

## Influência da temperatura de austenitização sobre a cinética de formação da ferrita em um aço microligado com Nb

André Barros Cota

*Professor Adjunto do DEFIS/ICEB/UFOP e da REDEMAT/UFOP. E-mail: abcota@iceb.ufop.br*

Cássio Antônio Mendes Lacerda

*Mestrando da REDEMAT/UFOP*

Fernando Lucas Gonçalves e Oliveira

*Aluno de Física/ICEB/UFOP e bolsista da FAPEMIG*

Fernando Gabriel Silva Araújo

*Professor Adjunto do DEFIS/ICEB/UFOP e da REDEMAT/UFOP*

### Resumo

O efeito da temperatura de austenitização sobre a cinética de transformação da austenita em um aço microligado com Nb foi estudado em resfriamento contínuo através da análise térmica diferencial. Verifica-se uma forte dependência da temperatura de início de formação da ferrita alotriomórfica com a temperatura de austenitização devido ao seu efeito sobre o tamanho de grão austenítico. O aumento da temperatura de austenitização implica um aumento no tamanho de grão austenítico e uma diminuição na temperatura de início de transformação da austenita em ferrita. A presença de Nb em solução durante a transformação aumenta o tempo de transformação da austenita em ferrita alotriomórfica, reduz a taxa efetiva de transformação, levando à formação de bainita granular para temperatura de austenitização de 1100°C e resfriamento no ar.

**Palavras-chave:** aço microligado ao Nb, microestrutura austenítica, transformações de fase, cinética de transformação.

### Abstract

*The effect of austenitization temperature on austenite transformation for a low-carbon steel and microalloyed with Nb was investigated under continuous cooling conditions by means of differential thermal analysis. The starting temperature for ferrite formation depends strongly on austenitization temperature due to its effect on the austenite grain size. Increase in austenitization temperature implies increase in austenite grain size and decrease in temperature starts ferrite formation. The presence of Nb in solution during the transformation increases the transformation time of austenite to ferrite and reduces its effective transformation rate, leading to the formation of granular bainite, at the austenitization temperature of 1100°C and air cooling.*

**Keywords:** Nb microalloyed steel, austenite microstructure, phase transformation, transformation kinetics.

Artigo recebido em 11/09/2002 e aprovado em 22/10/2002.

# 1. Introdução

A cinética de transformação de fase da austenita em ferrita em aços é o resultado de uma complexa combinação de processos de nucleação e crescimento. A microestrutura resultante depende de um grande número de parâmetros, como a condição austenítica antes da transformação, a taxa de resfriamento, etc. A influência desses parâmetros sobre a cinética de transformação austenítica tem sido estudada através do desenvolvimento de modelos, que geralmente necessitam ser comparados com os resultados experimentais<sup>[1,2]</sup>.

O estudo da cinética da transformação da austenita em ferrita em resfriamento contínuo é essencial para se prever a microestrutura e as propriedades mecânicas dos aços. Várias técnicas podem ser utilizadas, tais como a dilatométrica com deformação<sup>[3,4]</sup> ou sem deformação<sup>[3]</sup>, ensaios de compressão a quente com análise térmica diferencial<sup>[5]</sup> e ensaios de torção com análise térmica diferencial<sup>[6]</sup>. Essas técnicas são complementadas pela análise metalográfica.

A temperatura de início de transformação da austenita em ferrita ( $Ar_3$ ) é influenciada pelo estado de deformação da austenita, pela taxa de resfriamento e pelo tamanho de grão austenítico<sup>[4,7-9]</sup>. Manohar et al.<sup>[4]</sup> estudaram os efeitos do processamento termomecânico, da taxa de resfriamento e do conteúdo de Nb sobre a cinética de transformação da austenita em ferrita em aços microligados com Ti, Nb e Mo. Eles observaram que o processamento termomecânico acelera o início da transformação  $\gamma/\alpha$  e aumenta a temperatura  $Ar_3$ , e que o Nb

diminui a temperatura  $Ar_3$  em amostras não deformadas, mas aumenta a temperatura  $Ar_3$  em amostras deformadas. Pernalba et al.<sup>[9]</sup> verificaram que um maior tamanho de grão austenítico prévio implica uma maior temperatura  $Ar_3$ , o que contradiz o resultado esperado, quando se analisa a cinética de formação da ferrita a partir de grãos austeníticos não deformados.

No presente trabalho, foi estudada a influência da temperatura de austenitização sobre a cinética de formação e evolução microestrutural da ferrita, através de análise térmica das curvas de resfriamento, de amostras de um aço de baixo carbono e microligado com Nb.

## 2. Procedimento Experimental

A composição química do aço usado nesse trabalho é dada na Tabela 1. Esse aço é microligado com Nb e tem baixo teor de carbono. Para o monitoramento e aquisição dos dados dos perfis térmicos de resfriamento, um termopar foi inserido no centro das amostras e foi ligado a uma interface instalada em um microcomputador.

As amostras foram austenitizadas a 900, 1000 e 1100°C durante 30 minutos e resfriadas utilizando duas taxas de resfriamento: no forno com taxa de  $-0,03^\circ\text{C}/$

s e no ar com taxa de  $-2,1^\circ\text{C}/\text{s}$ . As temperaturas de início e fim de formação da ferrita,  $Ar_3$  e  $Ar_1$ , respectivamente, foram determinadas através da análise térmica do gráfico  $dT/dt$  versus  $T$ . As taxas de resfriamento foram medidas no intervalo de temperatura entre 500 e 800°C.

A caracterização microestrutural foi desenvolvida através da microscopia ótica (MO) e eletrônica de varredura (MEV). Três amostras foram temperadas a partir das temperaturas de austenitização para a determinação do tamanho médio do grão austenítico, cujos contornos foram revelados através do ataque químico com o reativo picral mais sabão tensoativo.

## 3. Resultados e Discussão

### Tamanho de grão austenítico

A Figura 1 mostra as fotomicrografias das amostras austenitizadas a 900, 1000 e 1100°C por 30min e temperadas em água gelada a partir dessas temperaturas. A microestrutura destas amostras é essencialmente martensítica e o ataque com picral revelou os contornos austeníticos. A Figura 2 mostra os valores dos tamanhos de grãos austeníticos medidos em função da temperatura de

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



Figura 1 – Fotomicrografias revelando os contornos de grão austenítico, para as temperaturas de austenitização de a) 900, b) 1000 e c) 1100°C.

austenitização. Para a amostra austenitizada a 1100°C, verificamos que o tamanho de grão é muito maior que o das amostras austenitizadas a temperaturas mais baixas. Esse fato está relacionado à maior quantidade de Nb em solução (30,2% do Nb total), o que diminui o efeito dos precipitados de carbonitretos de Nb em inibir o crescimento dos grãos de austenita<sup>[3,4]</sup>.

## Temperaturas de transformações de fase

A Figura 3 mostra o perfil térmico durante o resfriamento e suas correspondentes derivadas para a taxa de resfriamento  $\dot{T} = -2,1^\circ\text{C/s}$  (no ar), para a temperatura de austenitização  $T_\gamma = 900^\circ\text{C}$ . Observa-se nessa figura uma clara deflexão na velocidade de resfriamento (picos locais) e que deve estar associada com uma reação de transformação da austenita em ferrita. Estão indicadas também na figura as temperaturas de início de transformação,  $Ar_3$ , e de fim de transformação,  $Ar_1$ , da austenita em ferrita.

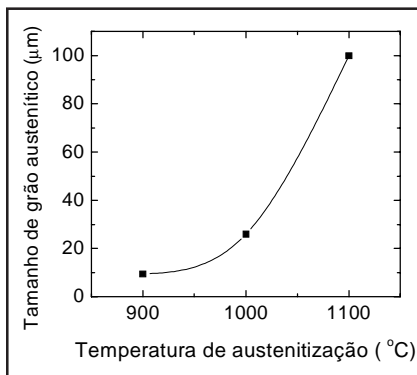


Figura 2 – Tamanho de grão médio austenítico em função da temperatura de austenitização.

A Figura 4 mostra o gráfico das temperaturas de transformações versus a temperatura de austenitização para as diferentes taxas de resfriamento usadas. Observa-se nessa figura que as temperaturas  $Ar_3$  diminuem com o aumento da taxa de resfriamento para as três temperaturas de austenitização. Esse resultado está de acordo com os resultados relatados na literatura, pois a temperatura  $Ar_3$  reflete a quantidade de força motriz termodinâmica requerida para iniciar a transformação difusional da austenita em ferrita. O aumento da taxa de resfriamento implica a necessidade do aumento dessa força motriz, o que implica uma diminuição da temperatura  $Ar_3$ .

Na Figura 4, observa-se que um aumento da temperatura de austenitização diminui sensivelmente a temperatura  $Ar_3$  para as amostras resfriadas no ar, sendo esse efeito muito pequeno para as amostras resfriadas no forno. Esse fato está relacionado com o efeito da temperatura de austenitização sobre o tamanho de grão austenítico. Uma maior temperatura de austenitização acarreta um tama-

nho de grão médio austenítico maior e, conseqüentemente, uma área superficial de contorno por unidade de volume menor, diminuindo o número de sítios potenciais para a nucleação da ferrita no contorno de grão. Assim, um aumento no tamanho de grão austenítico leva à necessidade de aumento da força motriz termodinâmica para a nucleação, o que implica uma diminuição da temperatura  $Ar_3$ . Penalba et al.<sup>[9]</sup> relatam um resultado em que um maior tamanho de grão austenítico implica uma maior temperatura  $Ar_3$ .

Para validar as determinações das temperaturas de início de transformação da fase austenita em ferrita no resfriamento contínuo, amostras foram austenitizadas e o resfriamento no ar foi interrompido por têmpera nas correspondentes temperaturas  $Ar_3$ . A seguir, foi feita uma análise da microestrutura resultante usando o ataque com nital 2%, o que permitiu a distinção entre os grãos ferríticos presentes até o momento da têmpera e a austenita não transformada, que se transforma, subseqüentemente, em

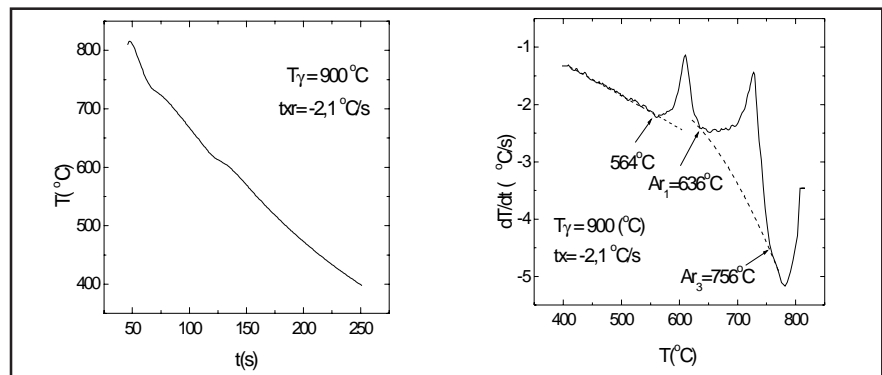


Figura 3 – Curva de resfriamento e de sua derivada ( $dT/dt$  versus  $T$ ), com a indicação das temperaturas de transformação, para amostras resfriadas no ar.

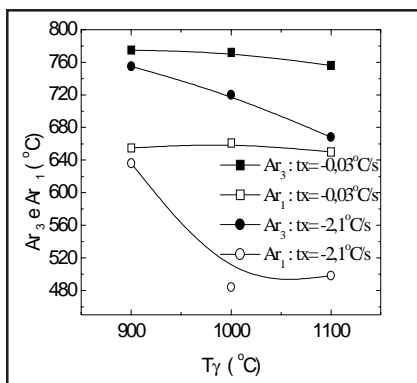


Figura 4 - Temperaturas de transformação da austenita em função da temperatura de austenitização ( $T_\gamma$ ) e das duas taxas de resfriamento ( $\dot{T}$ ) usadas.

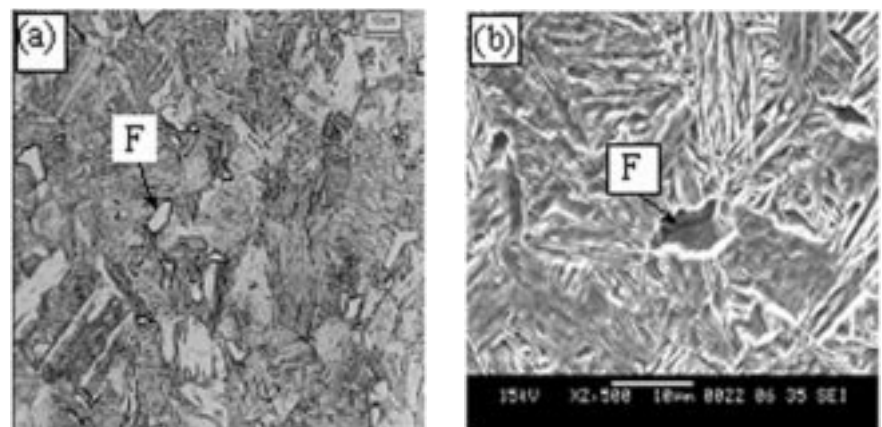


Figura 5 - Amostra austenitizada a 900°C, resfriada no ar e temperada em 756°C: a) MO e b) MEV. F-Ferrita poligonal.

martensita. A Figura 5 mostra fotomicrografias óptica e eletrônica de varredura de uma amostra austenitizada a 900°C, resfriada ao ar e temperada a partir de  $Ar_3=756^\circ\text{C}$ , revelando uma fração volumétrica de aproximadamente 4% de ferrita.

## Cinética de formação da ferrita

A cinética de transformação da austenita em ferrita pode ser quantificada em termos de dois parâmetros:  $Ar_3$ , que é um parâmetro da nucleação para a transformação, e  $\tau$  (tempo de transformação), que mede a taxa de progresso da transformação<sup>[4]</sup>.

O efeito da taxa de resfriamento e do tamanho médio de grão austenítico sobre o tempo de transformação é dado na Figura 6. Os dados indicam que o tempo de transformação diminui quando a taxa de resfriamento aumenta, ou seja, o progresso da transformação torna-se mais rápido quando a taxa de resfriamento aumenta. Observa-se também que um aumento na temperatura de austenitização acarreta um aumento significativo no tempo de transformação apenas para as amostras resfriadas no ar.

O aumento da temperatura de austenitização causa um retardo no início da transformação da austenita em ferrita ( $\gamma/\alpha$ ) pela diminuição da temperatura  $Ar_3$  (Figura 4) e significativamente retarda o progresso da transformação, ou seja, aumenta o tempo de transformação (Figura 6). Esses resultados podem ser ex-

plicados quando se analisa o efeito do Nb dissolvido sobre o início da transformação  $\gamma/\alpha$ <sup>[4]</sup>. Um aumento na temperatura de austenitização acarreta um aumento na quantidade de Nb em solução e em um maior tamanho médio de grão austenítico. No resfriamento, o Nb em solução segrega na interface austenita-ferrita e, devido ao efeito de arraste de soluto, retarda o início da transformação  $\gamma/\alpha$ , ou seja, diminui a temperatura  $Ar_3$ .

O efeito do Nb sobre o tempo de transformação foi analisado comparando os tempos de transformação do aço com Nb austenitizado a 1000°C (tamanho de grão austenítico de 26 $\mu\text{m}$ ), com um aço sem Nb, mas de composição química similar ao aço com Nb, austenitizado a 950°C (tamanho de grão austenítico de 26 $\mu\text{m}$ ), resfriados no ar. Sem o efeito do tamanho de grão austenítico, verifica-se que o aço com Nb tem um tempo de transformação de 136s e o aço sem Nb de 50s, ou seja, o Nb em solução tem um efeito de retardar o progresso da transformação da austenita em ferrita, devido a sua segregação no contorno de fase austenita-ferrita e ao efeito de arraste de soluto. Resultados similares foram reportados por Manohar et al.<sup>[4]</sup>.

## Evolução microestrutural

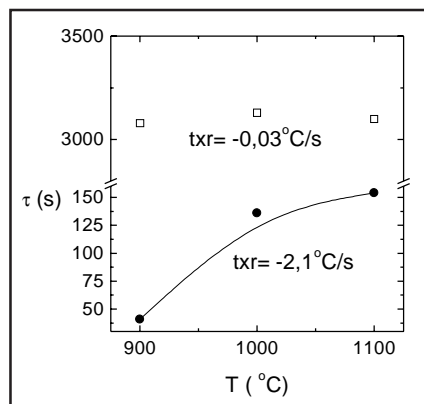
As amostras austenitizadas a 900 e 1000°C por 30min e resfriadas no forno e no ar têm uma microestrutura constituída essencialmente de ferrita e perlita. A amostra austenitizada a 1100°C por 30min e resfriada no ar tem uma microestrutura

mais complexa e a Figura 7 mostra as fotomicrografias ótica e eletrônica de varredura dessa amostra. Observa-se que a microestrutura dessa amostra é constituída de ferrita e bainita granular, segundo a classificação de Krauss et al<sup>[10]</sup>. O tamanho médio de grão austenítico é de 100 $\mu\text{m}$  e, como a nucleação da ferrita ocorre no contorno de grão de austenita, quanto maior o tamanho de grão austenítico menor é a área superficial do contorno por unidade de volume, diminuindo o número de sítios potenciais para a nucleação da ferrita, o que favorece a formação da bainita granular. Os grãos ferríticos nucleiam no contorno de grão austenítico, formando uma rede, e a bainita granular se forma dentro desta.

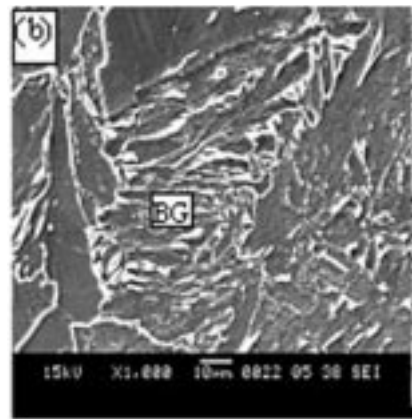
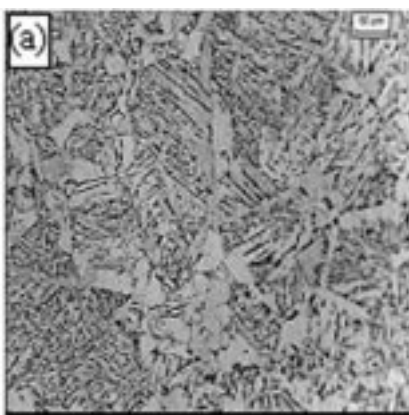
## 4. Conclusões

A variação da temperatura de austenitização afeta sensivelmente a temperatura de início de transformação da austenita,  $Ar_3$ , para o resfriamento no ar. Observa-se que um aumento na temperatura de austenitização acarreta um aumento no tamanho de grão austenítico e uma diminuição na temperatura  $Ar_3$ .

Os dados indicam que o tempo de transformação diminui quando a taxa de resfriamento é aumentada, ou seja, o progresso da transformação torna-se mais rápido quando a taxa de resfriamento aumenta. Observa-se também que um aumento na temperatura de austenitização acarreta um aumento no tempo de transformação para as amostras resfriadas no ar. O Nb em solução, durante a



**Figura 6** – Efeito da temperatura e taxa de resfriamento sobre o tempo de transformação.



**Figura 7** - Amostras austenitizadas a 1100°C resfriadas no ar: a) MO (1000X) e b) MEV. BG–Bainita granular.

transformação, tem o efeito de retardar o progresso da transformação da austenita em ferrita, devido a sua segregação no contorno de fase austenita-ferrita e ao efeito de arraste de soluto.

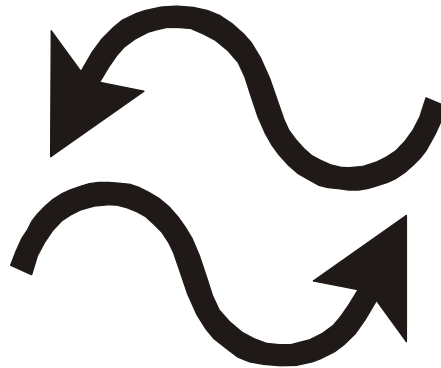
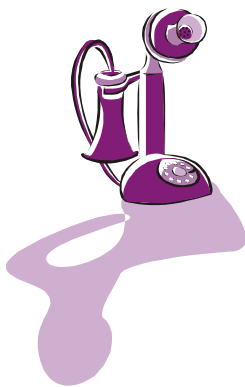
A amostra austenitizada a 1100°C e resfriada no ar apresenta uma microestrutura constituída de ferrita e bainita granular, com tamanho de grão austenítico de 100µm.

## Agradecimentos

Os autores agradecem à Fundação Gorceix e à FAPEMIG pelo suporte financeiro a esse trabalho.

## Referências bibliográficas

1. THOMPSON, S.W. et al. Austenite decomposition during continuous cooling of a HSLA-80 Plate Steel, *Metallurgical and Materials Transactions A*, 27A, p. 1557-1571, 1996.
2. VELTHUIS, S.G.E. et al. A three-dimensional model for the development of the microstructure in steel during slow cooling, *Materials Science and Engineering*, A277, p. 218-228, 2000.
3. SMITH, Y.E., SIEBERG, C.A. Continuous cooling transformation kinetics of thermomechanically worked low-carbon austenite, *Metallurgical Transactions*, v. 2, p. 1711-1725, June 1971.
4. MANOHAR, P.A. et al. Continuous cooling transformation behavior of microalloyed steels containing Ti, Nb, Mn and Mo, *ISIJ International*, v. 36, n. 12, p. 1486-1493, 1996.
5. KASPAR, R. et al. Determination of CCT diagrams by thermal analysis after simulated hot deformation processes, *Steel Research*, n. 1, p. 557-562, 1986.
6. COTA, A.B., MODENESI, P.J., BARBOSA, R., SANTOS, D. B. Determination of CCT diagrams by thermal analysis of a HSLA bainitic steel submitted to thermomechanical treatment, *Scripta Materialia*, v. 40, n. 2, p. 165-169, 1999.
7. BAI, S. et al. Continuous cooling transformation temperatures determined by compression tests in low carbon bainitic grades, *Metallurgical and Materials Transactions A*, v. 29A, p. 989-1001, March 1998.
8. COLLINS, L.E. et al. Accelerated cooling of a Nb-V microalloyed plate steel, In: Proc. of Accelerated Cooling of Rolled Steels, 1987, Winnipeg, *Anais... Winnipeg: Pergamon Press*, 1987, p. 57-70.
9. PENALBA, F. et al. Austenitic grain size evolution and continuous cooling transformation diagrams in vanadium and titanium microalloyed steels, *Journal of Materials Science*, v.31, p. 3847-3852, 1996.
10. KRAUSS, G., THOMPSON, S.W. Ferritic microstructures in continuously cooled low-and ultralow-carbon steels, *ISIJ International*, v. 35, n. 8, p.937-945, 1995.



**Se é assim que você se comunica com sua revista técnica...  
Está na hora de você mudar.**

**REM - Revista Escola de Minas**  
**a mais antiga revista técnica do setor metalúrgico da América do Sul**