cbecimat26
26° Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais
22 a 26 de novembro de 2026
Costão do Santinho
Florianópolis-SC

Efeito da Taxa de Resfriamento e da Composição Química na Formação de Nanocarbonetos em Aços Microligados ao Nb

Daniel G. S. Santos[1]; Renan A. F. Dias[1]; Vinicius C. Ottani[2]; José B. Bacalhau[2]; Jitendra Patel[2] ; Conrado R. M. Afonso[1]

[1] Laboratório BioMet-CAM, Departamento de Engenharia de Materiais (DEMa), Universidade Federal de São Carlos (UFSCar), 13565-905, São Carlos/SP, Brasil;

[2] Companhia Brasileira de Metalurgia e Mineração (CBMM), 04552-060, São Paulo/SP, Brasil.

Introdução

Aços microligados ao Nb e V apresentam aumento da resistência mecânica devido ao endurecimento por precipitação de carbonetos nanométricos na matriz ferrítica [1]. Entretanto, sua caracterização cristalográfica representa um desafio particularmente em aços com teores baixos de Nb, devido à formação de precipitados muito finos nanométricos, à fração volumétrica e à influência da orientação cristalográfica em relação à matriz ferrítica [2,3]. Sua formação e distribuição são também influenciadas pela composição química e pelas condições de processamento, especialmente pela taxa de resfriamento durante a laminação.

Objetivos

Este trabalho tem como objetivo investigar a influência da composição química e da taxa de resfriamento na formação e distribuição de nanocarbonetos em aços microligados ao Nb e V, empregando uma abordagem correlativa e multiescala de microscopia eletrônica (MEV, EBSD e MET) para sua caracterização microestrutural e cristalográfica.

Metodologia

Amostras de aço, contendo diferentes composições químicas e resfriadas a 0,14°C/s e 0,80°C/s, foram submetidas à preparação metalográfica e caracterizadas por MEV e EBSD, para seleção de regiões de interesse. Lamelas foram extraídas por feixe de íons focalizado (FIB) e analisadas por MET, utilizando imagens em campo claro, campo escuro, difração de elétrons em área selecionada (SAED) e microscopia eletrônica de transmissão de alta resolução (HRTEM). Transformadas Rápidas de Fourier (FFT) foram empregadas para análise dos espaçamentos interplanares e das relações cristalográficas dos precipitados.

Tabela 1. Composição química dos aços (% em massa; Nb e V em ppm).

Aço	C	Mn	Nb (ppm)	V (ppm)
CMn	0,18	1,16	–	–
Nb	0,18	0,98	100	–
V	0,18	0,98	–	230
Nb+V	0,18	0,97	80	230

Resultados e Discussão

Nas amostras de CMn de ambas as taxas de resfriamento, as imagens de campo claro não apresentam regiões com precipitados e a indexação da SAED confirma apenas a presença de ferrita nas amostras. Nas amostras com diferentes combinações de Nb e V, as imagens de DF demonstram a presença de precipitados e a análise das imagens de HRTEM e suas respectivas FFTs confirmam suas composições.

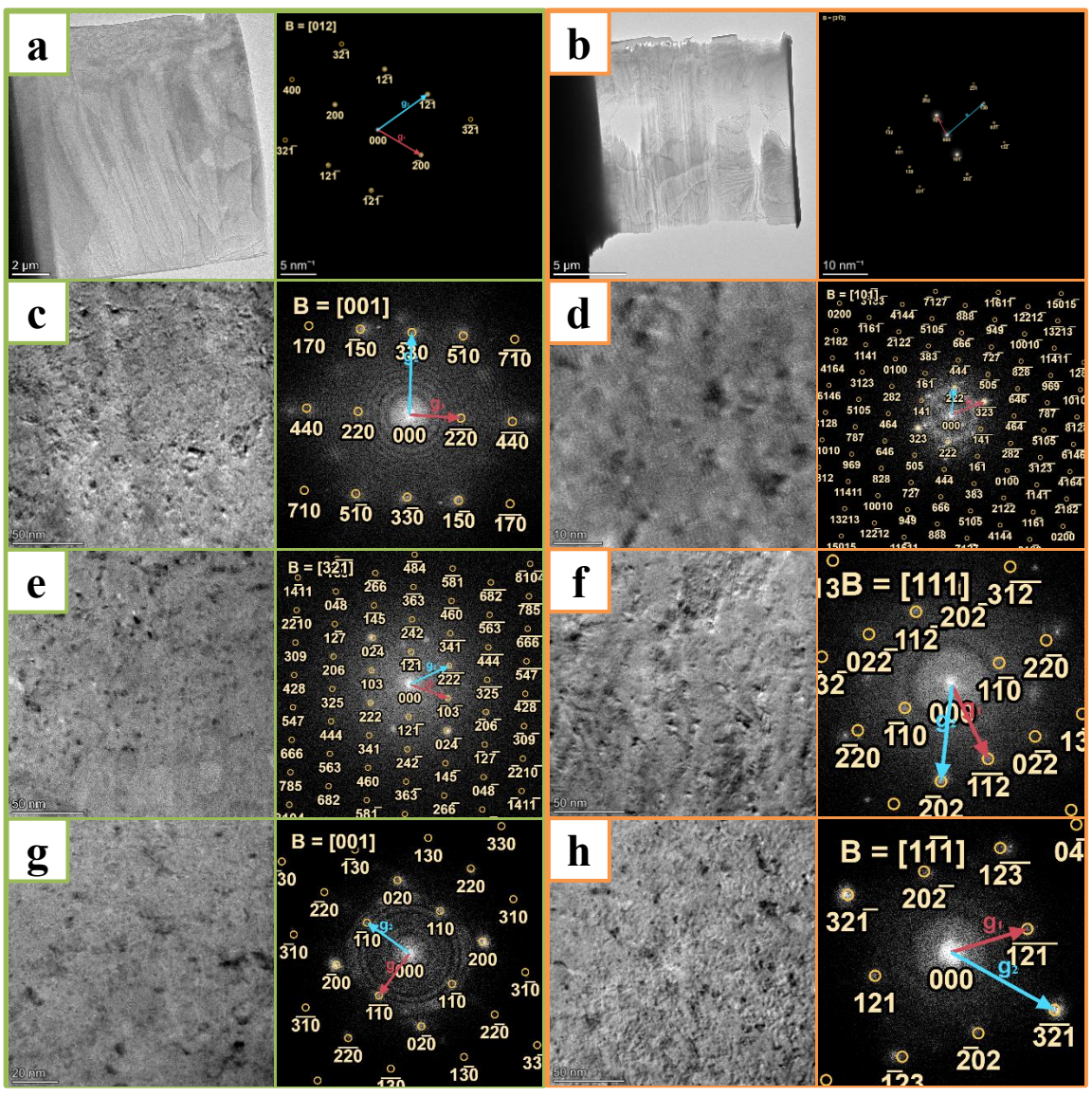


Figura 1. Resultados de microscopia eletrônica de transmissão em campo claro dos aços CMn e SAED indexado da ferrita (a – b). Resultados de HRTEM e indexação da respectiva FFT dos aços contendo apenas Nb (c – d), apenas V (e – f) e contendo Nb e V (g – h).

O destaque em verde indica a taxa de resfriamento de 0,14°C/s e em laranja, a taxa de resfriamento de 0,80°C/s.

Conclusões

Nas amostras de aço CMn, observou-se apenas o comportamento da ferrita, com as imagens de campo claro (BF) monstrando a ausência de precipitados nanométricos. Nas amostras contendo apenas Nb ou V ou contendo ambos, os resultados de HRTEM identificaram a presença de precipitados nanométricos (2~10 nm) de carbonetos de nióbio (NbC) ou vanádio (VC), indexados via SAD e FFT e pela através de relações de orientação comuns entre a ferrita (Fe-α) e precipitados do tipo MC.

Sob taxas de resfriamento mais baixas de 0,14°C/s, foram observados precipitados mais finos, geralmente entre 2 e 7 nm. Já sob taxas maiores de 0,80°C/s, observou-se uma faixa de 5 a 10 nm. Não houve efeito sobre a morfologia dos precipitados, sendo esta majoritariamente esférica.

Referências e Agradecimentos

[1] GLADMAN, T. The Physical Metallurgy of Microalloyed Steels. London: 1997.

[2] TAKAHASHI, J. et al. Scripta Materialia, v. 63, p. 261–264, 2010.

[3] WANG, Y. et al. Materials Characterization, v. 184, 111657, 2022.

This research was supported by CBMM/FAI/UFSCar, project FAPESP PAIP 2023/16836-2 and financed in part by the Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Finance Code 001. The authors thank (LCE/DEMa/UFSCar) for the general facilities.