

CINÉTICA DE AUSTENITIZAÇÃO INTERCRÍTICA DE UM FERRO NODULAR LIGADO¹

Clarissa Lussoli Lopes²
Pedro Amedeo Nannetti Bernardini³
Wilson Luiz Guesser⁴

Resumo

A classe 750-500-11 da norma ASTM A897-2006 dos ferros nodulares austemperados envolve austenitização a partir da zona crítica. A literatura apresenta valores bastante dispersos quanto ao tempo de austenitização na zona crítica, havendo relatos desde 20 minutos até 5 horas de manutenção no patamar. O presente trabalho visa o estudo da cinética de austenitização intercrítica de um ferro fundido nodular ligado com Cu, Ni, Mn e Mo com matrizes inicialmente ferríticas e perlíticas. Amostras foram austenitizadas a 795°C por 2; 4; 6, 8 e 12h em forno convencional seguidas de têmpera em água a temperatura ambiente. Análises de microdureza da martensita (antiga austenita) indicaram que para amostras inicialmente ferríticas nesta temperatura de austenitização intercrítica o sistema alcança o equilíbrio após 8h de tratamento. As microestruturas apresentaram homogeneidade e aproximadamente 60% de martensita, quando em equilíbrio, indicando que o material encontrava-se dentro da zona crítica.

Palavras-chave: Zona crítica; ADI dual; Austenitização intercrítica.

THE KINETICS OF INTERCRITICAL AUSTENITIZING IN AN ALLOYED DUCTILE IRON

Abstract

The grade 750-500-11 of the standard ASTM A897-2006 about austempered ductile iron involves isothermal treatment in intercritical range. The literature is very scattered about the intercritical austenitizing time, with reports from 20 minutes to 5 hours. This work aims to study the kinetics of intercritical austenitizing a ductile iron alloyed with Cu, Ni, Mn and Mo ferritic and pearlitic matrices initially. Samples were austenitized at 795°C for 2; 4; 6, 8 and 12 hours in a conventional furnace followed by quenching in water at room temperature. Microhardness analysis of martensite (old austenite) showed that for this samples initially ferritic austenitized at 795°C the system reaches equilibrium after 8 hours of treatment. The samples showed homogeneity and large amounts of martensite (around 60%), in equilibrium, it means that the material was in the intercritical range.

Keywords: Intercritical range; ADI dual; Intercritical austenitizing.

¹ Contribuição técnica ao 68º Congresso Anual da ABM - Internacional, 30 de julho a 2 de agosto de 2013, Belo Horizonte, MG, Brasil.

² Aluna do curso de doutorado em Eng. de materiais. Universidade Federal de Santa Catarina – UFSC. Florianópolis, SC, Brasil.

³ Engenheiro metalúrgico. Dr. Professor do curso de Engenharia Mecânica. UFSC. Florianópolis, SC, Brasil.

⁴ Engenheiro metalúrgico. Dr. Professor do curso de Engenharia Mecânica. UDESC. Engenheiro da Tupy Fundições, Joinville, SC, Brasil.

1 INTRODUÇÃO

O ferro fundido nodular é hoje um importante material de engenharia e tem merecido contínuos desenvolvimentos, desde a sua descoberta em 1948. Melhorias nas tecnologias de fundição e novas derivações deste material vêm contribuindo para este progresso. O ferro fundido ADI possui elevadas propriedades de resistência, comparáveis aos aços forjados, devido à matriz ausferrítica. Todavia o ADI possui baixa usinabilidade, o que levou ao desenvolvimento do ADI dual (inicialmente denominado de MADI) (Figura 1).

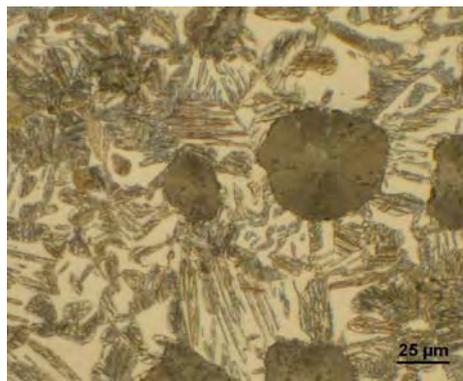


Figura 1: Microestrutura de ADI dual.⁽¹⁾

O ADI possui norma técnica que apresenta distintas classes, com distintos valores de resistência e a literatura documenta quais as temperaturas de austêmpera se deve usar para obter uma determinada classe (uma determinada resistência). Quanto ao ADI dual, este já possui norma técnica (ASTM A897M/2006), que contém uma única classe (750-500-11), o que indica que o material já é consolidado no mercado.

O presente trabalho enfoca no tempo de austenitização para a produção do ADI dual, cujo tratamento térmico consiste na austenitização em temperatura dentro da zona crítica, a qual é criada devido à presença de Si em ferros fundidos. Na zona crítica encontram-se três fases simultaneamente, ferrita, austenita e grafita.

Entretanto, dentre a literatura pesquisada sobre ADI dual, constata-se que dados relativos à influência do tempo de austenitização na zona crítica são escassos, havendo grande divergência na literatura (desde 20 minutos até 7 horas de patamar).

Portanto, este trabalho tem por objetivo estudar a influência da microestrutura ferrítica e perlítica de um ferro fundido nodular na cinética de austenitização dentro da zona crítica.

A literatura mostra que o tempo necessário para que o sistema alcance o equilíbrio na austenitização na zona crítica varia com a temperatura de austenitização e com a microestrutura inicial,⁽²⁻⁴⁾ embora esta seja controversa e escassa quanto aos valores.

A Figura 2 apresenta resultados de amostras com matrizes inicialmente ferríticas e revela que há autores trabalhando na zona crítica fora do equilíbrio. Observa-se que quanto o material é mantido por mais tempo (5 horas) em temperaturas na zona crítica, este apresenta menos ferrita (portanto, maiores são as transformações para austenita) que materiais mantidos tempos inferiores.

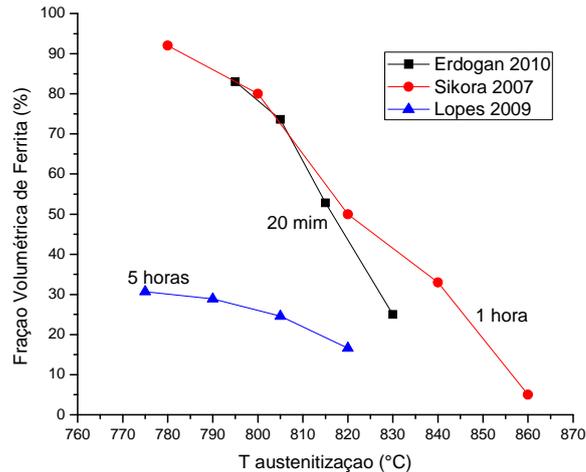


Figura 2: Percentual de ferrita obtida em diferentes temperaturas para diferentes tempos de austenitização. Amostras com matriz inicialmente ferrítica.⁽²⁻⁴⁾

Dentre todos os textos relativos à austenitização na zona crítica, apenas três autores^(1,2,5) utilizaram tempos de patamar acima de 4 horas.

A microestrutura inicial também influencia na cinética de austenitização na zona crítica. Matriz inicialmente perlítica apresenta transformação na zona crítica de modo mais rápido que matriz ferrítica (Figura 3).

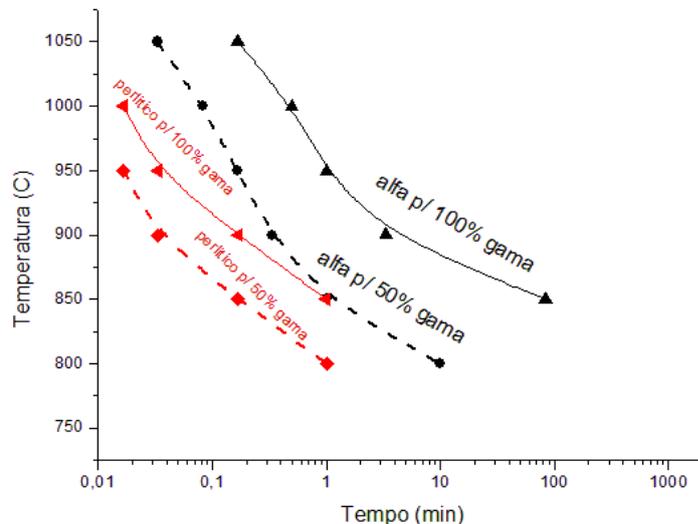


Figura 3: Relação da fração volumétrica de austenita x temperatura de austenitização para diferentes tempos.⁽⁶⁾

No entanto, a medida da fração volumétrica de austenita e ferrita para o estudo da cinética de austenitização na zona crítica não garante que tenha sido atingido o equilíbrio (estabilização da quantidade de fases e saturação de carbono na austenita).

Uma maneira mais eficaz para o estudo da cinética de austenitização é a medida da dureza da martensita, isto pode ser observado na Figura 4.

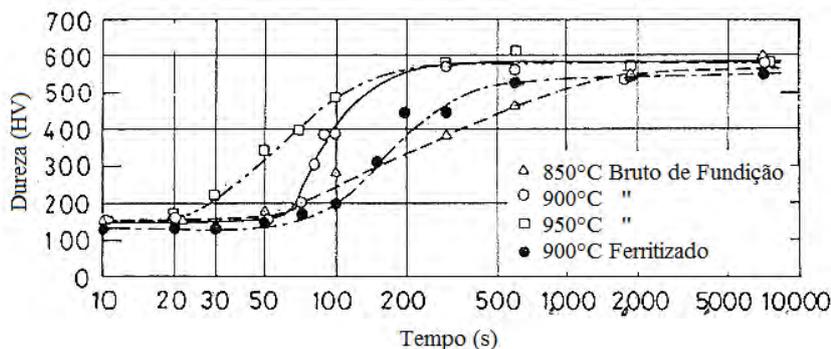


Figura 3: Efeito do tempo de austenitização e da microestrutura inicial na microdureza da martensita.⁽⁷⁾

A evolução de dureza, (que reflete o teor de carbono na austenita) varia consideravelmente dependendo da temperatura de austenitização e da microestrutura inicial. A 900°C observa-se que a matriz inicialmente perlítica (bruto de fundição) apresenta total transformação para tempos mais curtos do que a matriz inicialmente ferrítica sob mesma temperatura de transformação (900°C).

2 MATERIAL E MÉTODOS

Foi utilizado ferro fundido nodular com a composição química apresentada na Tabela 1. Na mesma tabela apresentam-se os valores das temperaturas críticas limites superior e inferior, segundo equação de Hummer e Westerholt.⁽⁸⁾

Tabela 1: Composição química do material utilizado

Elemento	Mn	Mo	Ni	Cu	Si	T _{sup}	T _{inf}
Porcentagem (%)	0,2	0,14	0,92	0,56	2,71	841°C	775°C

As amostras (ferríticas e perlíticas) foram austenitizadas em forno convencional a 795°C por 2, 4, 6, 8 e 12h e então, encaminhadas para têmpera em água a temperatura ambiente. A caracterização das amostras procedeu-se conforme Tabela 2.

Tabela 2: Parâmetros e técnicas de caracterização

VARIÁVEIS DE SAÍDA	
Parâmetro a ser medido	Técnica experimental
Fração volumétrica de ferrita	Microscopia ótica (*) + Software de análise de imagem IMAGO
Microdureza (martensita)	Microdurômetro (HV) (**)
Distribuição e localização da martensita na matriz (contorno de célula eutética, contorno de grafita).	Microscopia ótica

(*) As amostras foram preparadas com procedimento convencional de metalografia (lixadas com lixas d'água 120, 320, 600 e 800 mesh, polidas com pasta de diamante, seguindo para ataque químico de Nital 2%); (**) Carga de 10, 25 ou 50g tempo de indentação de 10s.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Figura 4 mostra a sequência de microestruturas obtidas do tratamento isotérmico de austenitização a 795°C (dentro da zona crítica) mantidas de 2 à 6h, para amostras inicialmente ferríticas (FT795). No tratamento de 2h foi possível observar que ocorreu pouca transformação de ferrita para austenita (martensita em temperatura ambiente). Somente nas microestruturas mantidas na zona crítica por mais de 4 e 6h é possível notar detalhes da transformação. As transformações iniciam nos contornos de células eutéticas e com maiores tempos passam a propagarem para os contornos e interiores dos grãos e próximo aos nódulos.

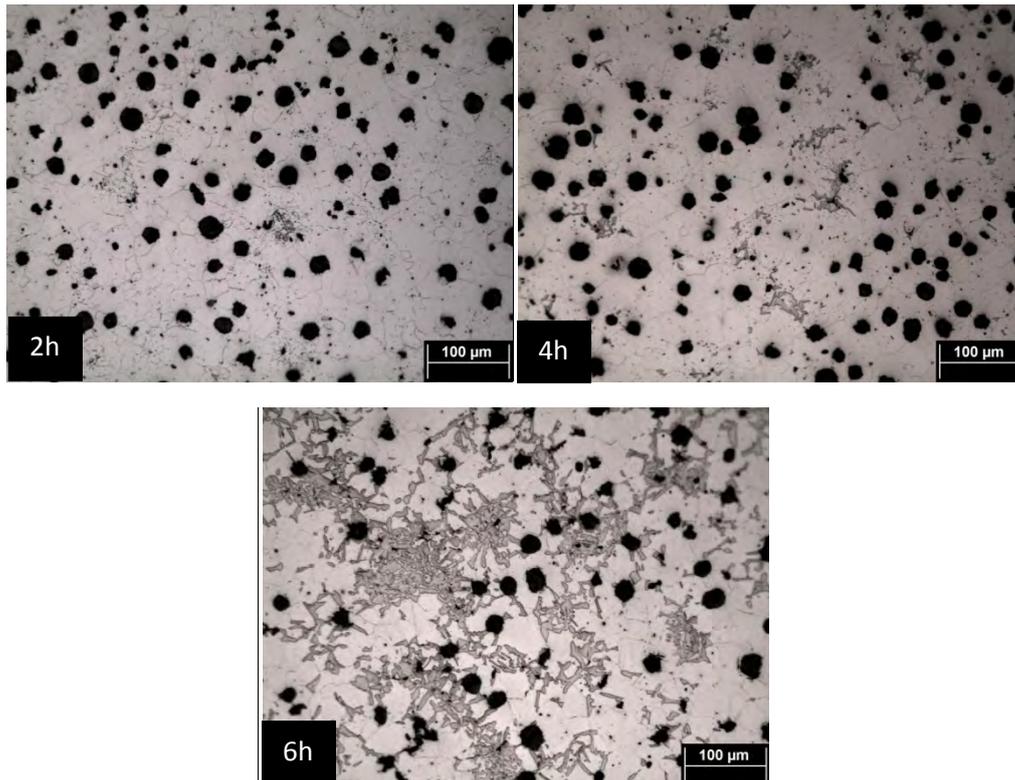


Figura 4: Microestruturas obtidas do tratamento isotérmico na zona crítica a 795°C por 2, 4 e 6h seguidas por têmpera em água. Amostras inicialmente ferríticas.

Em ferros fundidos ocorrem muita segregação de elementos de ligas, logo, as regiões de contornos de células eutéticas concentram maiores teores de Mn e Mo, que diminuem a temperatura eutetóide. Enquanto que regiões próximas dos nódulos concentram Si e Cu que possuem efeitos contrários aos do Mn e Mo.

Para as amostras mantidas por 8 e 12h (Figura 5), fica fácil notar como as transformações estão também presentes nos contornos de grãos. Este fenômeno ocorre devido à difusão de carbono (fator controlador da austenitização) ocorrer preferencialmente por estes locais.

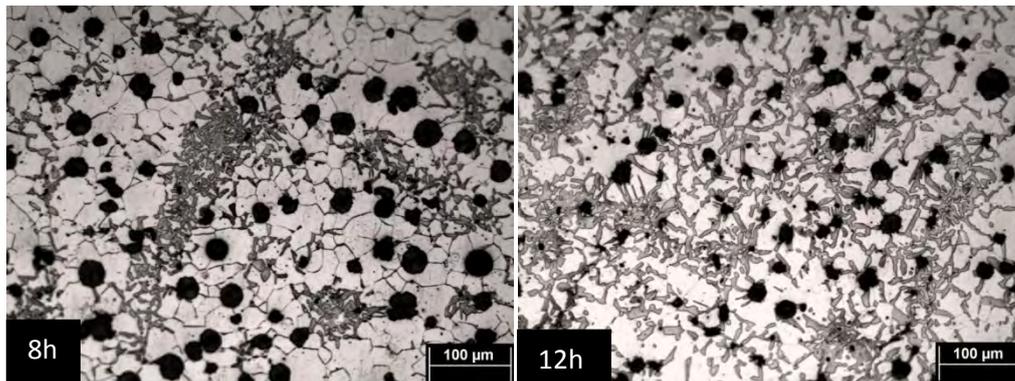
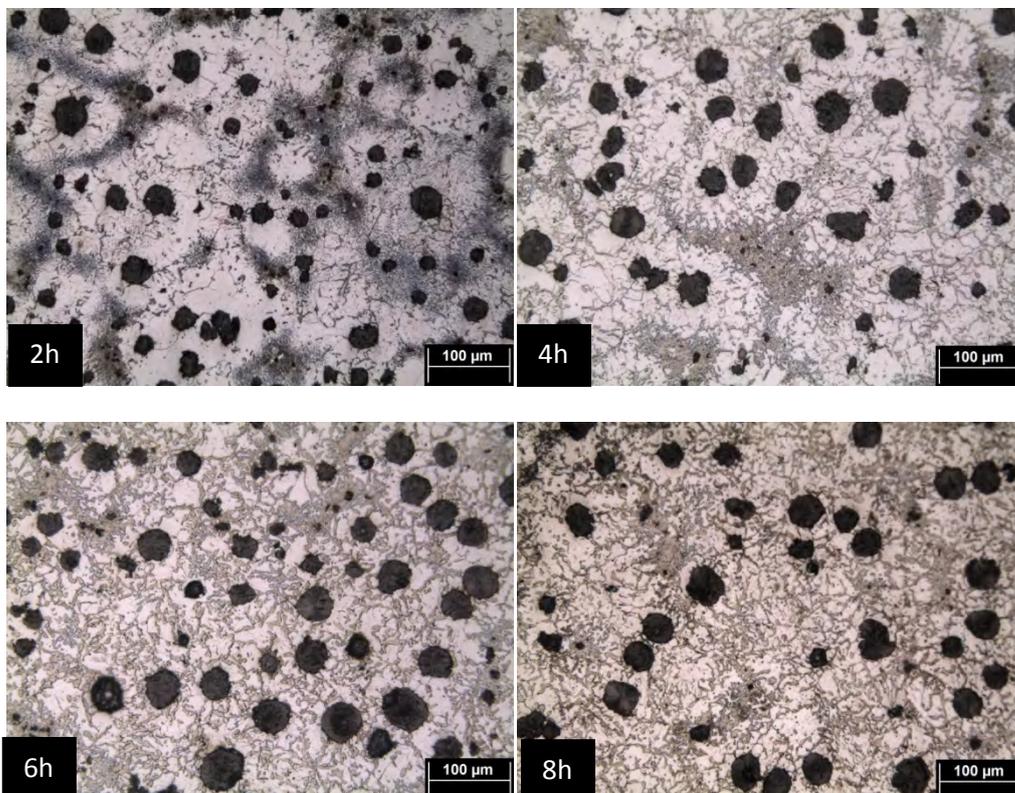


Figura 5: Microestruturas obtidas do tratamento isotérmico na zona crítica a 795°C por 2, 4 e 6h seguidas por têmpera em água. Amostras inicialmente ferríticas.

A figura 6 ilustra outra sequência de microestruturas obtidas do tratamento isotérmico de austenitização na zona crítica a 795°C, mantidas de 2 à 12h, porém, agora para amostras inicialmente perlíticas (PT795).

Nota-se que a amostra mantida por 2h na zona crítica apresentou pouca martensita (antiga austenita), porém, em maiores quantidades em relação às amostras inicialmente ferríticas (Figura 4). Diferente das amostras FT795, as amostras PT795 apresentaram martensita nos contornos de grãos já nas 2 primeiras horas de tratamento. Enquanto que os carbonetos (provenientes da cementita) se concentraram nos contornos de células eutéticas. Já as amostras mantidas na zona crítica por 4h apresentaram martensita tanto em contornos de células quanto em contornos de grãos. Enquanto que as amostras seguintes (6, 8 e 12h) a distribuição da martensita foi bem uniforme.



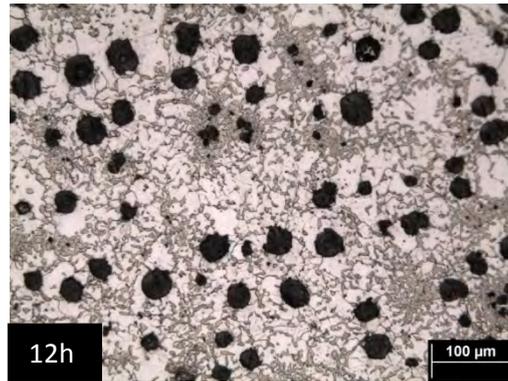


Figura 6: Microestruturas obtidas do tratamento isotérmico na zona crítica a 795°C por 2, 6, 8 e 12h seguidas por têmpera em água. Amostras inicialmente perlíticas.

Como se podem notar entre as Figuras 4, 5 e 6, as amostras inicialmente perlíticas apresentaram maiores transformações em menores tempos de tratamento isotérmico na zona crítica, em relação às amostras inicialmente ferríticas. Este fato pode ser atribuído às menores distâncias de difusão do carbono em matrizes perlíticas comparada com matrizes ferríticas. Matriz perlítica apresenta distâncias de difusão entre lamelas de cementitas, enquanto matriz ferrítica apresenta distâncias de difusão entre dois nódulos de grafita.

Apesar das amostras inicialmente perlíticas apresentarem maior velocidade de transformação, estas não dissolveram por completo os carbonetos provenientes da cementita da pelita. Mesmo após 12h de tratamento isotérmico na zona crítica ainda é possível observar estes carbonetos não dissolvidos, conforme Figura 7.

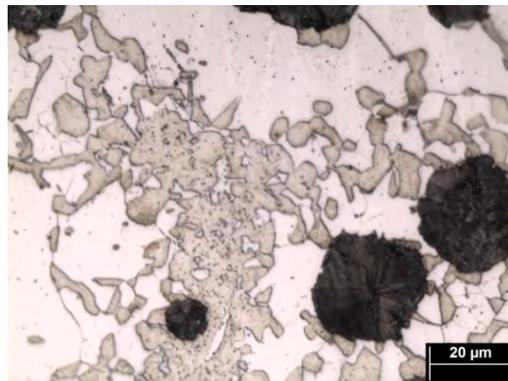


Figura 7: Microestruturas obtidas do tratamento isotérmico na zona crítica a 795°C por 12h seguidas por têmpera em água. Mostram-se carbonetos não dissolvidos. Amostras inicialmente perlíticas.

Na Figura 8 tem-se um gráfico que mostra a fração volumétrica de ferrita em função do tempo de austenitização na zona crítica. No presente gráfico há dados de amostras inicialmente ferríticas e perlíticas.

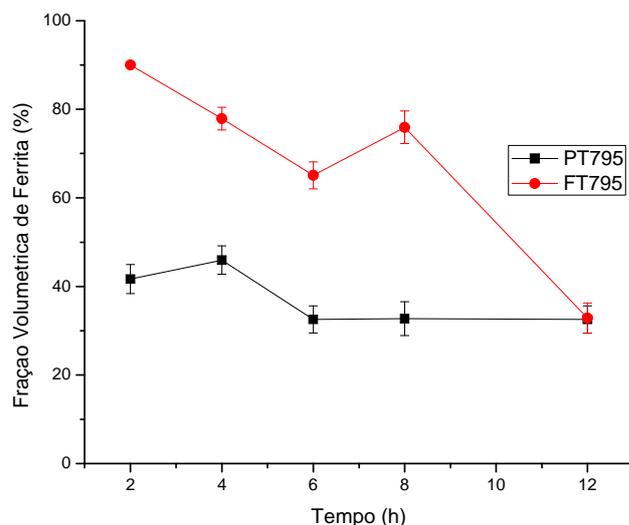


Figura 8: Fração volumétrica ferrita em função do tempo de austenitização na zona crítica. Amostras inicialmente ferríticas e perlíticas.

Nota-se que a fração volumétrica de ferrita diminui com o aumento do tempo. A curva desenvolvida a partir dos dados de amostras FT795 apresentou um ponto fora desta tendência. No entanto, foram realizados outros experimentos que confirmam a veracidade da tendência, além de dados da literatura, conforme (10). Em 12h de tratamento as amostras alcançaram uma fração volumétrica de aproximadamente 30% de ferrita, sendo que as para amostras inicialmente perlíticas este valor é mantido desde 6h de tratamento.

Conforme mencionado na introdução o método mais eficaz para o estudo da cinética de austenitização na zona crítica é a medida de microdureza da martensita, uma vez que, a dureza da martensita está diretamente relacionada com o teor de carbono da antiga austenita. Por tanto, na figura 9 encontram-se os dados de dureza da martensita em relação ao tempo de austenitização na zona crítica.

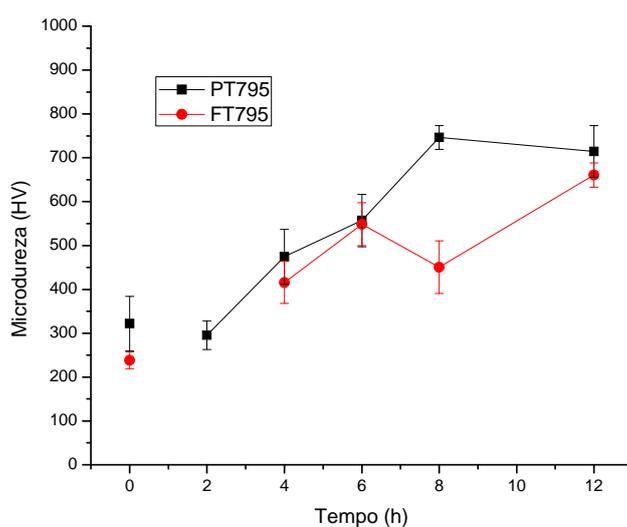


Figura 9: Microdureza da martensita em função do tempo de austenitização intercristica. Amostras inicialmente ferríticas e perlíticas.

Observe que para amostras PT795 os valores de microdureza da martensita são ligeiramente maiores comparados com os valores obtidos das amostras FT795. Isto é atribuído à melhor saturação de carbono da austenita em matriz perlítica do que em matriz ferrítica ou à presença de carbonetos não dissolvidos da antiga perlita. Além disso, a microdureza da martensita manteve-se constante após 8h de tratamento, o que indica que a estabilização das fases não ocorreu em tempos menores que este.

A análise das amostras PT795 deixa claro que a microdureza é um método mais eficaz no estudo da cinética de austenitização na zona crítica. Analisando-se somente a Figura 8 pode-se dizer que 6h de tratamento (para amostras PT795) é suficiente para o alcance do equilíbrio. No entanto, quanto se analisa em função da microdureza da martensita (Figura 9) o cenário muda, passando a ser necessário pelo menos 8h de tratamento.

Uma vez que houve dados de amostras FT795 fora da tendência projetada se fez necessário novos experimentos. Por tanto, a Figura 10 foi adicionada apenas para comprovar que amostras inicialmente ferríticas¹ apresentaram microdureza da martensita constante após 8h de austenitização a 795°C.

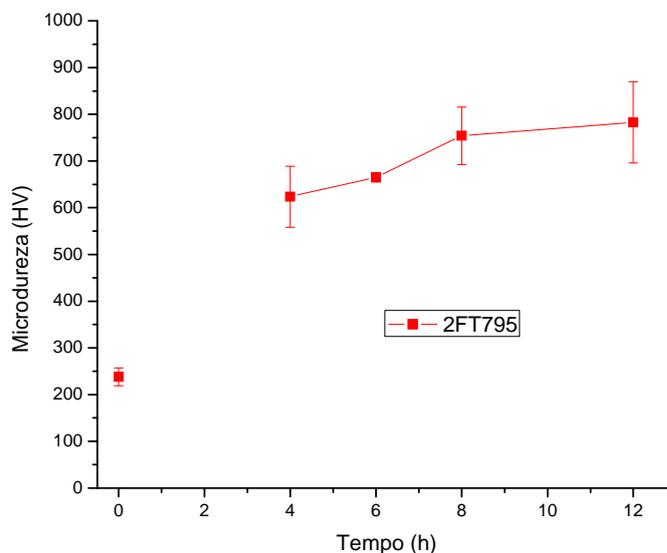


Figura 10: Microdureza da martensita em função do tempo de austenitização intercrítica. Amostras inicialmente ferríticas, segunda batelada de experimentos.

¹ Amostras obtidas de outra batelada de tratamento, porém são amostras com mesma composição química e condições de experimentos.

5 CONCLUSÃO

Com base nos dados obtidos conclui-se:

- em amostras FT795 a austenitização inicia nos contornos de células eutéticas, devido a segregação de elementos de liga, seguindo para contornos de grãos ferríticos em longos tempos de tratamento.
- nas amostras PT795, em curtos tempos de austenitização na zona crítica (2h), nota-se a presença de martensita (antiga austenita) em contornos de grãos e carbonetos esferoidizados nos contornos de células eutéticas.
- as amostras mostram diminuição da fração volumétrica de ferrita com o aumento do tempo;
- amostras inicialmente perlíticas apresentam carbonetos não dissolvidos mesmo após 12h de tratamento.
- amostras inicialmente perlíticas apresentaram maior microdureza que amostras inicialmente ferríticas, possivelmente devido a menor distância de difusão de carbono em amostras inicialmente perlíticas, conduzindo para um aumento na concentração de carbono na martensita em comparação as amostras inicialmente ferríticas, ou pela presença de carbonetos não dissolvidos.
- tanto amostras inicialmente ferríticas quanto inicialmente perlíticas estabilizaram a microdureza após 8h de tratamento em 795°C.
- estes resultados mostram que manter o tempo de 1,5h não é suficientes para alcançar o equilíbrio durante a austenitização na zona crítica.

Agradecimento

Ao CNPq por financiar a pesquisa.

REFERÊNCIAS

- 1 LOPES, C.L. Estudo da Influência das Temperaturas de Austenitização nas Propriedades Mecânicas do Ferro Nodular Austemperado a Partir da Zona Crítica. *Dissertação, UDESC*. 2009.
- 2 FRANCO, E. Estudo da Influência dos Parâmetros de Austenitização Sobre a Microestrutura do Ferro Fundido Nodular Austemperado A Partir da Zona Crítica. *Dissertação, UDESC*. 2008.
- 3 SIKORA, J.; MARTÍNIZ, R.; BASSO, A. Influence of Chemical Composition and Holding Time on Austenite $\gamma \rightarrow$ Ferrite α Transformation in Ductile Iron Occurring Within the Intercritical Interval. *Journal of Alloys and Compounds*. Vol. 509, pp. 9884 – 9889, 2011.
- 4 ERDOGAN, M. e KILICLI, V. Effect of Ausferrite Volume Fraction and Morphology on Tensile Properties of Partially Austenitised and Austempered Ductile Iron With Dual Matrix Structures. *International Journal of Cast Metals Research*. Vol. 20, pp. 202 – 214, October de 2007.
- 5 SANTOS, H. Mecanismos de Fratura de Ferro Fundido Nodular Austemperado a Partir Da Zona Crítica. *Dissertação, UDESC*. 2010.
- 6 HERFURT, K. Austenitisch-Ferritisches Gußeisen Mit Kugelgraphit. *Giesserei – Praxis*. Vol. 3, pp. 99 – 106, 2003
- 7 OGI, K; JIN, Y.C; LOPER Jr., C.R. A Study of Some Aspects of the Austenitization Process of Spheroidal Graphite Cast Iron. *AFS Transaction*. Vol. 96, pp. 75 – 82, 1988,
- 8 GUESSER, W. L et al. 2009. Ferro Fundido Nodular a Partir da Zona Crítica. *ABIFA – CONAF*. 22 a 25 de Setembro de 2009.