

CINÉTICA DE FORMAÇÃO DA AUSTENITA NO AQUECIMENTO CONTÍNUO A PARTIR DE CURVAS DILATOMÉTRICAS¹

Geraldo Magela Rodrigues de Almeida²

Sara Silva Ferreira de Dafé²

André Barros Cota³

Resumo

Neste trabalho estudou-se a influência da taxa de aquecimento sobre a cinética de formação da austenita no aquecimento contínuo, utilizando um aço de baixo carbono microligado com Nb. Equações semi-empíricas, baseadas na equação de Avrami, foram propostas para as diferentes taxas de aquecimento, determinando-se a quantidade de austenita formada a partir das curvas dilatométricas e da utilização da regra da alavanca, bem como de dados estruturais para o modelamento da cinética de formação da austenita. Verificou-se que o parâmetro K da equação de Avrami, associado com a cinética de austenitização, aumenta com a taxa de aquecimento, o que implica em maior taxa de nucleação e crescimento da fase austenítica. O parâmetro n da equação de Avrami apresentou valor médio de 1,44 para os cálculos utilizando a regra da alavanca e 0,67 para o modelamento, sendo este parâmetro praticamente independente da taxa de aquecimento, o que reflete a sua dependência apenas com o tipo de transformação de fase. Os parâmetros obtidos no modelamento e os obtidos pela regra da alavanca têm comportamentos similares.

Palavras-chave: Aço de baixo carbono; Transformação no aquecimento contínuo; Cinética

KINETICS OF AUSTENITE FORMATION DURING CONTINUOUS HEATING FROM DILATOMETRIC ANALYSIS

Abstract

The effect of the heating rate on kinetics of austenite formation for a low carbon steel was studied under continuous heating conditions. By means of dilatometric analysis semi-empirical equations, based on Avrami equation, were proposed for the different heating rates. The volume fraction of the austenite was calculated from the dilatation curve by using the linear thermal contraction coefficients and structural parameters, and the lever rule. The parameter K on the Avrami equation associated with the austenitization kinetics increases with increasing heating rate, which implies higher rate of nucleation and growth of the austenitic phase. The parameter n on the Avrami equation is practically independent of the heating rate, which indicates its dependence only of the type of phase transformation, and their average values are 1.44 for the calculations using the lever rule and 0.67 for the modeling. The parameters obtained by the modeling and by the lever rule have similar behaviors.

Key words: Low carbon steel; Continuous heating transformation; Kinetics

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

² Bacharel em Física, UFOP

³ Sócio da ABM, Prof. Associado, Doutor, Departamento de Física, Redemat, UFOP, abcota@ufop.br

1 INTRODUÇÃO

A formação da austenita nos aços é de grande importância industrial, pois normalmente estas ligas são processadas no campo de fase austenítico, como nos tratamentos térmicos, termomecânicos e termoquímicos.

A formação da austenita durante o aquecimento difere das transformações que ocorrem durante o resfriamento contínuo da austenita, pois a cinética de decomposição pode ser descrita satisfatoriamente em termos da composição química e tamanho de grão austenítico, contudo a cinética de formação da austenita é influenciada pela composição química, microestrutura inicial e a taxa de aquecimento.^[1-4]

A austenitização de aços com microestrutura constituída de ferrita proeutetóide e perlita no aquecimento contínuo pode ser dividida em duas etapas, a primeira é a dissolução da perlita, que inicia a temperaturas imediatamente acima de A_{c1} (temperatura de início de formação da austenita), e termina à temperatura A_{fi} (que é o fim da transformação da perlita em austenita e início da transformação da ferrita em austenita). A segunda etapa é transformação da ferrita em austenita e inicia-se em A_{fi} e só se completa quando o aço atinge a temperatura A_{c3} (temperatura de fim de formação da austenita).^[1,3-7]

Alguns trabalhos relatam a utilização de ensaios dilatométricos e da regra da alavanca como um método rápido para se estudar a cinética de transformação de fases^[1,2,8] e alguns autores sugerem métodos de correção das curvas dilatométricas com o objetivo de evitar os erros que surgem, relacionados com a redistribuição de carbono entre a ferrita e a austenita, e seus diferentes coeficientes de expansão térmica.^[5-7]

Quando uma transformação de fase ocorre em condições isotérmicas, a fração transformada como uma função do tempo obedece a equação de Johnson-Mehl-Avrami, onde f é a fração volumétrica transformada, K é uma constante a uma determinada temperatura, t é o intervalo de tempo de transformação a uma temperatura T e n é uma constante que caracteriza a cinética da transformação.^[1,3,4]

Este trabalho tem como objetivo estudar da influência da taxa de aquecimento sobre a cinética de formação da austenita no aquecimento contínuo, a partir de curvas dilatométricas obtidas de um aço de baixo carbono microligado com Nb.

2 MATERIAL E MÉTODOS

Foi utilizado um aço de baixo carbono microligado com Nb, com composição química (% em peso) 0,15C; 1,42Mn; 0,37Si; 0,052Al; 0,023P; 0,009S; 0,031Nb; 0,0042N.

A Figura 1 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 primária (73%) e perlita (27%)^[9].

A cinética de formação da austenita no aquecimento contínuo foi estudada a partir de curvas dilatométricas, utilizando-se várias taxas de aquecimento: 0,1°C/s, 1°C/s, 5°C/s, 10°C/s, 13°C/s e 16°C/s. As curvas dilatométricas e as temperaturas A_{c1} , A_{fi} e A_{c3} , se encontram em Oliveira.^[9]

A partir dos valores de $\Delta L/L_0$ avaliados diretamente das curvas dilatométricas, calculou-se a fração volumétrica de austenita formada como uma função da temperatura e do tempo. A partir dos valores das frações de austenita transformada

como uma função do tempo e utilizando a equação de Avrami, $f_\gamma = 1 - \exp(-Kt^n)$, fez-se o estudo da cinética austenitização, para as diferentes taxas de aquecimento.

As frações de austenita formada foram inicialmente determinadas a partir das curvas dilatométricas disponíveis e aplicando a regra da alavanca. O método de aplicação da regra da alavanca à curva dilatométrica no aquecimento contínuo é ilustrado na Figura 2.

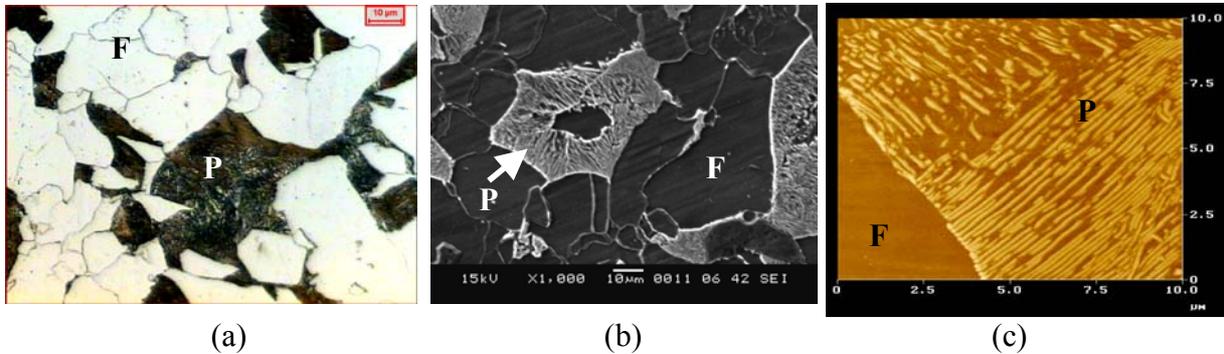


Figura 1. Micrografias da amostra do aço na condição como recebido da indústria; a) micrografia óptica. b) micrografia eletrônica de varredura. c) micrografia de força atômica. Ataque nital. Ferrita=F e perlita=P.

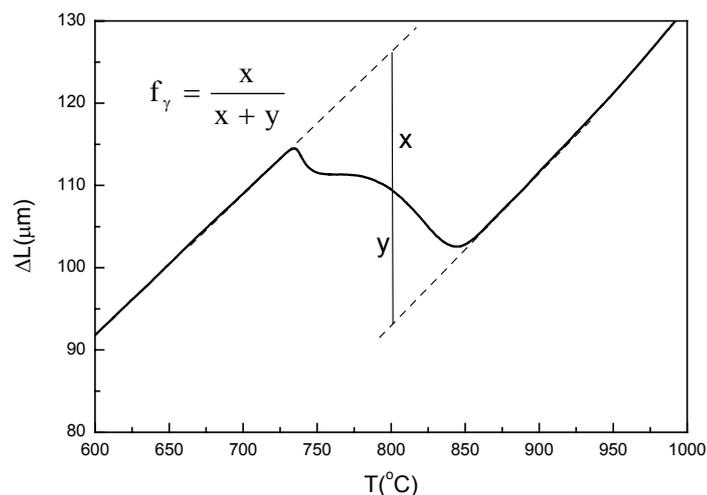


Figura 2. Método de aplicação da regra da alavanca à curva dilatométrica.

Dos dados dilatométricos e dos parâmetros dos retículos cristalinos das fases presentes, a fração de austenita formada foi também calculada, através do modelamento descrito abaixo.

Supondo que a amostra expande isotropicamente, a mudança de comprimento da amostra, ΔL , em relação ao comprimento inicial à temperatura ambiente, L_0 , está relacionada com a variação de volume, ΔV , e o volume inicial à temperatura ambiente, V_0 , para pequenas variações através da equação:

$$V(T) = kV_0 \left(1 + 3 \frac{\Delta L}{L_0} \right) \quad (1)$$

onde valor de $\Delta L/L_0$ é avaliado diretamente das curvas dilatométricas, k é um fator de escala. O termo $V(T)$ pode ser calculado a partir dos parâmetros dos retículos das fases presentes e de suas respectivas frações volumétricas, na microestrutura a cada temperatura no aquecimento contínuo:

$$V(T) = \sum_i f_i V_i \quad (2)$$

onde f_i , são as frações volumétricas das fases ferrita, cementita e austenita, em qualquer temperatura de transformação; V_i são os volumes atômicos das fases ferrita, cementita e austenita presentes na microestrutura a uma dada temperatura.

Os volumes atômicos estão associados aos parâmetros dos retículos através das seguintes equações:

$$V_\alpha = \frac{1}{2} a_\alpha^3 \quad V_\gamma = \frac{1}{4} a_\gamma^3 \quad V_\theta = \frac{1}{12} a_\theta \cdot b_\theta \cdot c_\theta \quad (3)$$

onde os fatores 2, 4 e 12 no denominador estão relacionados aos números de átomos nas celas unitárias da ferrita (2 átomos), austenita (4 átomos) e cementita (12 átomos).

O parâmetro de rede da austenita à temperatura ambiente foi calculado da equação^[7]:

$$a_{\gamma 0} = 3,573 + 0,033 C + 0,00095 Mn - 0,0002 Ni + 0,0006 Cr + 0,0031 Mo + 0,0018 V \quad (4)$$

onde a composição química é dada em % em peso e $a_{\gamma 0}$ dado em Å.

Os parâmetros de rede da ferrita (α), cementita (θ) e austenita (γ) a qualquer temperatura, a_α , a_θ , b_θ , c_θ e a_γ , foram calculados pelas equações:

$$a_i = a_{i0} [1 + \beta_i (T - 300)] \quad (5)$$

onde a_i se refere aos parâmetros de rede da ferrita (a_α), cementita (a_θ , b_θ , c_θ) e austenita (a_γ), e β_i se refere aos coeficientes de expansão térmica da fase ferrita, cementita e austenita^[3].

De posse dados estruturais e utilizando a definição de diferencial têm-se a equação em função das frações e volumes das fases presentes na amostra:

$$\frac{V(T + \Delta T) - V(T)}{\Delta T} = \sum \left(\frac{V_i(T + \Delta T) - V_i(T)}{\Delta T} * f_i + \frac{f_i(T + \Delta T) - f_i(T)}{\Delta T} * V_i \right) \quad (6)$$

onde V é volume total, V_i é volume atômico da fase e f_i é a fração em massa da fase (ferrita, cementita e austenita).

3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

A Figura 3 mostra as frações volumétricas, obtidas pela aplicação da regra da alavanca nas curvas dilatométricas, dos diferentes microconstituintes presentes no aço em estudo, em função da temperatura, para as taxas de aquecimento de utilizadas. Nota-se que a perlita se dissolve rapidamente para as taxas de aquecimento utilizadas, sendo necessária uma variação de temperatura de, aproximadamente, 25°C para que a dissolução ocorra por completo, para todas as taxas. Observa-se que quanto maior a taxa de aquecimento, menor é a quantidade de perlita presente inicialmente, o que é incoerente com os dados experimentais, pois a liga apresenta uma fração de 0,27 de perlita. Esta inconsistência pode estar associada à rápida dissolução da perlita e ao fato de que o sistema de aquisição de dados do dilatômetro não adquire pontos experimentais suficientes para compensar a incerteza que ocorre no uso da regra da alavanca. O intervalo de tempo necessário para que ocorra a dissolução da perlita, para todas as taxas de aquecimento, foi em média 14,7% do intervalo de tempo necessário para completar a austenitização do aço por completo.

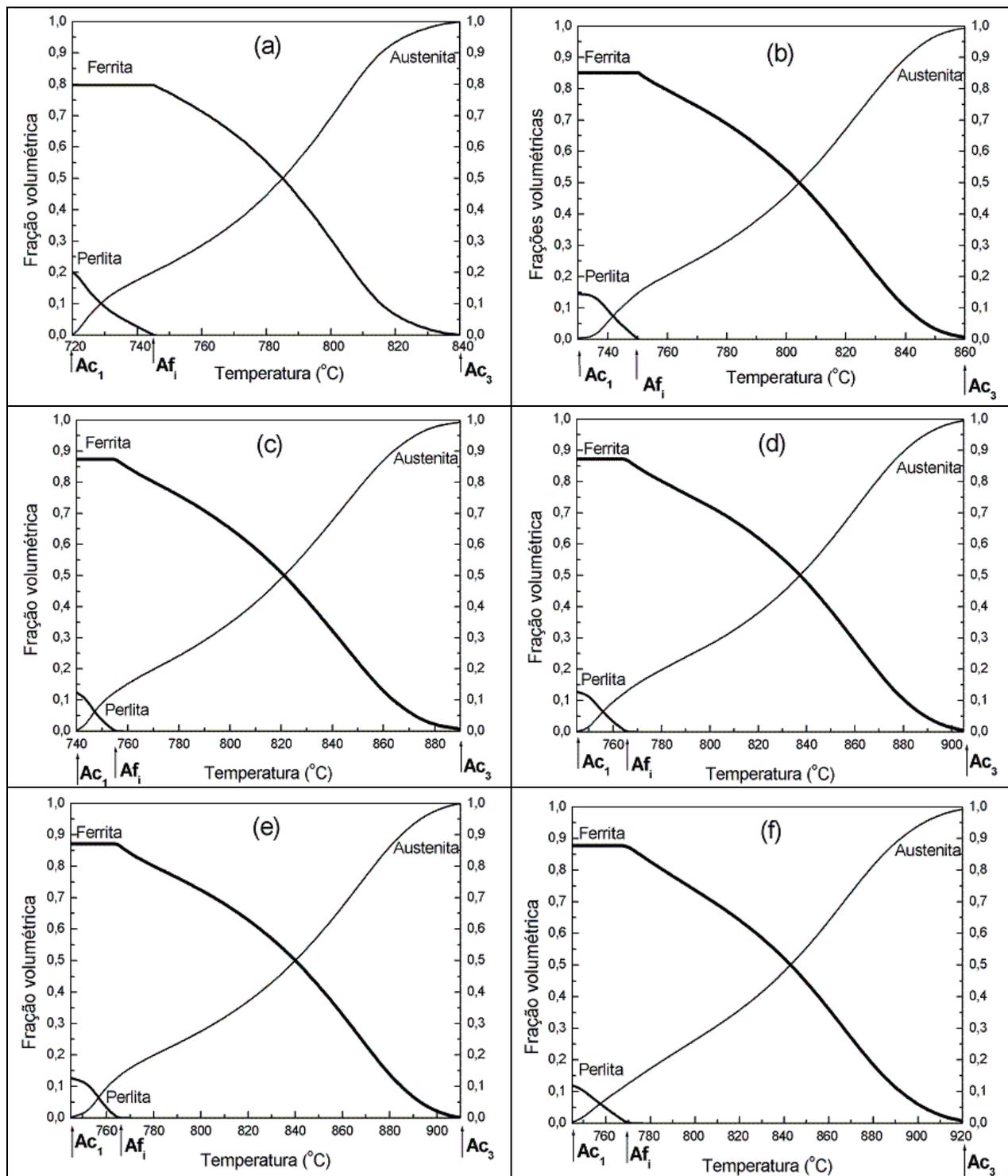


Figura 3. Frações volumétricas dos diferentes microconstituintes obtidas pela regra da alavanca, em função da temperatura, para as taxas de aquecimento de: a) $0,1^{\circ}\text{C/s}$; b) $1,0^{\circ}\text{C/s}$; c) $5,0^{\circ}\text{C/s}$; d) $10,0^{\circ}\text{C/s}$; e) $13,0^{\circ}\text{C/s}$; f) $16,0^{\circ}\text{C/s}$.

A Figura 4 mostra as frações volumétricas dos diferentes microconstituintes presentes no aço em estudo, em função da temperatura, para as taxas de aquecimento de utilizadas.

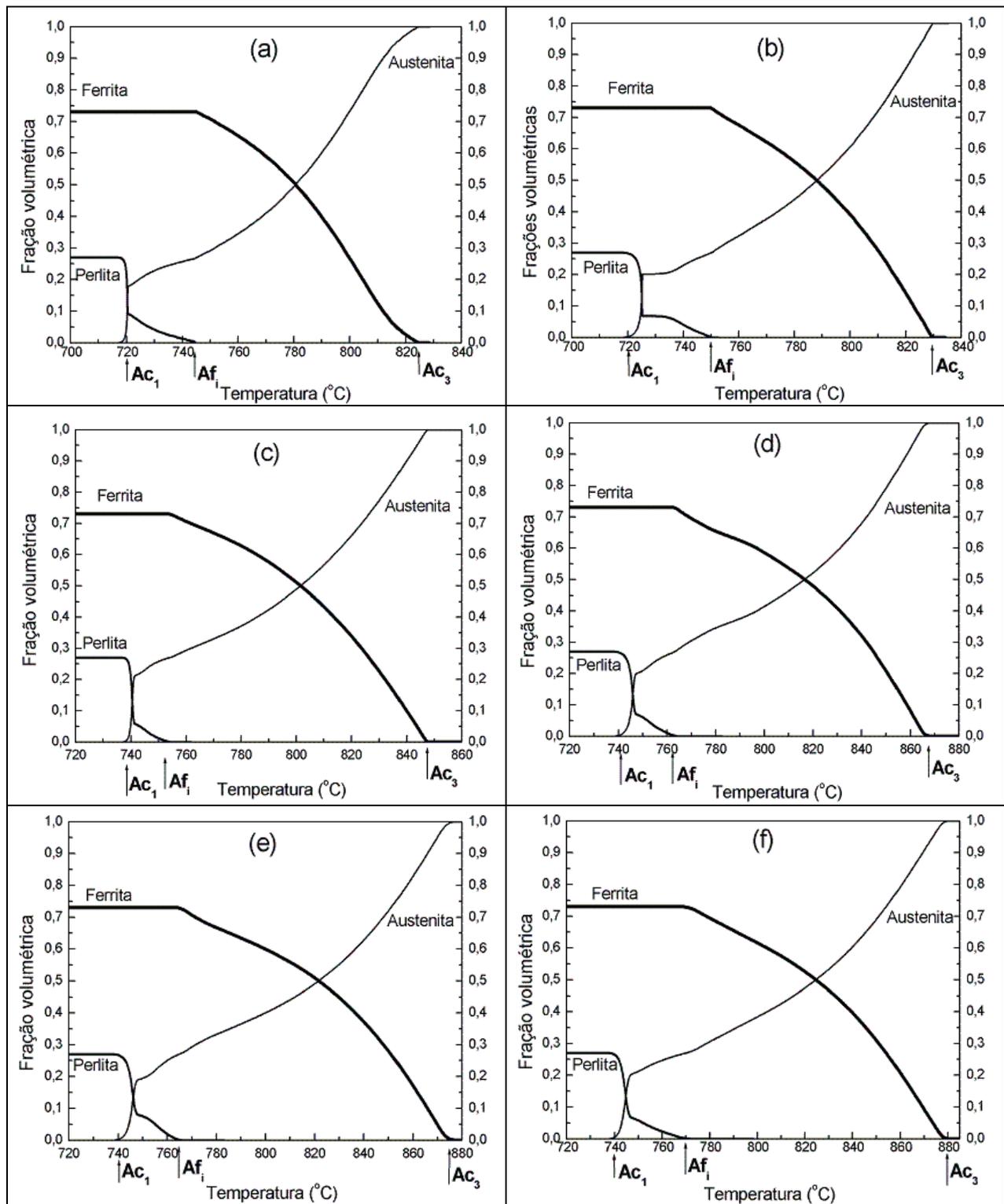


Figura 4. Frações volumétricas dos diferentes microconstituintes obtidas pelo modelamento, em função da temperatura, para as taxas de aquecimento de: a) 0,1°C/s; b) 1,0°C/s; c) 5,0°C/s; d) 10,0°C/s; e) 13,0°C/s; f) 16,0°C/s.

Observa-se que as curvas são similares às obtidas pelo método da regra da alavanca. Os intervalos de tempo necessários para que a perlita se dissolva, para todas as taxas de aquecimento, foi em média 19,8% do intervalo de tempo necessário para austenitizar o aço por completo.

Verifica-se que o processo de formação da austenita, a partir de uma microestrutura inicial constituída de ferrita proeutetóide e perlita, é controlado principalmente pela transformação da ferrita proeutetóide em austenita.

A Figura 5 mostra as curvas da fração de austenita formada, em função do tempo, no aquecimento contínuo, a diferentes taxas de aquecimento, determinados pela regra da alavanca e pelo modelamento, respectivamente. As curvas foram utilizadas para determinar os parâmetros K e n da equação de Johnson-Mehl-Avrami.

A partir dos valores das frações de austenita transformada como uma função do tempo, os parâmetros K e n desta equação foram determinados por regressão linear, ajustando-se a equação aos dados experimentais.

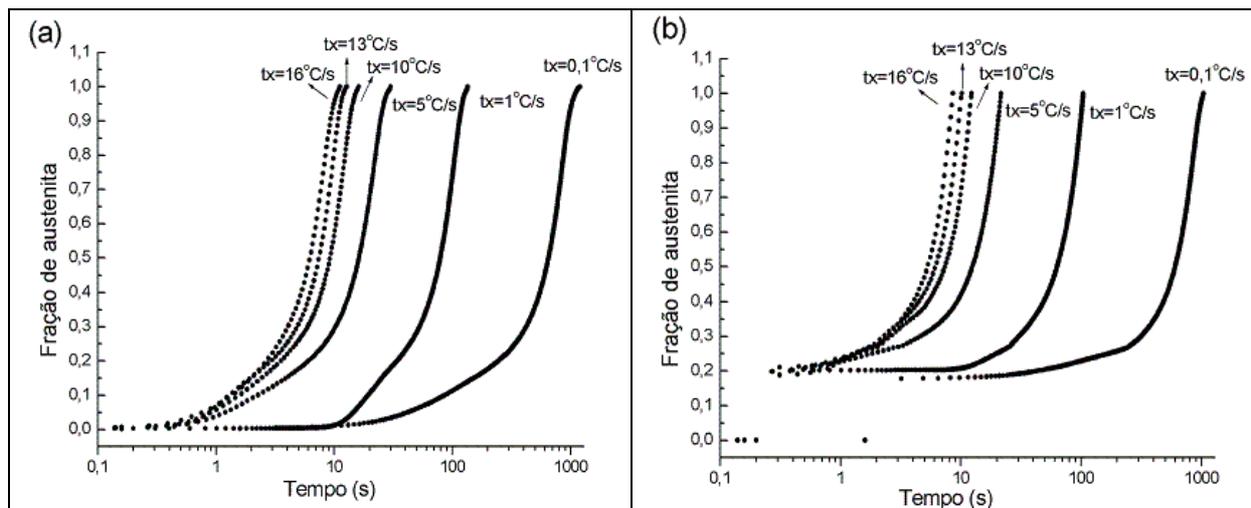


Figura 5. Fração volumétrica de austenita formada, em função do intervalo de tempo de transformação, para as diferentes taxas de aquecimento: a) determinada pela regra da alavanca; b) determinada pelo modelamento.

A Figura 6 mostra o parâmetro K com uma função da taxa de aquecimento, para a formação da austenita, cujas frações obtidas pela aplicação da regra da alavanca às curvas dilatométricas e pelo modelamento. Observa-se que o parâmetro K aumenta com a taxa de aquecimento, o que implica em uma maior taxa de nucleação e crescimento desta fase. Este parâmetro representa a influência da taxa de aquecimento sobre as taxas de nucleação e crescimento da austenita, isto é, sobre a taxa de formação da austenita.

A Figura 7 mostra a variação do parâmetro n com a taxa de aquecimento para a formação da austenita, cujas frações foram determinadas através da aplicação da regra da alavanca às curvas dilatométricas e do modelamento. Observa-se que o valor de n praticamente independe da taxa de aquecimento e seu valor médio é de 1,44 quando se determina a fração de austenita utilizando a regra da alavanca e de 0,67 quando determinada pelo modelamento. O valor de 1,44 é similar ao reportado por Oliveira et al.^[1] A independência de n com a taxa de aquecimento reflete o fato de que este parâmetro é função do tipo de transformação de fase no estado sólido. Esta diferença no valor de n pode estar relacionada à partição de carbono, que precisa ser considerada no modelamento.

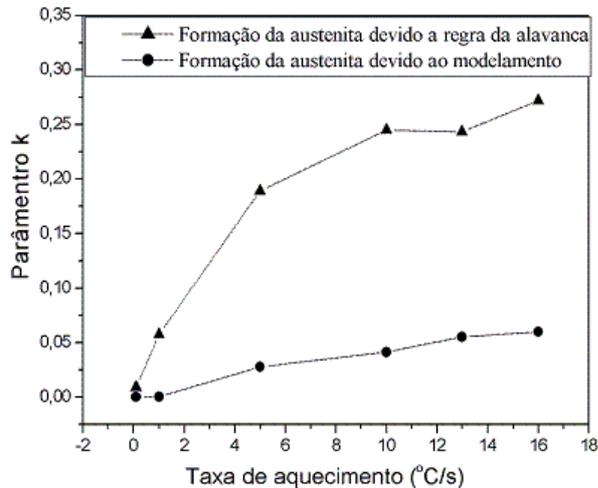


Figura 6. Parâmetro K em função da taxa de aquecimento (°C/s), para a formação da austenita.

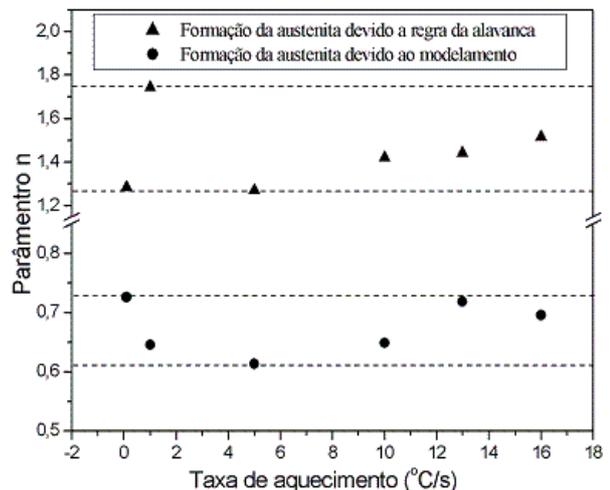


Figura 7. Parâmetro n em função da taxa de aquecimento (°C/s), para a formação da austenita.

4 CONCLUSÕES

Observou-se que o parâmetro K da equação de Johnson-Mehl-Avrami associado à cinética de austenitização aumenta com a taxa de aquecimento. Quanto maior a taxa de aquecimento mais rápida é a cinética de formação da austenita, o que implica em uma maior taxa de nucleação e crescimento desta fase.

O parâmetro n da equação de Johnson-Mehl-Avrami é praticamente independente da taxa de aquecimento e seu valor médio é de 1,44 para os cálculos utilizando a regra da alavanca e 0,67 para o modelamento.

A formação da austenita, a partir de uma microestrutura inicial constituída de ferrita proeutetóide e perlita, é controlada principalmente pela transformação da ferrita primária em austenita.

O ajuste da equação de Johnson-Mehl-Avrami foi bem sucedido, e mostra-se uma ferramenta importante e rápida para o estudo da cinética de transformações de fases nos aços.

Agradecimentos

CNPq e FAPEMIG, pelo financiamento do projeto.

REFERÊNCIAS

- 1 OLIVEIRA, F.L.G, et al. Kinetics of austenite formation during continuous heating in a low carbon steel, *Materials Characterization*, v.58, p.256-261, 2007.
- 2 COTA, A.B. et al., Effect of the Austenitizing Temperature on the Kinetics of Ferritic Grain Growth under Continuous Cooling of a Nb Microalloyed Steel, *Scripta Materialia*, v.51, p.721-725, 2004.
- 3 CABALLERO, F. G., et al., Modelling of Kinetics of Austenite Formation in Steels with Different Initial Microstructures, *ISIJ International*, v. 41, no.10, p.1093-1102, 2001.
- 4 GARCIA DE ANDRÉS, C. et al., Application of Dilatometric Analysis to the Study of Solid-Solid Phase Transformation in Steels, *Materials Characterization*, v.48, p.101-111, 2002.

- 5 ZHAO, J.Z. et al., Kinetics of Phase Transformations in Steels: A New Method for Analyzing Dilatometric Results, *ISIJ International*, v.41, p.492-497, 2001.
- 6 ZHAO, J.Z. et al., Calculation of the phase transformation kinetics from a dilatation curve, *Journal of Materials Processing Technology*, v.129, p.345-348, 2002.
- 7 KOP, T.A., et al., Dilatometric analysis of phase transformations in hypo-eutectoid steels, *Journal of Materials Science*, v.36, p.519– 526, 2001.
- 8 GOMEZ, M. ET AL., Modelling of Phase Transformation Kinetics by Correction of Dilatometry Results for a Ferritic Nb-microalloyed Steel, *ISIJ International*, v.8, p.1228-1237, 2003.
- 9 OLIVEIRA, F.L.G, Estudo da Cinética de Formação da Austenita no Aquecimento Contínuo em um Aço Microligado com Nb, *Dissertação de Mestrado, REDEMAT, UFOP*, 90p, 2005.