

EVOLUÇÃO MICROESTRUTURAL DA AUSTENITA NO AQUECIMENTO CONTÍNUO DE UM AÇO DE BAIXO CARBONO

Fernando Lucas Gonçalves e Oliveira⁽²⁾

José Mário Carneiro Vilela⁽³⁾

Margareth Spangler Andrade⁽⁴⁾

André Barros Cota⁽⁵⁾

Resumo

A evolução microestrutural e as temperaturas críticas de formação da austenita em um aço de baixo carbono, a partir de uma microestrutura inicial constituída de ferrita e perlita, foram estudadas em aquecimento contínuo, por meio de ensaios dilatométricos e da medição de parâmetros microestruturais. Verificou-se que a formação da austenita ocorre em duas etapas: a) dissolução da perlita entre Ac_1 (temperatura de início de formação da austenita) e Af_i (temperatura de fim de dissolução da perlita, coincidente com a temperatura de início de dissolução da ferrita); b) transformação da ferrita proeutetóide em austenita no intervalo entre Af_i e Ac_3 (temperatura de fim de formação da austenita). O aumento da taxa de aquecimento de 0,1 a 16°C/s acarretou em um aumento das temperaturas Ac_1 , Af_i e Ac_3 , de 720 a 745, 745 a 770 e 840 a 920°C, respectivamente. A evolução microestrutural da austenita no aquecimento contínuo à taxa de 1°C/s revela que a fração volumétrica de austenita aumenta continuamente com a temperatura, até a completa transformação a 860°C. A taxa de formação da austenita atinge um máximo em Af_i , em torno de 750°C, e depois decresce até o fim da transformação. A análise microestrutural das amostras, realizada por microscopia ótica, eletrônica de varredura e de força atômica, mostra que a austenita presente nas temperaturas intercríticas, transforma-se por têmpera em martensita e/ou bainita.

Palavras-chave: Aço baixo carbono; Austenita; Transformação de fases; Aquecimento contínuo

¹ 60º Congresso Anual da ABM – Belo Horizonte - Julho de 2005

² Mestrando em Engenharia de Materiais REDEMAT/UFOP

³ Dr., Pesquisador Associado CNPq/CETEC

⁴ Membro da ABM, Doutor, Profa. da REDEMAT e Pesquisadora do CETEC

⁵ Prof. Adjunto, Doutor, Departamento de Física, REDEMAT, UFOP

1 INTRODUÇÃO

A austenitização é uma transformação de fase de grande importância comercial, porque os aços são processados no campo de fase austenítico em algumas etapas de processos industriais importantes, como ocorre durante a maioria dos tratamentos térmicos, termomecânicos e termoquímicos. A condição da austenita nos aços, antes da sua transformação no resfriamento contínuo, influencia as propriedades mecânicas do material tratado termicamente. Assim, o comportamento mecânico dos aços depende não somente da natureza da decomposição da austenita no resfriamento contínuo, mas também da cinética de austenitização, ou seja, da taxa de aquecimento, do grau de homogeneidade da austenita, de seu tamanho de grão, da taxa de aquecimento, presença de inclusões não metálicas e distribuição das fases^[1].

Vários modelos descrevendo a cinética de formação da austenita têm sido propostos nos últimos anos. No entanto, estes estudos não estão tão bem desenvolvidos quanto aqueles sobre a decomposição da austenita em ferrita e perlita no resfriamento contínuo. A cinética de austenitização depende da composição química do aço, de sua microestrutura inicial e da taxa de aquecimento^[2-7].

Como a condição austenítica é influenciada pela cinética de austenitização, a microestrutura inicial, a taxa de aquecimento e a temperatura de austenitização são os fatores que mais diretamente afetam a cinética de austenitização dos aços no aquecimento contínuo^[8].

A dilatométrica é uma técnica muito apropriada para o estudo da cinética das transformações de fase nos aços e, em particular, para o estudo da cinética de austenitização de aços baixa liga^[7].

Neste trabalho, as temperaturas críticas de formação da austenita em um aço de baixo carbono, a partir da microestrutura inicial constituída de ferrita e perlita, foram determinadas em aquecimento contínuo, através da dilatométrica e das medições de parâmetros microestruturais. A evolução microestrutural da austenita no aquecimento contínuo foi estudada em detalhe para uma taxa de aquecimento de 1°C/s.

2 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

O material utilizado neste trabalho foi um aço de baixo carbono e microligado com Nb, com a composição química (% em peso) mostrada na Tabela 1.

Tabela 1. Composição química do aço (% em peso)

C	Mn	Si	Al	P	S	Nb	N
0,15	1,42	0,37	0,052	0,023	0,009	0,031	0,0042

As temperaturas de início e fim de formação da austenita, Ac_1 e Ac_3 , respectivamente, foram determinadas por dilatométrica, para as seguintes taxas de aquecimento: 10⁻¹, 1, 5, 10, 13 e 16°C/s. Os ensaios foram realizados em um dilatômetro de têmpera do tipo Adamel-Lhomargy LK.02.

A cinética de formação da austenita e a evolução microestrutural no aço em estudo foram avaliadas por aquecimento contínuo do material foi interrompido por têmpera, a partir de uma série de temperaturas dentro do intervalo entre Ac_1 e Ac_3 . A têmpera teve por objetivo, transformar toda a austenita presente no aço, a uma determinada temperatura intercrítica, em martensita e bainita. Este procedimento foi

realizado no dilatômetro, para a taxa de aquecimento 1°C/s . A Figura 1 mostra, na curva dilatométrica, as temperaturas intercríticas a partir das quais o aquecimento do material foi interrompido por têmpera.

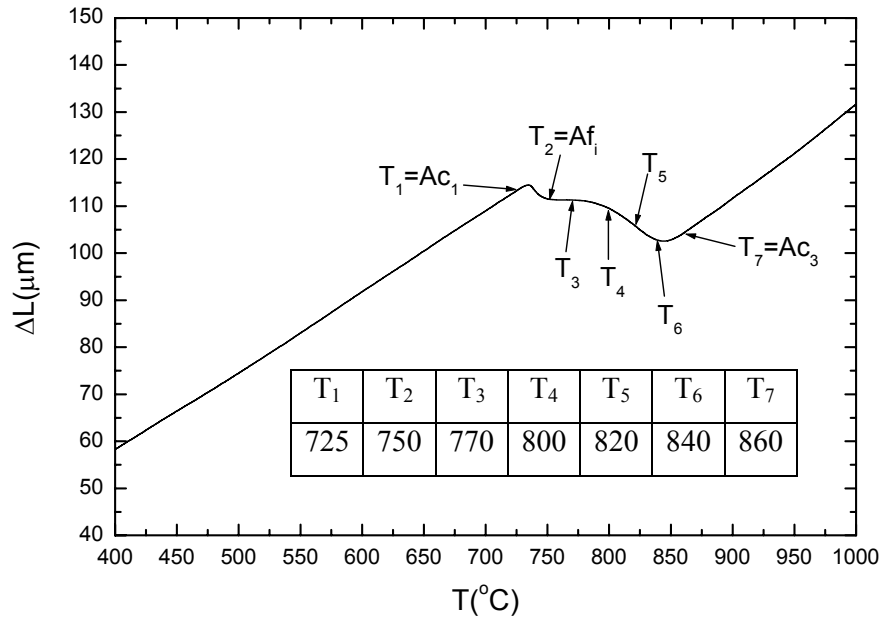


Figura 1. Temperaturas intercríticas a partir das quais o aquecimento do material foi interrompido por têmpera.

A caracterização microestrutural das amostras do aço foi realizada através de microscopia óptica, microscopia eletrônica de varredura, microscopia de força atômica e metalografia quantitativa. A preparação das amostras foi realizada através de lixamento e polimento convencional. Foram usados nos ataques químicos os reativos nital a 2% e 4%, e LePera^[9], de acordo com a característica microestrutural a ser analisada. A fração volumétrica dos microconstituintes presentes nas amostras foi medida através do método de contagem de pontos, descrito pela norma ASTM E 562-83^[10].

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Figura 2 mostra as micrografias óptica, eletrônica de varredura e de força atômica da amostra do aço na condição como recebido da indústria. A microestrutura desta amostra é constituída de ferrita proeutetóide e perlita.

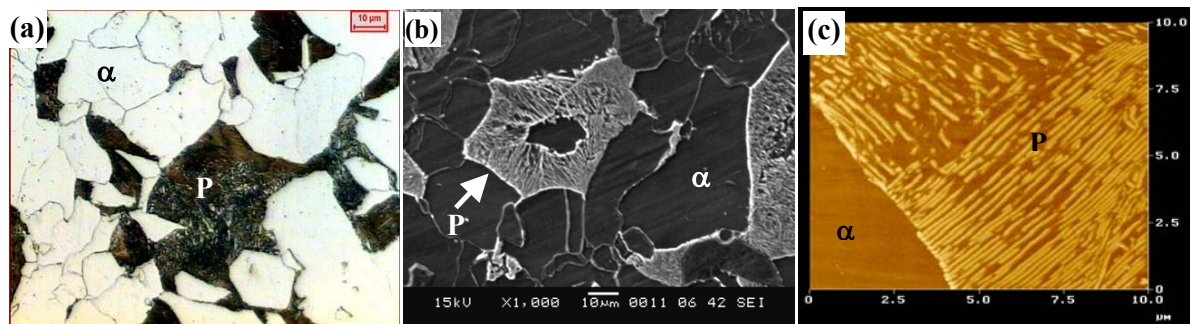


Figura 2. Micrografias da amostra do aço na condição como recebido da indústria; a) micrografia óptica. b) micrografia eletrônica de varredura, c) micrografia de força atômica. Ataque nital 2%. α = ferrita e P = perlita.

A amostra apresentou uma fração volumétrica de ferrita $V_{\alpha_0} = (73 \pm 3)\%$ e um tamanho médio de grão ferrítico $\bar{d}_{\alpha_0} = (18 \pm 0,6)\mu\text{m}$.

A Figura 3 mostra a curva dilatométrica e sua derivada em relação à temperatura, para o aquecimento contínuo do aço em estudo, na taxa de aquecimento de 1°C/s . A curva foi utilizada para determinar as temperaturas críticas de formação da austenita no aquecimento contínuo. As temperaturas de início e fim de formação da austenita no aquecimento, Ac_1 e Ac_3 , respectivamente, estão indicadas na figura, juntamente com a temperatura Af_i , que é definida como a temperatura de início da transformação da ferrita proeutetóide em austenita.

Essa característica da formação da austenita a partir de uma microestrutura inicial constituída de ferrita proeutetóide+perlita é relatada na literatura^[5,7,8]. Os grãos austeníticos nucleiam preferencialmente na interface entre as colônias de perlita e crescem, sendo o crescimento controlado pela difusão do carbono na austenita, carbono este colocado em solução sólida durante a dissolução da perlita. As distâncias médias de difusão dos átomos de carbono são da ordem do espaçamento interlamelar da perlita^[2,3,6]. Após a dissolução da perlita, ocorre a transformação da ferrita proeutetóide em austenita, controlada também pela difusão do carbono na austenita.

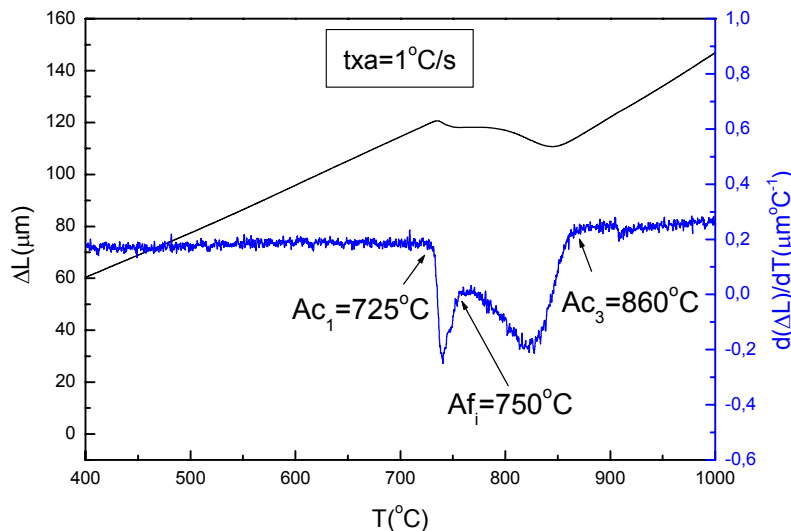


Figura 3. Curva dilatométrica do aço estudado $\Delta L=f(T)$ e sua derivada $d(\Delta L)/dt=f(T)$, para o aquecimento contínuo do aço em estudo, usando uma taxa de 1°C/s .

Com o objetivo de mostrar que a temperatura Af_i marca o fim da dissolução da perlita e representa a temperatura a partir da qual a austenita começa a se formar a partir da ferrita proeutetóide, analisou-se a microestrutura da amostra do aço aquecida a 1°C/s e temperada a partir de 750°C (Af_i). A figura 4(a) mostra a micrografia óptica da amostra (ataque LePera) e sua microestrutura é constituída de ferrita proeutetóide que não se transformou durante o aquecimento contínuo, e de martensita, que se formou na têmpera, a partir da austenita presente na amostra a 750°C . A fração volumétrica de austenita formada durante o aquecimento contínuo do material até a temperatura de 750°C (medida através da fração de martensita presente na amostra a temperatura ambiente) foi de $V_\gamma=(30\pm 3)\%$. Como a fração volumétrica de perlita na microestrutura inicial é de $V_P=(27\pm 3)\%$, pode-se considerar que praticamente toda a perlita presente na amostra se dissolveu, e que toda a austenita se formou a partir da perlita, mostrando que a temperatura Af_i , para a taxa de aquecimento de 1°C/s é, aproximadamente, 750°C .

A Figura 4(b) mostra a imagem de força atômica da mesma amostra, evidenciando uma pequena região da amostra que apresenta colônias de perlita que não se dissolveram por completo, o que não foi possível ver com as outras técnicas de microscopia utilizadas. Isto é um forte indício de que a primeira etapa da formação da austenita, a partir de uma microestrutura constituída de ferrita proeutetóide e perlita, é a dissolução da perlita.

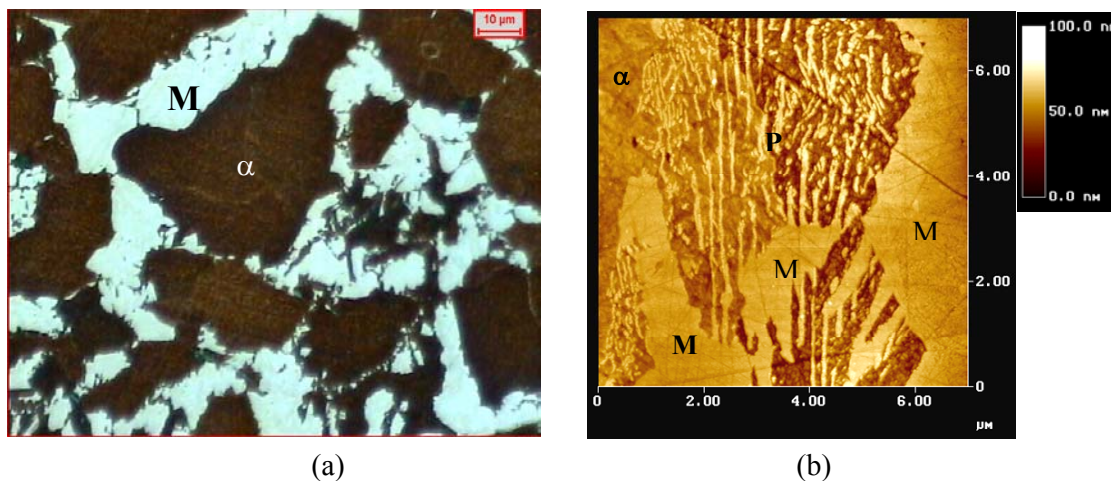


Figura 4. Micrografias da amostra do aço aquecida a 1°C/s e temperada a partir de 750°C (Af_i); (a) micrografia ótica e (b) imagem de força atômica, ataque. Ataque nital 2%. α = ferrita proeutetóide, P = perlita e M = martensita.

A Figura 5 mostra o diagrama de transformação no aquecimento contínuo (TAC) do aço em estudo, construído a partir dos dados obtidos nos ensaios dilatométricos, realizados sob diferentes taxas de aquecimento. A partir do diagrama, observa-se que as temperaturas críticas de formação da austenita aumentam com o elevação da taxa de aquecimento, que exerce uma influência maior sobre a temperatura Ac_3 .

A Figura 6 mostra o gráfico das diferenças $\Delta T = Ac_3 - Ac_1$ e $\Delta T_2 = Ac_3 - Af_i$ em função da taxa de aquecimento do material. A partir do gráfico, podemos ver que as diferenças aumentam com a elevação da taxa de aquecimento, sendo esta elevação mais acentuada para taxas de aquecimento menores. O fato das temperaturas críticas de formação da austenita aumentarem com o aumento da taxa de aquecimento, pode estar relacionado com a força motriz termodinâmica necessária para que ocorra a transformação difusional no aquecimento contínuo. O aumento da taxa de aquecimento diminui o tempo para que a transformação difusional da perlita em austenita se inicie, o que provoca um aumento na força motriz termodinâmica necessária para que ocorra o início da transformação, que por sua vez aumenta o superaquecimento do material, aumentando assim as temperaturas Ac_1 e Ac_3 .

O estudo da evolução microestrutural de formação da austenita no aquecimento contínuo foi realizado para a taxa de 1°C/s. A Figura 7 mostra evolução da formação da austenita, avaliada por microscopia ótica através dos produtos de sua posterior transformação durante a têmpera a partir de 725, 750, 770, 800, 820, 840 e 860°C.

Na Figura 7(a), observa-se que a microestrutura é praticamente igual a microestrutura inicial do aço, constituindo-se de ferrita proeutetóide e perlita. Contudo, a imagem revela que a microestrutura contém uma pequena quantidade de martensita (região de cor clara), oriunda da austenita que se formou a 725°C (temperatura Ac_1).

Na Figura 7(b), observa-se que toda a perlita se dissolveu e a austenita formada transforma-se em martensita no resfriamento rápido. A microestrutura é constituída

de ferrita, que não se transforma no aquecimento contínuo, e martensita (fração volumétrica de austenita a 750°C é de 30%). A Figura 7(c) mostra que a microestrutura é constituída de ferrita, que não se transforma no aquecimento contínuo, e martensita (fração volumétrica de austenita a 770°C é de 36%).

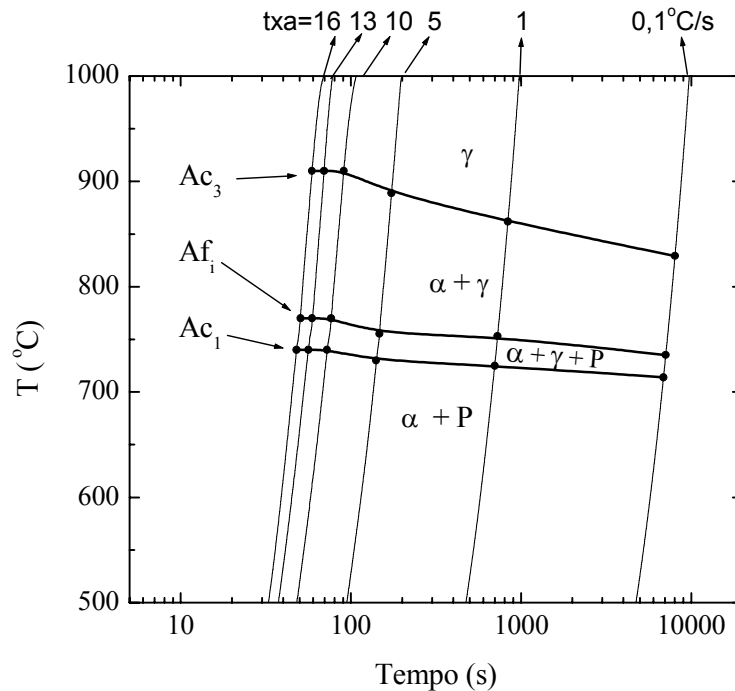


Figura 5. Diagrama de transformação no aquecimento contínuo do aço em estudo, a partir de uma microestrutura inicial constituída de ferrita proeutetóide + perlita, onde α é a ferrita proeutetóide, P é a perlita e γ é a austenita. txa = taxa de aquecimento

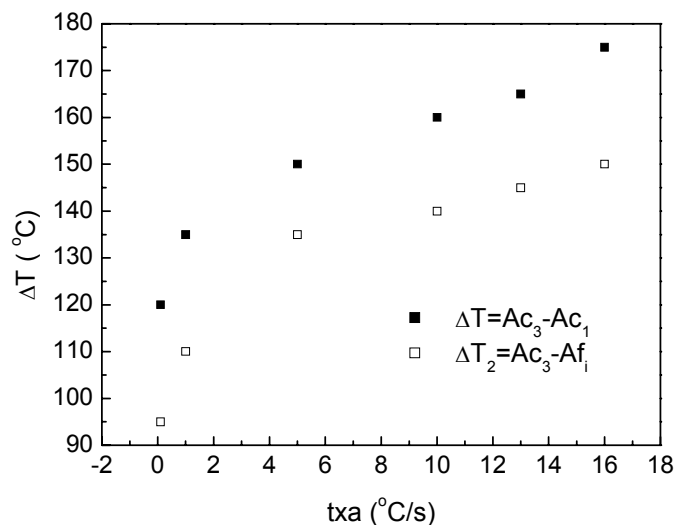
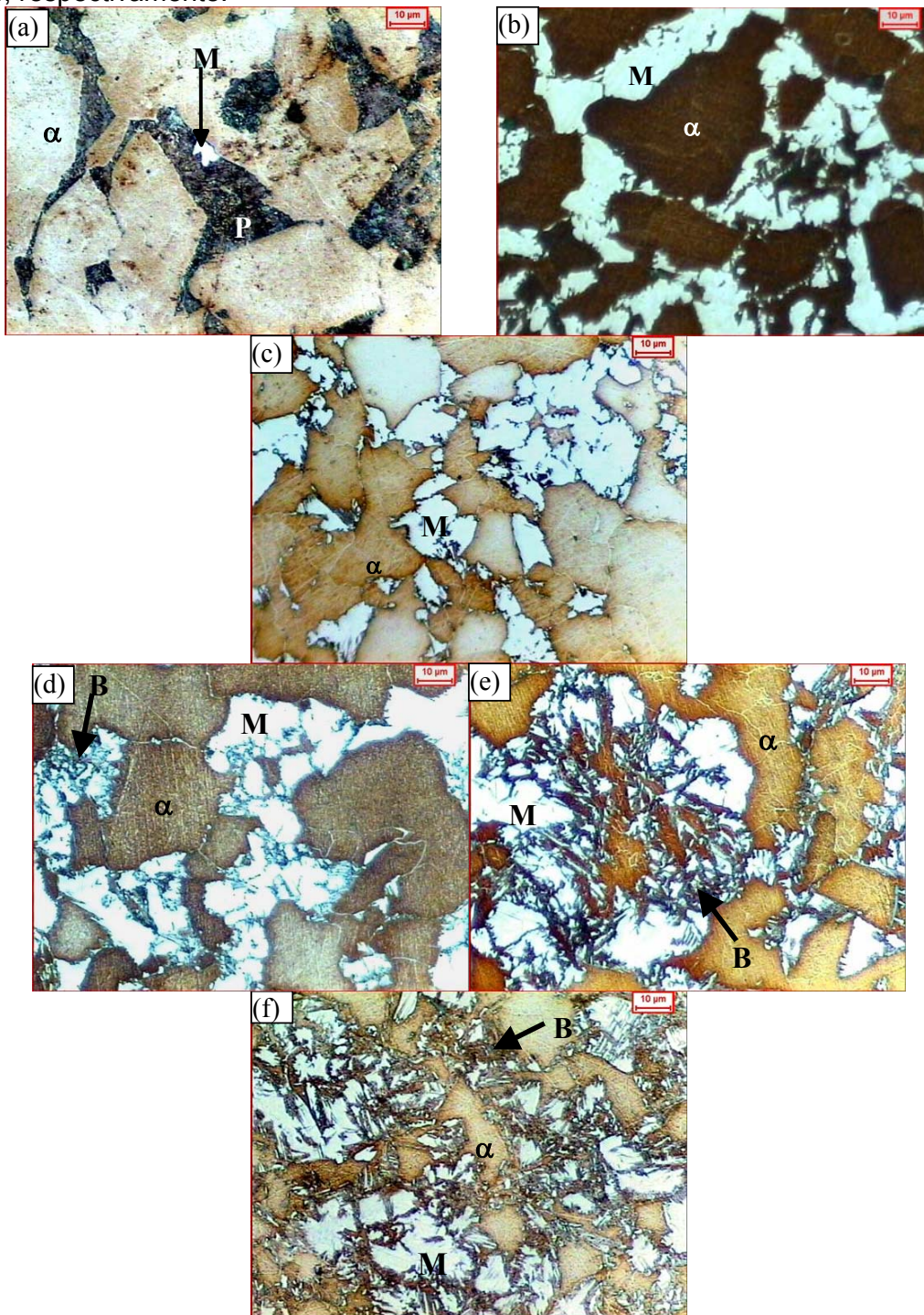


Figura 6. Gráfico da diferença entre as temperaturas críticas como uma função da taxa de aquecimento contínuo.

Nas Figuras 7(d-f), observa-se que a microestrutura é constituída de ferrita, martensita e bainita, formada a partir da austenita com baixo teor de carbono. A presença de diferentes produtos de transformação da austenita no resfriamento contínuo indica que a austenita que se forma a temperaturas acima de Af_i possui regiões com diferentes temperabilidades, devido o gradiente de concentração de carbono na microestrutura austenítica gerado quando a ferrita proeutetóide passa a

ser consumida. A fração volumétrica de austenita a 800, 820 e 840°C, medida através das quantidades de martensita e bainita na microestrutura, é de 49, 58 e 71%, respectivamente.



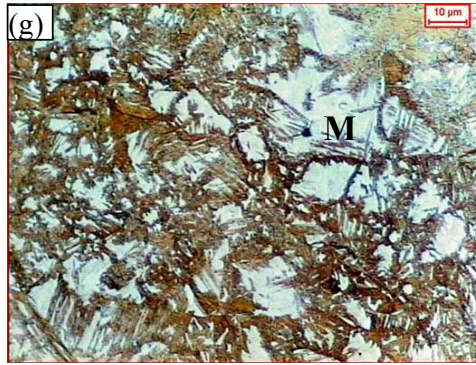


Figura 7. Micrografias das amostras do aço aquecidas a 1°C/s e temperadas a partir de: (a) 725°C (Ac_1), (b) 750°C (Af_i), (c) 770°C, (d) 800°C, (e) 820°C, (f) 840°C e (g) 860°C (Ac_3). Ataque: LePera. Microscopia ótica. □=ferrita, P=perlita, M=martensita, B=bainita.

Na Figura 7(g), observa-se que a microestrutura da amostra temperada a partir de 860°C (Ac_3) é constituída de martensita e bainita. A microestrutura contém ainda pequena quantidade de ferrita que não se transformou no aquecimento contínuo, mesmo sendo aquecida até a temperatura Ac_3 .

A Figura 8 mostra a evolução da fração volumétrica de austenita, da ferrita e perlita que não se transformam durante o aquecimento, como uma função da temperatura, no intervalo entre Ac_1 e Ac_3 .

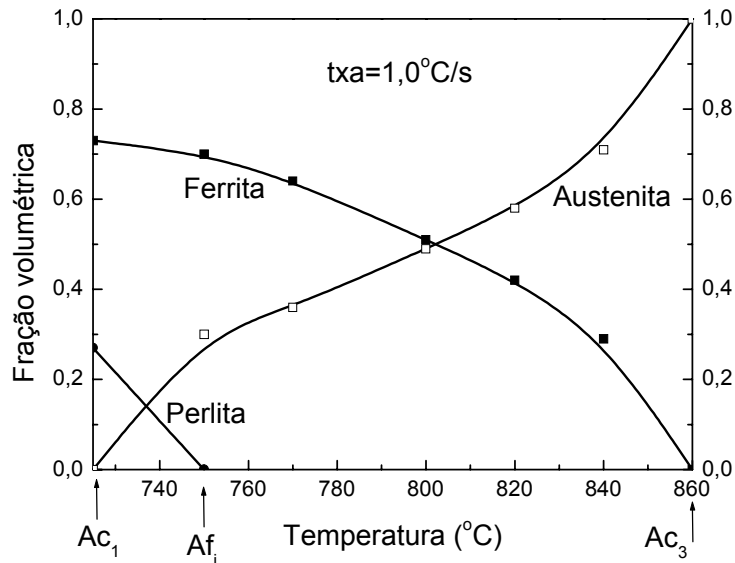


Figura 8. Fração volumétrica de austenita, ferrita e perlita como uma função da temperatura.

A cinética de formação da austenita durante o aquecimento contínuo pode ser avaliada pelo gráfico da Figura 9, que representa a taxa de formação da austenita, medida pela derivada da fração volumétrica em relação ao tempo (dV_γ/dt) como uma função do tempo. Verifica-se que a taxa de formação da austenita atinge o máximo aproximadamente em $Af_i = 750^\circ\text{C}$, que é a temperatura de fim de dissolução da perlita, para a taxa de aquecimento de 1°C/s.

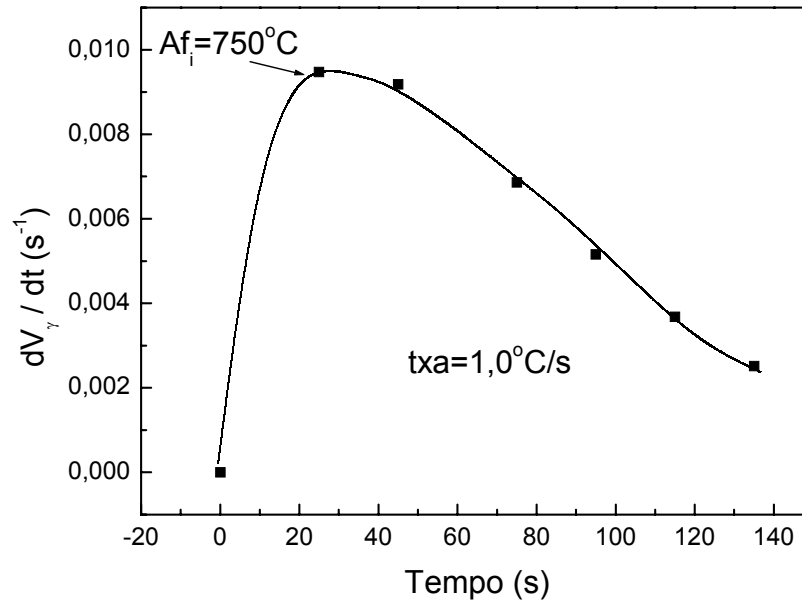


Figura 9. Taxa de formação da austenita como uma função do tempo de transformação.

4 CONCLUSÕES

- Existe uma tendência das diferenças entre as temperaturas críticas (Ac_3-Ac_1 e Ac_3-Af_i) aumentarem com a elevação da taxa de aquecimento, indicando que a taxa de aquecimento tem uma maior influência sobre a temperatura final de formação da austenita, Ac_3 . Este resultado reflete o valor de força motriz termodinâmica necessária para terminar a transformação difusional da ferrita em austenita.
- A formação da austenita a partir de uma microestrutura inicial contendo ferrita e perlita ocorreu em dois estágios: perlita→austenita e ferrita→austenita. A e a temperatura Af_i marca o fim da dissolução da perlita e representa a temperatura a partir da qual a austenita começa a se formar a partir da ferrita proeutetóide.
- A cinética de formação da austenita durante o aquecimento contínuo foi avaliada pela derivada da fração volumétrica de austenita transformada em relação ao tempo (dV_{γ}/dt) como uma função do tempo. Verifica-se que a taxa de formação da austenita atinge o seu máximo em $Af_i = 750^{\circ}C$, que é a temperatura de fim de dissolução da perlita, e depois diminui até o fim da transformação, para a taxa de aquecimento de $1^{\circ}C/s$.

Agradecimentos

Os autores agradecem à CAPES e FAPEMIG pelo suporte financeiro a esta pesquisa.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Krauss, George. Steels: Heat Treatment and Processing Principles. ASM International, 1990.
2. Roos, A., Gacsi, Z. e Fuchs, E. G. Isothermal Formation of Austenite in Eutectoid Plain Carbon Steel. Acta Metallurgica, v.31, n°4, p.509-517, 1983.

3. Akbay, T., Reed, R.C. e Atkinson, C. Modelling Reaustenitisation from Ferrite/Cementite Mixtures in Fe-C Steels. *Acta Metallurgica et Materialia*, v.47, n°4, p.1469-1480, 1994.
4. Reed, R. C., Akbay, T., Shen, Z., Robinson, J. M., Root, J.H. Determination of Reaustenitisation Kinetics in a Fe-0.4C Steel using Dilatometry and Neutron Diffraction. *Materials Science and Engineering A*, v.256, p.152-165, 1998.
5. García de Andrés, C., Caballero, F. G., Capdevila, C. e Bhadeshia, H. K. D. H. Modelling of Kinetics and Dilatometric Behavior of Non-Isothermal Perlite-to-Austenite Transformation in an Eutectoid Steel. *Scripta Materialia*, v.39, n°6, p.791-796, 1998.
6. Jacot, A. e Rappaz M. A Combined Model for the Description of Austenitization, Homogenization and Grain Growth in Hypoeutectoid Fe-C Steels During Heating. *Acta Materialia*, v.47, n°5, p.1645-1651, 1999.
7. Caballero, F. G., Capdevila, C. e García de Andrés, C. Modelling of Kinetics of Austenite Formation in Steels with Different Initial Microstructures. *ISIJ International*, v. 1, n°10, p.1093-1102, 2001.
8. García de Andrés, C., Caballero, F. G. Capdevila, C. e Álvarez, L. F. Application of Dilatometric Analysis to the Study of Solid-Solid Phase Transformation in Steels. *Materials Characterization*, v.48, p.101-111, 2002.
9. LePera, F. S. Improved Etching Technique to Emphasize Martensite and Bainite in High-Strength-Dual-Phase Steel. *Journal of Metals*, p.38-39, 1980.
10. American Society for Testing and Materials. Standard Practice for Determining Volume Fraction by Systematic Manual Point Count – E 562-83. *Annual Book of ASTM Standards*, 1983, p.552-556.

MICROSTRUCTURAL EVOLUTION OF AUSTENITE IN THE CONTINUOUS HEATING OF A LOW CARBON STEEL

Fernando Lucas Gonçalves e Oliveira

José Mário Carneiro Vilela

Margareth Spangler Andrade

André Barros Cota

Abstract

The microstructural evolution and the critical temperatures of the austenitic transformation were studied in continuous heating in a low carbon steel with initial microstructure composed of ferrite and pearlite, by using dilatometric analysis and measurements of microstructural parameters. It was observed that the formation of austenite occurs in two stages: a) pearlite dissolution from Ac_1 to Af_i ; b) ferrite to austenite from Af_1 to Ac_3 . The increase of the heating rate from 0.1 to 16°C/s results in an increase in the temperatures Ac_1 , Af_i and Ac_3 , from 720 to 745, 745 to 770 and 840 to 920°C, respectively. The austenite volumetric fraction transformed increases with temperature, at 1°C/s heating rate. The austenite formation rate has its maximum at 750°C, which is the finish temperature of the pearlite dissolution, decreasing at temperatures above this point. The microstructural analysis using optical, scanning electron and atomic force microscopies, show that the austenite at intercritical temperatures transforms into martensite and/or bainite by quenching.

Key-words: Low carbon steel; Austenite; Phase transformations; Continuous heating.