properties of SG cast irons. *Giessereiforschung*, v. 57, n. 4, p. 34-41. 2005.
- 9 KILICLI, V.; ERDOGAN, M. Tensile properties of partially austenitized and austempered ductile irons with dual matrix structures. *Materials Science and Technology*, v. 22, n. 8, p. 919-28, 2006.
- 10 ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 6916: Ferro fundido nodular ou ferro fundido com grafita esferoidal*. Rio de Janeiro, 1981.

Recebido em: 28/11/2009

Aceito em: 15/03/2010