

## EFEITO DA TÊMPERA NA REGIÃO INTERCRÍTICA DE UM AÇO MICROLIGADO COM NIÓBIO APÓS FORJAMENTO

Pedro Gabriel Bonella de Oliveira<sup>1</sup>  
Rosana Vilarim da Silva<sup>2</sup>  
André Itman Filho<sup>3</sup>

### Resumo

A produção de componentes com aços microligados pela técnica de forjamento exige tratamentos térmicos para obtenção das propriedades especificadas pelas normas. Associadas à fabricação dos produtos forjados, a adição de nióbio é um fator importante como refinador de grão, modificador da microestrutura e propriedades mecânicas do aço. Considerando os efeitos do nióbio e as temperaturas de tratamento térmico o objetivo desta pesquisa foi a fabricação de barras forjadas de um aço microligado com nióbio com secção quadrada de 40 mm. Estas barras foram recozidas a 930 °C e submetidas aos tratamentos de têmpera a 855, 900 e 1000 °C. O modelo de Kasatkin foi utilizado para selecionar as temperaturas de aquecimento no interior, próxima e acima da região intercrítica do aço. Após o resfriamento em água, as microestruturas do aço foram observadas e correlacionadas às medidas de dureza. Os resultados comprovam a validade do modelo de Kasatkin e o efeito do nióbio no tamanho de grão e na microestrutura do aço microligado forjado.

**Palavras-chave:** Aço forjado; Aço microligado com nióbio; Modelo de Kasatkin.

## EFFECT OF TEMPERATURE IN THE INTERCRITICAL REGION OF A MICROALLOYED STEEL CONTAINING NIOBIUM AFTER FORGING

### Abstract

The production of microalloyed steels components by the forging technique requires heat treatments to obtain the properties specified by the standards. Associated with the manufacture of forged products, the niobium addition is an important factor as a grain refining, modifier of the microstructure and mechanical properties of the steel. Considering the niobium effects and the heat treatment temperatures the objective of this research was the manufacture of a microalloyed steel containing niobium forged bars with a square section of 40 mm. These bars were annealed at 930 °C and subjected to quenching at 855, 900 and 1000 °C. The Kasatkin model was used to choose the temperature in the interior, near and above the intercritical region of the steel. After cooling in water, the microstructures of the steel were observed and correlated to the hardness measurements. The results confirm the validity of the Kasatkin model and the the niobium effect on grain size and microstructure of the forged microalloyed steel.

**Keywords:** Forged steel; Kasatkin model; Microalloyed steel containing niobium.

<sup>1</sup> *Doutorando em Engenharia e Ciência de Materiais, EESC-USP, São Carlos, Brasil.*

<sup>2</sup> *Prof. Dra., Programa de Pós-graduação em Tecnologias Sustentáveis, Instituto Federal do Espírito Santo, Vitória, Brasil.*

<sup>3</sup> *Professor Dr. e coordenador do Programa de Pós-graduação em Engenharia Metalúrgica e de Materiais. Instituto Federal do Espírito Santo, Vitória, Brasil.*

## 1 INTRODUÇÃO

Os aços resistentes de baixa liga (ARBL) recebem esta denominação por apresentarem no máximo 2% em elementos de liga. Nesta classe estão os aços API (American Petroleum Institute) onde a principal aplicação é na produção de dutos para condução de petróleo e gás devido às características mecânicas como a elevada resistência mecânica, resistência à corrosão adequada e boa soldabilidade. Nestes aços, a microestrutura e as propriedades mecânicas são dependentes da composição química e do processamento, onde o meio mais usual é a laminação controlada. Porém este processo é pouco adequado para fabricação de peças de geometria complexa, como juntas e conexões. Neste caso, o forjamento se apresenta como uma opção viável para confecção destes componentes, por permitir maior diversidade na conformação mecânica. Dentro deste contexto, o objetivo deste trabalho foi avaliar a influência do nióbio e da temperatura de têmpera na microestrutura e dureza de um aço microligado forjado na forma de barras quadradas.

### 1.1 Objetivos

Avaliar o efeito do nióbio e da temperatura de têmpera na microestrutura e dureza de um aço microligado com nióbio forjado.

### 1.2 Revisão da Literatura

Os aços de Alta Resistência e Baixa Liga (ARBL) são materiais de extrema importância utilizados em diversas aplicações industriais. Estes aços são caracterizados pela presença de elementos microligantes como nióbio, titânio e vanádio, que formam carbonetos, nitretos e carbonitretos, fundamentais no refinamento de grão e controle da recristalização da austenita durante o processamento [1]. Na fabricação de dutos para transporte de petróleo e gás, estes aços devem atender as especificações de composição química e resistência mecânica da norma API 5L. O processo mais utilizado para fabricação dos aços API é a laminação controlada, que associada ao tratamento térmico proporciona excelente resistência mecânica, tenacidade e soldabilidade [2].

No caso de acessórios utilizados na construção de dutos tais como flanges, conexões e centralizadores de tubos, a laminação não é uma técnica adequada. Nestes casos, para fabricar componentes com maior complexidade geométrica, o processo de forjamento é a opção mais viável. No caso de aços fabricados por forjamento, tratamentos térmicos de têmpera e revenimento são necessários para atender às solicitações mecânicas de componentes utilizados na indústria petroquímica [3]. Nos aços ARBL com menor teor de carbono, uma alternativa para favorecer a formação de martensita e aumentar as propriedades mecânicas é o resfriamento rápido, a partir da região intercrítica entre a temperatura austenítica inferior  $Ac_1$  e a superior  $Ac_3$  [4].

Associado aos tratamentos térmicos, nos últimos 60 anos o nióbio é utilizado como elemento microligante na fabricação de aços de alta resistência. A adição de nióbio

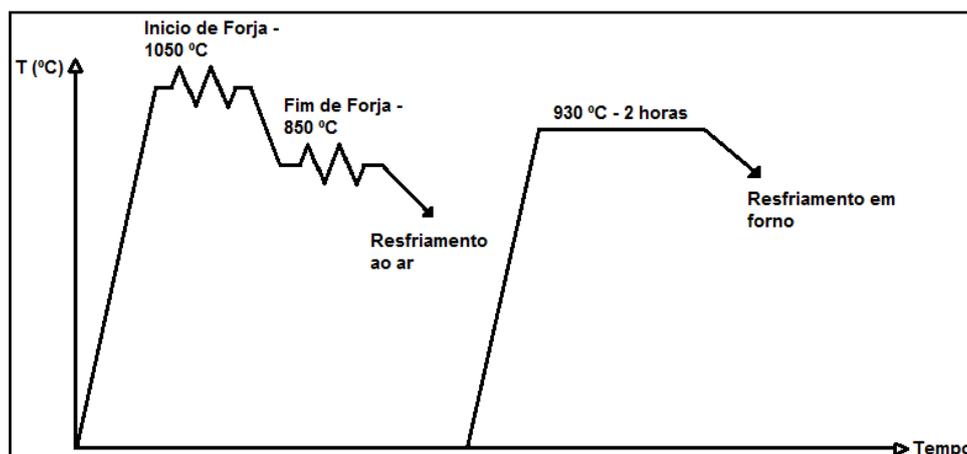
em teor de até 0,10% em peso promove o endurecimento do aço por precipitação, devido à formação de finas partículas de Nb(C,N) na transformação austenita-ferrita e também no endurecimento secundários com o revenimento, além do refino do grão ferrítico. Este é o mecanismo mais efetivo para o aumento da resistência mecânica, com aumento do limite de escoamento entre 70 a 180 MPa e da tenacidade [5]. O nióbio também promove o atraso da formação da ferrita e favorece a formação de produtos de transformação displacivos com aumento da resistência mecânica e da tenacidade [6]. Neste contexto, o objetivo deste trabalho foi avaliar o efeito do nióbio na microestrutura e dureza de um aço microligado forjado submetido aos tratamentos de têmpera a 855, 900 e 1000 °C, com resfriamento em água.

## 2 DESENVOLVIMENTO

### 2.1 Materiais e Métodos

O aço microligado ao nióbio foi elaborado em um forno de indução com capacidade para 300 kg na fundição Grupo Metal em Tietê/SP. O metal líquido foi vazado em uma lingoteira de ferro fundido e os teores dos elementos químicos foram determinados por meio da espectrometria de emissão ótica.

Os lingotes obtidos após o vazamento foram cortados em três partes com pesos similares, aquecidos a 1050 °C e forjados em barras com secção quadrada de aproximadamente 40 mm de aresta e 1500 mm de comprimento. Os últimos passes foram realizados com a temperatura mínima de 850 °C para refinar o grão. Posteriormente, as barras foram reaquecidas a 930 °C por duas horas, resfriadas no forno para homogeneizar a microestrutura e fresadas com 30 mm de lado. Finalmente foram realizadas as têmpera a 855, 900 e 1000 °C com resfriamento em água. O processamento termomecânico dos aços é mostrado na Figura 1.



**Figura 1:** Desenho esquemático do processo termomecânico das barras do aço antes da têmpera nas temperaturas de 855, 900 e 1000 °C.

Amostras na orientação longitudinal com 15x15x10 mm foram retiradas para análises microestruturais, medidas de dureza e do tamanho de grão. Os tamanhos de grão após as têmperas foram determinados por meio da Equação 1 da norma ASTM E112:

$$n_a = 2^{(G-1)} \quad (1)$$

Onde G é o tamanho de grão ASTM, determinado pela contagem em 10 regiões do aço e  $n_a$  é o número de grãos em uma área de uma polegada quadrada observada em uma região com aumento de 100 vezes. As temperaturas de transformação austenítica foram determinadas considerando as composições químicas e as equações propostas por Kasatkin [7].

Os tratamentos térmicos de têmpera foram realizados em um forno tipo mufla. As amostras foram mantidas nas temperaturas de 855, 900 e 1000 °C por 30 minutos e resfriadas em água. Após preparação metalográfica convencional foram submetidas ao ataque químico com o reagente Nital 2 % e tempo de aplicação de aproximadamente 30 segundos. As imagens foram capturadas em um microscópio ótico confocal (MOC) e as medidas de dureza foram determinadas após recozimento e têmpera em um durômetro com escala Rockwell B e carga de 100 Kgf.

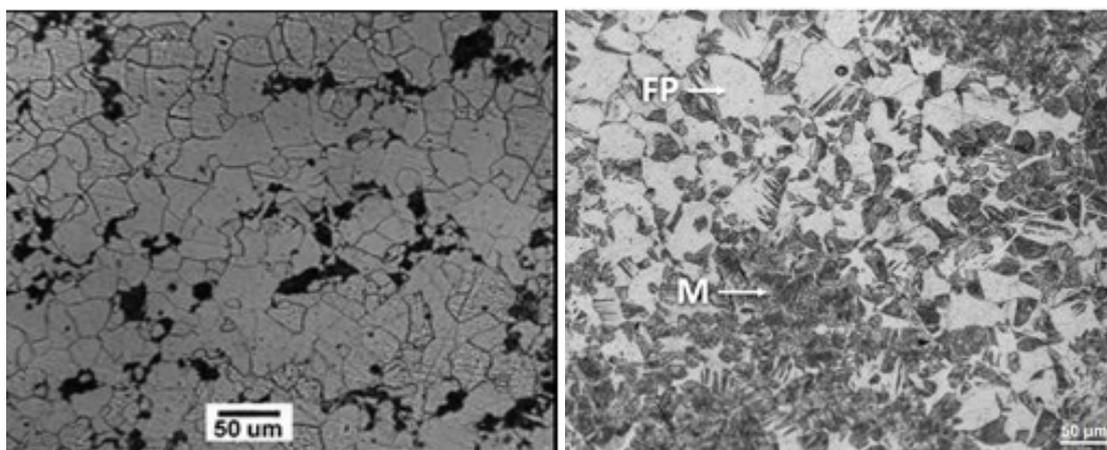
## 2.2 Resultados e Discussões

A composição química do aço está apresentada na Tabela 1.

**Tabela 1.** Porcentagem em massa dos elementos químicos do aço microligado..

C	Mn	Si	Nb	V	Ti	Mo	Cr	Ni	Mo	P	S
0,11	0,33	0,09	0,08	0,01	0,01	0,003	0,37	0,40	0,05	0,03	0,02

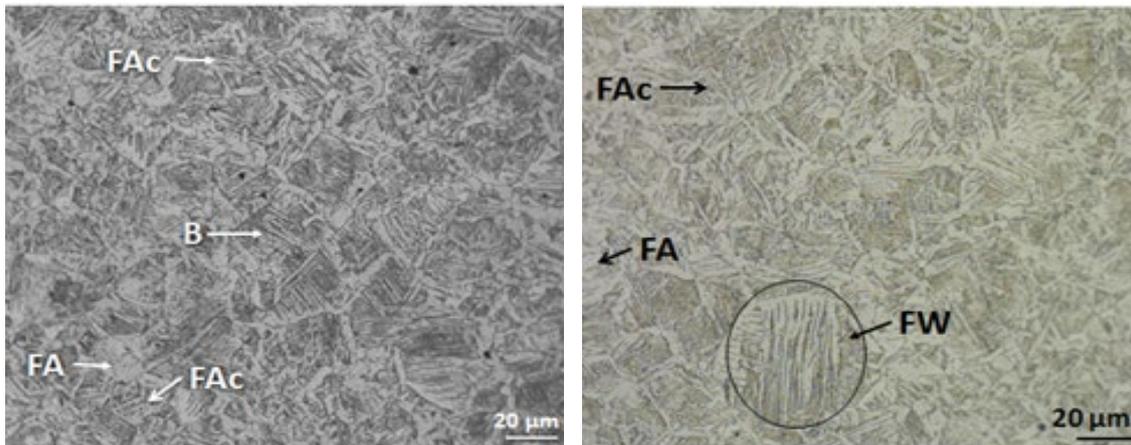
Após recozimento o aço apresenta uma matriz de ferrita poligonal com ilhas de perlita conforme observado na Figura 2a. A precipitação de carbonetos de nióbio nas temperaturas de forjamento provoca um maior número de pontos de nucleação para a ferrita, reduzindo o tamanho de grão [8]. De acordo com a Equação 1, o tamanho de grão para o aço variou pouco após a têmpera e o valor médio foi ASTM  $10 \pm 1$ .



**Figura 2a:** microestrutura do aço com nióbio recozido a 930 °C apresentando ferrita na cor clara e perlita escura. **Figura 2b:** após têmpera a 855 °C é possível observar a ferrita poligonal (FP) e a martensita (M). (Nital 2% - COM).

Após têmpera a 855 °C o aço apresenta uma estrutura bifásica de ferrita poligonal (FP) e martensita (M), como se observa na Figura 2b. O aquecimento na zona intercrítica favorece o enriquecimento de carbono na austenita e a formação da martensita após resfriamento brusco. A presença de ferrita poligonal remanescente indica que o aço não estava completamente austenitizado nesta temperatura [9].

Após têmpera a 900 °C predominam os constituintes displacivos, com a presença de ferrita alotriomórfica em uma matriz de ferrita acicular e bainita na Figura 3a. A ferrita alotriomórfica nucleia a partir do contorno de grão austenítico. Também é possível observar a diferença na orientação das placas de ferrita acicular e de bainita. Na primeira, as placas crescem em diferentes direções, enquanto na segunda, nucleiam a partir do contorno de grão e crescem de forma paralela.



**Figura 3a:** ferrita alotriomórfica (FA), ferrita acicular (FAc) e bainita após têmpera a 900 °C. **Figura 3b:** ferrita alotriomórfica (FA), ferrita acicular (FAc), ferrita de Widmanstätten (FW) e bainita após têmpera a 1000 °C (Nital 2% - COM).

Após têmpera a 1000 °C, com o aumento do intervalo acima da temperatura de início da transformação austenítica há maior difusão do carbono e formação de ferrita alotriomórfica. Assim, a formação e o crescimento da ferrita de Widmanstätten são favorecidos. Apesar de ser um constituinte de elevada resistência mecânica, pode ser prejudicial à tenacidade, pois as agulhas favorecem a formação de trincas no material [10].

A Tabela 2 apresenta os valores médios de dureza em cinco diferentes regiões, após cada condição de tratamento térmico.

Tabela 2: Valores médios de dureza Rockwell B (HRB) dos aços, após recozimento (Rcz) e têmpera (T) em cada condição.

Temperatura (°C)	(HRB)
Rcz 930	52 ± 2
T 855	100 ± 4
T 900	84 ± 2
T 1000	95 ± 1

Após o recozimento, as durezas nas três direções normal, longitudinal e transversal, são similares, pois o grau de redução após o forjamento proporcionou a homogeneização da microestrutura. Na têmpera a 855 °C a dureza é superior devido à formação de martensita provocada pelo aquecimento na região intercrítica. No tratamento realizado a 1000 °C a dureza foi superior à de 900 °C devido a presença de ferrita de Widmanstätten [11].

De uma forma geral, a técnica de forjamento é uma rota importante para substituir a laminação, para confecção de componentes com geometrias diferentes das obtidas com a utilização de chapas. Com relação às microestruturas e as medidas de dureza realizadas ficou evidente o efeito do resfriamento do aço após o aquecimento na região intercrítica onde coexistem austenita e ferrita. Neste caso a têmpera com formação de martensita é possível mesmo com o aço tendo apenas 0.11% de carbono, pois ocorre o enriquecimento deste elemento na austenita.

### 3. CONCLUSÕES

- Os aquecimentos a 900 e 1000 °C são realizados na região austenítica, enquanto que na temperatura de 855 °C é na região intercrítica;
- O tratamento na zona intercrítica é responsável pela formação de uma estrutura bifásica; de ferrita e martensita no aço;
- O aço aquecido na zona intercrítica apresenta dureza superior;
- Os valores de  $Ac_1$  e  $Ac_3$  determinados comprovam a validade do modelo de Kasatkin;
- O nióbio favorece as transformações displacivas no resfriamento.

### Agradecimentos

À Finep, à Fapes pelo apoio financeiro referente ao processo 67660207/15, à Fundação Grupo Metal pelas amostras do aço forjado e à Capes pela bolsa do doutorando.

### Referências

1. Gray JM. Fundamentals of Microalloying Proceedings, CBMM/CISRI Commemorative Symposium, Beijing, China. September, 1989.
2. Gray JM, Siciliano F. High strength microalloyed pipeline: half a century of evolution. Pipeline Technology Conference, Ostend, Belgium, 2009. 20-45.
3. Opiela M. Effect of Thermomechanical Processing on the Microstructure and Mechanical Properties of Nb-Ti-V Microalloyed Steel. Journal of Materials Engineering and Performance. 2014. Volume 23(9) September, p.3379. 2014.
4. Kang J, Wang C, Wang G D. Microstructural characteristics and impact fracture behavior of a high-strength low-alloy steel treated by intercritical heat treatment. Materials Science and Engineering A. 2012; 553: p.96-104.
5. Kestenbach HJ, Itman A, Cardoso KR. Quantitative study of carbonitride precipitation in niobium and titanium microalloyed hot strip steel. Materials Science and Technology. January 1997 Vol. 13, p. 49-55.
6. Isasti N. Phase Transformation Study in Nb-Mo Microalloyed Steels Using Dilatometry and EBSD Quantification. Metallurgical and Materials Transactions A. 2013; 44(8): p. 3552-3563.
7. Kasatkin OG, Vinokur BB, Pilyushenko VL. Calculation models for determining the critical points of steel. Metal Science and Heat Treatment. 1984; v. 26(1), p.27-36.

8. Morrison WB. Microalloy Steels - The Beginning. *Materials Science and Technology*. 2009. v. 25 (9) p. 1066-1073.
9. Militzer M, Fazeli F, Jia T. Effect of niobium and molybdenum on phase transformations in advanced low-carbon steels. *Fundamentals and Applications of Mo and Nb Alloying in High Performance Steels – Volume 1*. Edited by Hardy Mohrbacher. CBMM, IMOA and TMS. 2014. p. 23-36.
10. Babu SS and Bhadeshia HKDH. A direct study of grain boundary allotriomorphic ferrite crystallography. *Materials Science and Engineering A*, v. 142 (2), p. 209-219, 1991.
11. Mohrbacher H. Synergies of niobium and boron microalloying in molybdenum based bainitic and martensitic steels. *Fundamentals of Applications of Mo and Nb Alloying in High Performance Steels - Volume 1*. Edited by Hardy Mohrbacher. CBMM, IMOA and TMS. 2014. p. 83-108.