

## REVISÃO DO EFEITO DO VANÁDIO EM VERGALHÕES PARA DOIS PROCESSOS DE LAMINAÇÃO\*

*Emmanuel de Sousa Almeida<sup>1</sup>*

*Francisco Alberto Marreiros da Rocha Filho<sup>2</sup>*

*Rodrigo Alves Ramos<sup>3</sup>*

*Jeferson Leandro Klug<sup>4</sup>*

*Pablo Leao<sup>5</sup>*

### Resumo

O uso de vanádio na produção de vergalhões microligados data do início do século XX, sendo amplamente utilizado na construção civil voltada para regiões susceptíveis a abalos sísmicos. Desse modo, este trabalho visa revisar os efeitos promovidos pelo uso do vanádio na fabricação de vergalhões antissísmicos, levando em conta a utilização de dois processos distintos de laminação – Forno de reaquecimento a Gás Natural (FGN) e Laminação Direta (LD) – como forma de conferir ganhos em resistência, mantendo-se níveis satisfatórios de tenacidade. Foram realizados ensaios microestruturais e de propriedades mecânicas entre lotes provenientes dos dois processos, avaliando-se propriedades como tamanho de grão médio, limite de escoamento e limite de resistência, correlacionando-as com o efeito provocado pelo uso do vanádio, concluindo-se que seu impacto no refino de grão austenítico/ferrítico e endurecimento via precipitação de carbonitretos de vanádio é de fundamental importância para a obtenção de propriedades mecânicas satisfatórias em vergalhões antissísmicos.

**Palavras-chave:** Aumento de resistência; Aços; Refino de Grão; Precipitação.

### REVIEW OF THE VANADIUM EFFECT ON ANTI-SEISMIC REBARS FOR TWO ROLLING PROCESSES

#### Abstract

The application of vanadium in production of microalloyed anti-seismic rebars dates from the beginning of the 20<sup>th</sup> century, being widely used in civil construction focused on regions susceptible to earthquakes. This work aims to review the effects promoted by the addition of vanadium in the manufacture of anti-seismic rebars, taking into account two different rolling processes – Reheating Furnace (FR) and Direct Rolling (DR) – as a way to bestow gains in resistance, maintaining satisfactory levels of tenacity and elongation. Microstructural and mechanical properties tests were carried out between production batches from the two processes, evaluating properties such as medium grain size, yield limit and resistance limit, correlating them with the effect caused by the use of vanadium, concluding that its impact on the refining of austenitic / ferritic grain and hardening through precipitation of vanadium carbonitride has essential importance to obtain satisfactory mechanical properties in anti-seismic rebars.

**Keywords:** Strengthening mechanism; Steels; Grain refinement; Precipitation.

<sup>1</sup> *Graduando em Engenharia Metalúrgica, Universidade Federal do Ceará*

<sup>2</sup> *Bacharel em Metalurgia, Mestrando em Ciência dos Materiais, Universidade Federal do Ceará, Assistente Técnico, Aciaria, Gerdau Aços Brasil*

<sup>3</sup> *Bacharel em Metalurgia, Mestrando em Ciência dos Materiais, Universidade Federal do Ceará, Assessor Técnico, Aciaria, Gerdau Aços Brasil*

<sup>4</sup> *Doutor em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais, Professor Adjunto, Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais, Universidade Federal do Ceará*

<sup>5</sup> *Bacharel em Metalurgia, Mestrando em Ciência dos Materiais, Universidade Federal do Ceará.*

## 1 INTRODUÇÃO

Técnicas cada vez mais avançadas vêm sendo desenvolvidas visando a proteção contra abalos sísmicos. Os japoneses foram os precursores no desenvolvimento desse tipo de tecnologia, haja vista que o país está sujeito a constantes terremotos. Porém, alguns países, como o Haiti, continuam sujeitos à devastação causada por esses fenômenos. Pensando nisso, alternativas de baixo custo estão sendo trabalhadas para auxiliar essas regiões desfavorecidas economicamente, dentre elas, destacam-se os vergalhões microligados, usados para a construção de lajes e concreto armado, pois os mesmos alinham excelente resistência mecânica com boa tenacidade, propriedades estas obtidas por meio da combinação de elementos de liga associados a um processo de laminação controlada. Elementos como Nb, V e Ti melhoram as propriedades mecânicas do aço através do endurecimento por precipitação, entretanto, óxidos de Ti podem se formar facilmente e coalescer durante a solidificação do aço, abaixando suas propriedades mecânicas, de modo que não são adequados para tal aplicação. Para aços ao nióbio os ganhos são associados ao refino de grão e endurecimento por precipitação. Enquanto que para o vanádio a elevação das propriedades está associada à formação de carbonitretos de vanádio – V(C,N) – em condição subestequiométrica, do contrário o mesmo limitaria o carbono livre disponível para a formação de ferrita e cementita. Em [1] reportou-se que muitos carbonitretos podem ser obtidos na matriz ferrítica pelo controle do resfriamento pós laminação, o que pode ser benéfico para inibir o crescimento dos grãos bainíticos após a transformação de fase e aumentar o efeito do aumento de resistência por precipitação de segunda fase.

O tamanho de grão refinado é atribuído ao vanádio, que tem uma solubilidade relativamente baixa na austenita, causando a formação de precipitados. Essas partículas interagem com os contornos de grão, impedindo o crescimento do grão austenítico durante a laminação a quente ou inibindo a recristalização da austenita de tal forma que a transformação  $\gamma \rightarrow \alpha$  ocorre com a austenita não recristalizada, conseqüentemente um grão estrutural mais fino é formado. O refino de grão é a única forma de aumentar a resistência mecânica e ao mesmo tempo a tenacidade do aço. Os precipitados e os contornos de grãos refinados servem como barreiras para a movimentação das discordâncias no interior dos grãos ferríticos, contribuindo para o aumento de resistência ao escoamento [2-4].

O principal objetivo aço microligado reside no refino do tamanho de grão ferrítico, imposto pela precipitação. O efeito desse refino de grão no aumento da resistência mecânica pode atingir a ordem de 100 a 200 Mpa. Por sua afinidade pelo N, a cinética de precipitação do VN é maior em comparação ao VC. Isso devido ao fato de que o N possui alta solubilidade na matriz ferrítica, tornando-se uma vantagem para a precipitação do VN [5].

A adição de Nb e V retarda a recuperação e recristalização e suprime o crescimento de grão pela precipitação de tamanhos pequenos durante a deformação a quente. Um grande número de precipitados induzidos por deformação no processo de laminação pode retardar a recristalização da austenita e refinar a microestrutura pela supressão do crescimento de grão da austenita e ferrita durante o resfriamento [3].

Os elementos microligantes que são segregados para os contornos de grão da austenita tendem a reduzir a energia interfacial e a mobilidade dos contornos, reduzindo a taxa de recristalização, ou seja, aumentando-se o teor desses microligantes, o valor da temperatura de não-recristalização ( $T_{nr}$ ) do aço aumenta. Temperatura essa abaixo da qual a recristalização estática não ocorre completamente [6].

Essa temperatura pode ser estimada através de fórmulas empíricas, sendo a equação de Boratto [7] a fórmula empírica mais conhecida por realizar uma estimativa de  $T_{nr}$  como função dos elementos de liga, é dada por:

$$T_{nr} = 887 + 464C + (6445Nb - 644\sqrt{Nb}) + (732V - 230\sqrt{V}) + 890Ti + 363Al - 357Si \quad (1)$$

Onde C, Nb, V, Ti, Al e Si são os elementos em %p no aço.

## 2 MATERIAIS E MÉTODOS

### 2.1. Caracterização Microestrutural

Foram coletadas amostras de dois lotes que passaram pelos dois processos de laminação distintos: com o uso da etapa de reaquecimento (FGN) e laminado diretamente a partir do lingotamento contínuo (LD). As amostras utilizadas correspondem ao produtos: semi-acabado, o tarugo de sessão 100 x 100 mm; e ao produto acabado, o vergalhão microligado com diâmetro 3/8".

As amostras coletadas foram cortadas, preparadas metalograficamente e atacadas em solução de nital 2% para que fosse revelada a microestrutura. Foram realizadas micrografias e medições dos tamanhos médios de grão utilizando o software AxioVs40x64 V 4.9.1.0 presente no microscópio ótico da marca Zeiss®, modelo AxioCam ICc 5 seguindo a norma ASTM E 112 utilizando o método do intercepto linear.

### 2.2. Ensaio de Tração

Os ensaios de tração das amostras de vergalhão foram realizados em triplicata no equipamento da marca Arotec®, utilizando o comprimento útil de 100 mm ( $L_0$ ) e velocidade de deslocamento das garras da máquina de 5mm/min.

## 3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

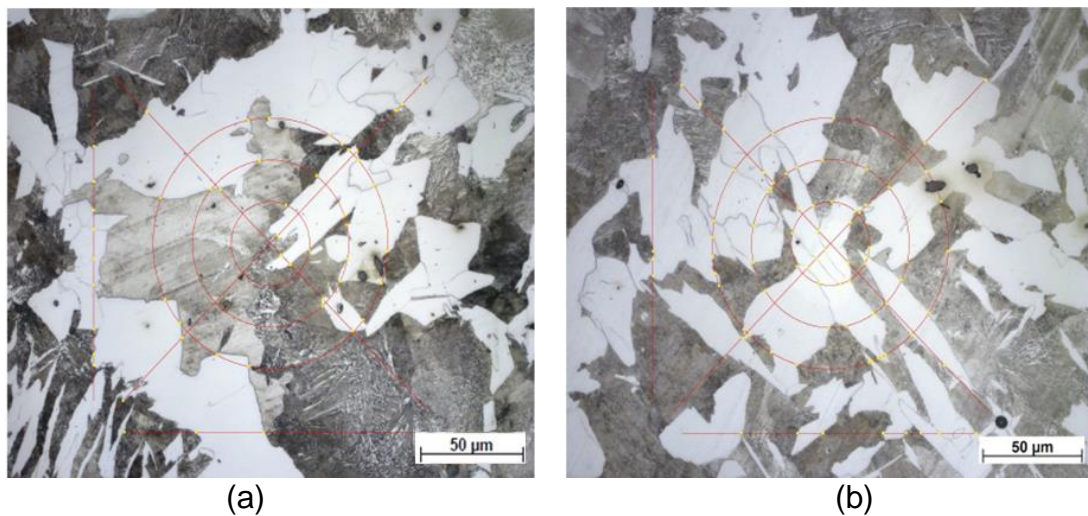
As Figuras 1 e 2 mostram os exames comparativos de tamanhos de grãos para ambos os processos do produto semi-acabado (tarugo) prévio a laminação e do produto acabado. A Tabela 1 resume os valores de tamanhos de grãos obtidos para as amostras analisadas. Conforme esperado o tamanho de grão prévio a laminação foi maior no processo FGN, em função do efeito do tempo e temperatura de exposição no forno de reaquecimento. O que não aconteceu com o tarugo proveniente diretamente do lingotamento contínuo (processo LD), que possuía estrutura bruta de fusão com menores tamanhos de grão comparados ao processo via forno.

Quanto ao comparativo entre os vergalhões observou-se que na amostra LD o tamanho de grão obtido foi maior, devido ao fato do teor de V ser menor comparado

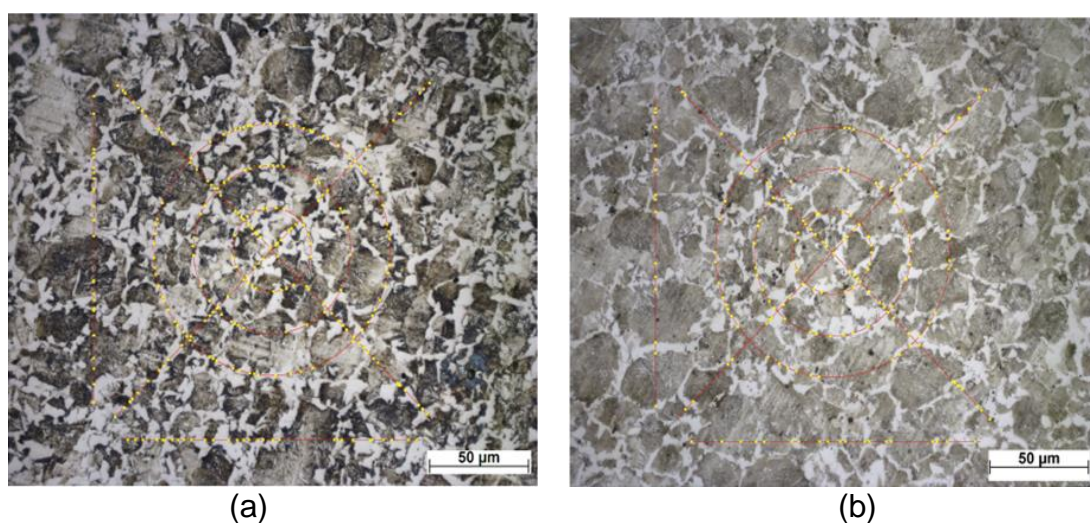


ao vergalhão FGN, conforme mostra a Tabela 2. Sabe-se que quanto maior o teor de elementos microligantes, maior será a precipitação, e a recristalização tende a ser inibida, em função da formação de sítios de nucleação de precipitados que servirão como barreiras ao crescimento de grão. Quando aumenta-se a precipitação e por consequência diminui-se a recristalização, o refino de grão é esperado.

O teor de microligantes contribui para aumento da temperatura de não-recristalização ( $T_{nr}$ ), e quanto maior esta temperatura, maior quantidade de grãos não-recristalizados durante o processo de laminação, contribuindo para o aumento de resistência do aço. A Tabela 2 mostra os valores calculados da  $T_{nr}$ , utilizando a equação de Boratto para ambos os processos, considerando os teores de V presentes na mesma. Uma maior  $T_{nr}$  foi obtida na amostra FGN, visto que essa possui maior teor de V, dificultando a recristalização e favorecendo a precipitação e consequentemente o refino de grão.



**Figura 1** – Micrografias óticas prévias a laminação (Tarugos): (a): Processo FGN. Tamanho de grão ASTM G 7 ( $d_{\text{médio}} = 31,8 \mu\text{m}$ ); (b): Processo LD. Tamanho de grão ASTM G 8 ( $d_{\text{médio}} = 22,5 \mu\text{m}$ ). Aumento 500x. Fonte: Própria do autor.



**Figura 2** – Micrografias óticas dos vergalhões: (a): Processo FGN. Tamanho de grão ASTM G 11,5 ( $d_{\text{médio}} = 6,7 \mu\text{m}$ ); (b): Processo LD. Tamanho de grão ASTM G 10,5 ( $d_{\text{médio}} = 9,4 \mu\text{m}$ ). Aumento 500x. Fonte: Própria do autor.

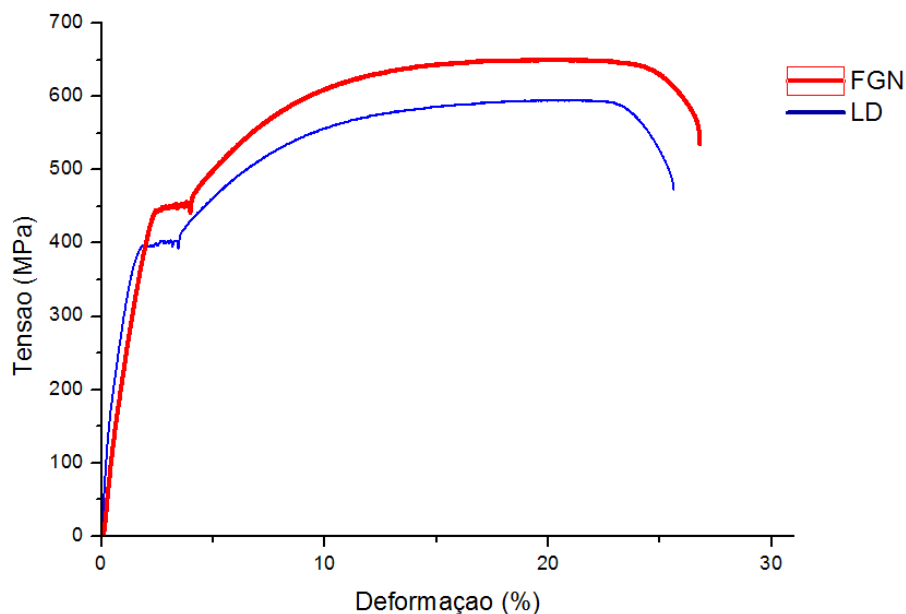
**Tabela 1** - Comparativo do tamanho de grão e diâmetro médio por processo. Fonte: Própria do autor.

PEÇA	PROCESSO	TAMANHO G ASTM E112	DIÂMETRO MÉDIO ( $\mu\text{m}$ )
TARUGO	FGN	7	31,8
TARUGO	LD	8	22,5
VERGALHÃO	FGN	11,5	6,7
VERGALHÃO	LD	10,5	9,4

**Tabela 2** - Composição química por lote. Fonte: Própria do autor.

	FGN	LD
V	0,013	0,012
T <sub>nr</sub>	1019,9	999,4

Os ensaios de tração nos vergalhões confirmaram a tendência mostrada pela análise microestrutural e pelo cálculo da T<sub>nr</sub>, onde a amostra que apresentou estrutura mais refinada proporcionada pelo maior teor de V, proveniente do processo FGN, apresentou maior limite de resistência à tração. Sendo que ambas amostras apresentaram valores semelhantes de alongamento percentual, indicando que ambas apresentaram boa tenacidade proporcionada pelo refino de grão da estrutura. A Tabela 3 mostra os valores médios do limite de resistência (LR) em MPa e do alongamento (AL) em %.

**Figura 3.** Ensaio de tração comparando as propriedades mecânicas entre as amostras. Fonte: Própria do autor.

**Tabela 3** – Valores médios das propriedades mecânicas. Fonte: Própria do autor.

	LR (MPa)	AL (%)
FGN	649,86	18,79
LD	594,93	18,95

## 4 CONCLUSÃO

Com base nos resultados obtidos e na revisão proposta sobre o impacto do vanádio nos aços, algumas conclusões podem ser tiradas:

- (1) O aumento no teor de V promove a maior precipitação e refino de grão.
- (2) O tamanho de grão final tem relação direta com as propriedades mecânicas de modo que uma estrutura refinada é objetivada para se garantir limite de resistência satisfatório.
- (3) Analisando-se dois processos de laminação, foi possível notar que a estrutura prévia de laminação não exerceu a maior influência na microestrutura final obtida, mas sim a composição química, principalmente o teor de V.

## Agradecimentos

Agradecimentos à Gerdau Aços Longos S.A. pela liberação das amostras para realização do estudo em questão. À estagiária da Aciaria, Hana Livia, pelo auxílio na realização das micrografias. Ao Laboratório de Caracterização de Materiais (LACAM) da Universidade Federal do Ceará (UFC) e ao Laboratório de Ensaio Mecânicos (LEM) do Instituto Federal do Ceará (IFCE) pelo espaço concedido para realização dos ensaios.

## REFERÊNCIAS

- 1 Riccardo, R., Carlo, M., Roberto, V. Effect of Coiling Temperature on Formability and Mechanical Properties of Mild Low Carbon and HSLA Steels Processed by Thin Slab Casting and Direct Rolling *Journal of Iron and Steel Research International* 47 2007: pp. 1204 – 1213.
- 2 J. Nikolaou, G.D. Papadimitriou Microstructures and mechanical properties after heating of reinforcing 500 MPa class weldable steels produced by various processes (Tempcore, microalloyed with vanadium and work-hardened). *Construction and Building Materials*. 2004 ; No. 18 : 243-254.
- 3 CHEN, Wei. Investigation on the Strengthening and Toughening Mechanism of 500 MPa V-Nb Microalloyed Anti-Seismic Rebars. ISSN 1392-1320 MATERIALS SCIENCE (MEDZIAGOTYRA). 2015;Vol. 21, No. 4: 536-542.
- 4 YANG, Cai-fu. Research, Development, and Production of V-N Microalloyed High Strength Rebars for Building in China. *Journal of Iron and Steel Research, Internacional*. 2008 ; 15(2) : 81-86.
- 5 SILVÉRIO, Valdir Anderson. Estudo da Evolução do Tamanho de Grão na Laminação a Quente de Barras de Aço Médio Carbono Microligado ao Vanádio - 38 MnSiV5. 2008. 86 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Metalúrgica e de Materiais, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2008. Cap. 2.
- 6 HOMSHER, Caryn Nicole. Determination of the Non-Recrystallization Temperature (TNR ) in Multiple Microalloyed Steels. 2012. 106 f. Tese (Doutorado) - Curso de Master Of Science (metallurgical And Materials Engineering)., Colorado School Of Mines, Colorado, 2012. Cap. 4.

- 7 BORATTO, F.; BARBOSA, R.; YUE, S.; JONAS, J. J. Effect of Chemical Composition on Critical Temperatures of Microalloyed Steels. Iron and Steel Institute of Japan. Proceedings of the Physical Metallurgy of Thermomechanical Processing of Steels and Other Metals -THERMEC '88; 1988. Tokyo, Japan. ISIJ, 383-390.