

# PRODUÇÃO DE CHAPAS GROSSAS LEVES ATRAVÉS DE LAMINAÇÃO DE NORMALIZAÇÃO NA GERDAU OURO BRANCO\*

Ricardo José de Faria<sup>1</sup>  
Alexandre de Silveira Rodrigues<sup>2</sup>  
Antônio Augusto Gorni<sup>3</sup>  
Emanuelle Garcia Reis<sup>4</sup>  
José Herbert Dolabela da Silveira<sup>5</sup>  
Maurício Martins Pereira<sup>6</sup>  
Romeu Thomaz Viana Junior<sup>7</sup>

## Resumo

As inúmeras aplicações das chapas grossas processadas por laminação de normalização motivaram a imediata implantação desse processo no novo laminador de chapas grossas da Gerdau Ouro Branco. Numa primeira abordagem, chapas grossas leves atendendo à norma EN 10025-2 S355 J2 foram obtidas através da laminação de normalização de um aço microligado ao NbTi. Apesar dos bons resultados então obtidos, seu coeficiente de segurança no atendimento aos requisitos de resistência mecânica não foram completamente satisfatórios. Por esse motivo, a liga anterior foi suplementada por uma adição de V. Isso permitiu atender aos requisitos desejados de maneira mais segura, garantindo o pleno atendimento aos clientes.

**Palavras-chave:** Laminação de normalização; Aço microligado; Microestrutura, Propriedades mecânicas.

## PRODUCTION OF THIN PLATES BY NORMALIZING ROOLING IN GERDAU OURO BRANCO

## Abstract

The numerous applications of thick plates processed by normalizing rolling motivated the immediate implantation of this process in the new plate mill of Gerdau Ouro Branco. In a first approach, light plates conforming to standard EN 10025-2 S355 J2 were processed by normalizing rolling a NbTi microalloyed steel. Despite the good results obtained, its safety coefficient in meeting the mechanical strength requirements was not completely satisfactory. For this reason, the previous alloy was supplemented by an addition of V. This allowed to meet the desired requirements in a more secure way, ensuring full customer service.

**Keywords:** Normalizing Rolling, Microalloyed Steel; Microstructure; Mechanical Properties.

<sup>1</sup> Engenheiro Metalurgista, M. Eng., Assessor Técnico, Gerência de P&D, Gerdau, Ouro Branco, MG, Brasil.

<sup>2</sup> Técnico em Metalurgia, Laboratorista, Gerência de Laboratórios, Gerdau, Ouro Branco, MG, Brasil.

<sup>3</sup> Engenheiro de Materiais, M. Eng., Dr. Eng., Consultor Técnico, Gerência de P&D, Gerdau, Ouro Branco, MG, Brasil.

<sup>4</sup> Engenheiro Civil, M. Eng., Assessor Técnico, Gerência de Chapas Grossas, Gerdau Ouro Branco, MG, Brasil.

<sup>5</sup> Engenheiro Metalurgista, M. Eng., Gerente de Chapas Grossas, Gerência de Laminação de Chapas Grossas, Gerdau, Ouro Branco, MG, Brasil.

<sup>6</sup> Engenheiro Metalurgista, Assessor Técnico, Gerência de Laminação de Chapas Grossas, Gerdau, Ouro Branco, MG, Brasil.

<sup>7</sup> Engenheiro Metalurgista, Assessor Técnico, Gerência de P&D, Gerdau, Ouro Branco, MG, Brasil.

## 1 INTRODUÇÃO

A laminação de normalização é um tratamento termomecânico que vem sendo cada vez mais aplicado nas últimas décadas. Como seu nome indica, seu principal objetivo é produzir chapas normalizadas diretamente da laminação a quente, sem a necessidade de se executar o tratamento térmico adicional de normalização. Portanto, este processo permite a fabricação de chapas normalizadas por plantas que não disponham de fornos de tratamento térmico ou quando a demanda do mercado por esse material é superior à capacidade instalada desses fornos. Obviamente a supressão do tratamento térmico contribui para agilizar o tempo de fabricação desse produto e reduzir seu custo [1].

Para não comprometer a qualidade do material normalizado diretamente do calor de laminação, o esboço tem de ser laminado de forma a apresentar temperatura de acabamento igual à temperatura de austenitização que seria adotada no tratamento térmico de normalização e ser resfriado ao ar. Além disso, caso o esboço seja submetido a um tratamento térmico adicional de normalização, ele deverá manter valores de propriedades mecânicas compatíveis com a norma originalmente especificada para ele.

Contudo, vale notar que há exceções a essa regra. A literatura cita pelo menos dois casos de produção de bobinas a quente submetidas à laminação de normalização, onde a estratégia de resfriamento é típica de um laminador de tiras a quente – ou seja, resfriamento em água até uma temperatura de bobinamento, seguindo-se o resfriamento lento das espiras bobinadas. O que é realmente necessário é que a combinação de composição química do aço e do tratamento termomecânico garanta que o material dessa bobina continue mantendo as propriedades especificadas caso seja submetido a um tratamento térmico adicional de laminação [2,3].

Há normas sobre chapas grossas estruturais normalizadas que admitem o uso da laminação de normalização, ao menos para os materiais com menor espessura. A multiplicidade de aplicações para esse tipo de material, especialmente na área da energia eólica [4], incentivou o desenvolvimento do processo de laminação de normalização tão logo o novo laminador de chapas grossas da Gerdau Ouro Branco entrou em operação comercial. Este trabalho relata os resultados obtidos para chapas grossas leves, com espessura de 15 mm.

## 2 MATERIAIS E MÉTODOS

O projeto de liga inicialmente adotado foi um aço CMn microligado ao NbTi, material consagrado para a produção de chapas grossas via laminação de normalização conforme várias indicações da literatura [4-6], com o Ti atuando no sentido de refinar o tamanho de grão após reaquecimento da placa e o Nb exercendo o mesmo efeito, mas durante a laminação a quente, além de contribuir para algum endurecimento por precipitação. As placas foram reaquecidas sob temperatura suficiente para solubilizar o Nb, de acordo com o valor previsto pela equação de Irvine [7], mas com desconto no teor de N em função de sua reação sob razão estequiométrica com o Ti. A laminação foi efetuada com um período de espera entre as fases de esboçamento e acabamento para se poder cumprir adequadamente a temperatura de acabamento, ainda dentro do campo austenítico da liga, de acordo com o valor

de Ar<sub>3</sub> calculado pela equação de Ouchi [8]. Os esboços, com espessura de 15 mm, devem atender às propriedades mecânicas especificadas pela norma EN 10025-2 S355 J2, a saber: limite de escoamento igual ou superior a 355 MPa; limite de resistência entre 470 e 630 MPa; alongamento total ( $5,65 \sqrt{A_0}$ ) mínimo de 20% e energia média absorvida no ensaio Charpy igual ou superior a 27 J a -20°C.

Após a laminação foram realizados ensaios de tração usando corpos de prova usinados na direção transversal do esboço, cujo comprimento útil  $L_0$  era igual a 88 mm, bem como ensaios de impacto Charpy usando corpos de prova medindo 10 mm x 10 mm, também usinados na direção longitudinal e usando detalhe em forma de “V”.

Amostras dos materiais no estado laminado foram submetidas a tratamento térmico de normalização para verificar a resistência da microestrutura do material a esse processamento adicional. Esse tratamento foi constituído por aquecimento a  $910 \pm 10^\circ\text{C}$  durante 25 minutos para a austenitização, seguido por resfriamento ao ar calmo. Posteriormente foram realizados os mesmos ensaios já citados para os materiais no estado como laminado.

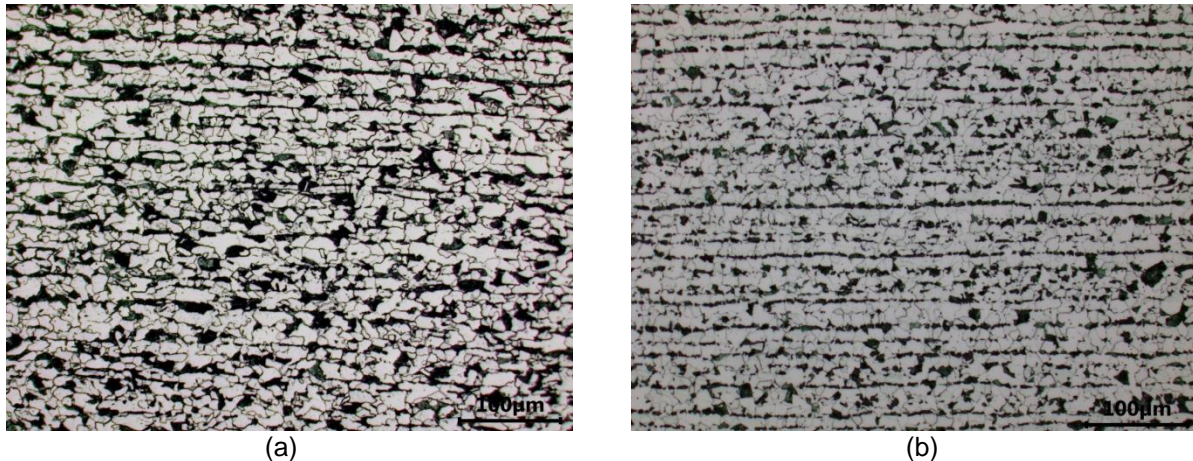
### 3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A tabela 1 mostra os resultados de propriedades mecânicas obtidas em exemplos de chapas grossas feitas com o aço microligado ao NbTi. Pode-se observar que elas atenderam plenamente aos requisitos especificados pela norma EN 10025-2 S355 J2, mas os valores de limite de escoamento após o tratamento térmico adicional de normalização foram praticamente iguais ao limite inferior da norma, sinalizando alto risco de desvio quando o material fosse produzido em grande escala. De fato, como já era de se esperar, ocorreu queda na resistência mecânica após o tratamento, que foi da ordem de 68 e 49 MPa, respectivamente para os limites de escoamento e de resistência. Isso se refletiu na razão elástica, cujo valor médio caiu de 0,78 para 0,72, e num leve aumento do alongamento total, de 31 para 33%. Os valor médio de energia absorvida no ensaio Charpy se elevou desde 242 J no estado como laminado para 338 J após a normalização, como já era esperado [9].

**Tabela 1.** Propriedades mecânicas obtidas em esboços com 15 mm de espessura feitos com aço microligado ao NbTi, direto do calor de laminação e depois de tratamento térmico adicional de normalização.

Laminado					Normalizado				
LE [MPa]	LR [MPa]	LE/LR	A [%]	Energia [J]	LE [MPa]	LR [MPa]	LE/LR	A [%]	Energia [J]
406	542	0,75	33	282	355	479	0,74	34	337
433	541	0,80	29	212	354	500	0,71	33	353
426	539	0,79	32	232	353	497	0,71	33	325

A figura 1 mostra as microestruturas típicas da chapa de aço NbTi processada por laminação de normalização e após normalização adicional em forno. Pode-se observar que o tratamento térmico adicional não logrou remover o bandeamento da microestrutura que, em compensação, apresentou-se mais refinado e esboroadado, conforme já havia sido observado em [9]. O tamanho de grão medido conforme a norma ASTM E112 foi igual a 11, tanto no estado laminado como após normalização em forno.



**Figura 1.** Microestruturas típicas da chapa de aço NbTi processada por (a) laminação e normalização e (b) após tratamento térmico adicional de normalização. Ataque de nital 3%, aumento de 200 vezes.

Em função desses resultados, decidiu-se então manter as condições de processo e incorporar uma micro-adição de V a liga, seguindo indicações da literatura [9,10]. Durante o resfriamento da chapa o V tende a se manter solubilizado até a transformação da austenita em ferrita, quando sofre precipitação interfásica ou na ferrita já formada, contribuindo para a resistência mecânica da chapa. Ao contrário do que ocorre com o Nb, o V tende a se re-solubilizar durante a fase de austenitização do tratamento de normalização adicional, desde que a temperatura do forno seja suficiente para isso, viabilizando a re-precipitação endurecedora de VN durante o resfriamento posterior ao ar do esboço. Assim, enquanto que a precipitação de VN tende a se “regenerar” a cada execução do tratamento térmico de normalização, os precipitados de NbCN mantêm-se estáveis durante a austenitização, sofrendo coalescimento e, conseqüentemente, perdendo gradativamente seu efeito de endurecimento.

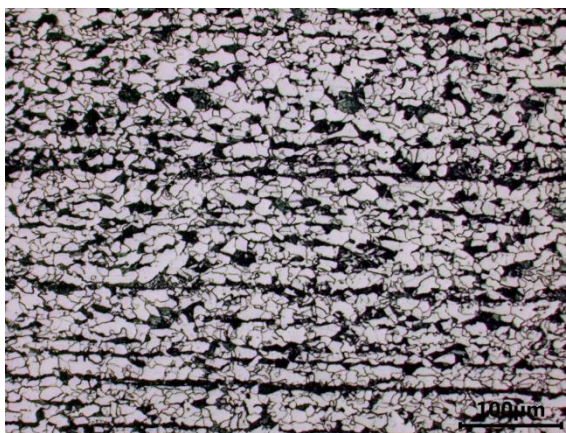
A tabela 2 mostra os resultados obtidos com o novo aço microligado ao NbTiV. Pode-se observar que, no caso do material como laminado, ocorreu aumento médio da ordem de 40 MPa no limite de escoamento em relação ao aço NbTi. Além disso, o que é mais importante, agora o valor desse parâmetro após o tratamento térmico adicional de normalização está em média 27 MPa acima do valor mínimo requerido pela norma, o que aumentou a margem de segurança para atendimento às especificações desse produto. Por outro lado, a perda de resistência mecânica após a normalização foi bem maior para esta liga: 80 e 78 MPa para os limites de escoamento e de resistência, respectivamente, o que parece indicar que o endurecimento por precipitação de VN foi efetivo após a laminação, mas parece não ser totalmente imune ao tratamento posterior de normalização. Por outro lado, também neste caso a normalização promoveu redução no valor da razão elástica (de 0,77 para 0,73) e aumento na energia absorvida durante o ensaio Charpy (de 130 para 152 J). Aliás, os valores médios de energia absorvida foram bem menores para este aço, provavelmente uma decorrência da precipitação endurecedora de VN. A tenacidade de uma das amostras foi excepcionalmente baixa, talvez pelo fato do esboçamento não ter sido feito com passes apresentando deformação crescente após o alargamento do esboço, conforme será discutido a seguir.



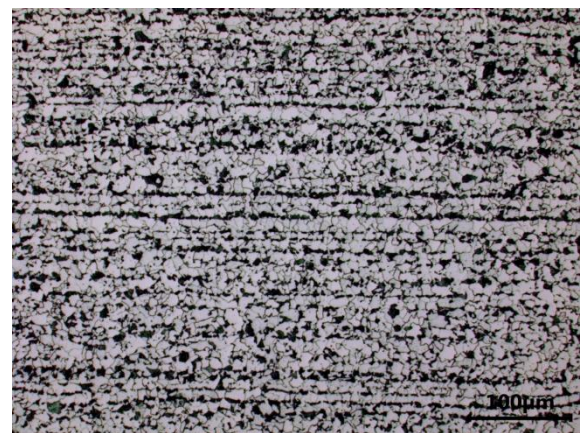
A figura 2 mostra as microestruturas típicas de chapa de aço NbTiV processada por laminação de normalização e após normalização adicional em forno. Seu aspecto ao microscópio óptico parece indicar que ocorreu um ligeiro refino após a normalização em forno, o qual parece ter sido confirmado pela determinação de tamanho de grão. Conforme a norma ASTM E112, foram obtidos tamanhos de grão ASTM de 11,5 ASTM para o esboço laminado e 12 ASTM para o que foi normalizado em forno. Portanto, neste caso não só ocorreu algum refino no tamanho de grão após a laminação no forno, como também foi observado ligeiro refino microestrutural ao se incorporar o V na liga.

**Tabela 2.** Propriedades mecânicas obtidas em exemplos de esboços com 15 mm de espessura feitos com aço microligado ao NbTiV, direto do calor de laminação e depois de tratamento térmico adicional de normalização.

Laminado					Normalizado				
LE [MPa]	LR [MPa]	RE	ALO [%]	Energia [J]	LE [MPa]	LR [MPa]	RE	ALO [%]	Energia [J]
480	628	0,76	27	73	384	536	0,72	29	138
448	588	0,76	26	166	384	528	0,73	30	163
459	590	0,78	28	160	379	508	0,74	29	156



(a)



(b)

**Figura 2.** Microestruturas típicas da chapa de aço NbTiV processada por (a) laminação de normalização e (b) após tratamento térmico adicional de normalização. Ataque de nital 3%, aumento de 200 vezes.

É interessante notar que a primeira chapa listada na tabela 2 apresentou tenacidade bem menor (73 J) do que as duas últimas (160 e 166 J). Essa diferença pode ser atribuída ao fato das duas últimas chapas terem sido laminadas sob esquema de passes durante a fase de esboçamento que foi realizado de forma a aplicar reduções crescentes por passe após a fase de alargamento. Já foi comprovado que essa estratégia de esquema de passes contribui tanto para maior refino, como para maior uniformidade do tamanho de grão, promovendo melhoria nos resultados de tenacidade, uma vez que as deformações mais pesadas são aplicadas num esboço relativamente mais leve, facilitando a penetração da deformação até seu núcleo [11].

#### 4 CONCLUSÃO

Os resultados da laminação de normalização de chapas grossas leves com espessura de 15 mm feitas com aço microligado ao NbTi apresentaram bons resultados em termos de propriedades mecânicas, atendendo à norma EN 10025-2

S355J2. Contudo, os valores de limite de escoamento obtidos após o tratamento adicional de normalização das chapas apresentaram margem de segurança praticamente nula para o atendimento ao valor mínimo de limite de escoamento especificado por essa norma. Uma micro-adição suplementar de V permitiu elevar os valores de resistência mecânica, tanto no estado como laminado, como após a normalização adicional, resolvendo esse problema. Observou-se ainda que essa alteração na liga promoveu a formação de microestruturas mais refinadas em relação às observadas no aço ao NbTi, sendo o grau de refino ligeiramente maior para o caso dos esboços submetidos ao tratamento de normalização adicional no forno. Note-se ainda que não foi constatado efeito de refino microestrutural após o tratamento térmico de normalização nos aços sem V.

## REFERÊNCIAS

- 1 Chaboud A, Cunche G, Fazan B. New Computer System for Normalizing Rolling of Custom Size Plates. In: 4<sup>th</sup> International Conference on Steel Rolling, Deauville. Proceedings... IRSID, 1987, p. 10.1-10.6.
- 2 de Boer, H, Heller T, Müsgen B. Erfahrungen mit dem normalisierenden Walzen von Warmbreitband. Stahl und Eisen. 1991;111(5):45-50.
- 3 Jecmenica M, Stefanovic R, Vukicevic G. Development of Hot Rolled Coils in S355J2+N Grade with 0.03% Maximum Si Content in Zelezara Smederevo Hot Strip Mill. Metallurgical and Materials Engineering. 2015;21(3):183-193.
- 4 de Sousa G, dalla Bernardina VV. A Usiminas e o Mercado de Torres Eólicas no Brasil. In: 49° Seminário de Laminação – Processos e Produtos Laminados e Revestidos, Vila Velha. Anais... ABM, 2012, p. 748-759.
- 5 Gorni AA, Cavalcanti CG, Reis JSS, da Silveira JHD. Produção de Chapas Grossas Normalizadas Diretamente do Calor de Laminação. In: 34° Seminário de Laminação – Processos e Produtos Laminados e Revestidos, Belo Horizonte. Anais... ABM, 1997, p. 479-498.
- 6 Diniz PP. O processo de laminação de normalização nas propriedades mecânicas de chapas grossas estruturais de aço carbono-manganês microligados ao nióbio e titânio [monografia]. São Paulo: Escola Politécnica, USP; 2008.
- 7 Irvine KJ, Pickering FB, Gladman T. Grain-Refined C-Mn Steels. Journal of the Iron and Steel Institute, 1967, 205:161-182.
- 8 Ouchi C, Sampey T, Kosazu I. The Effect of Hot Rolling Condition and Chemical Composition on the Onset Temperature of Gamma-Alpha Transformation After Hot Rolling. Transactions of the ISIJ. 1982;22(3):214-222.
- 9 Gorni AA, Cavalcanti CG, Reis JSS, Silveira JHD, Silva CNP. Uso de Laminação de Normalização para a Produção de Chapas Grossas Grau DIN 17100 St 52.3N. In: 53° Congresso Anual da Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais, Belo Horizonte. Anais... ABM, 1998, p. 850-864.
- 10 Goli-Oglu EA. The Manufacturing Process of Heavy Plates Up to 150 mm from Structural Steel Microalloyed with Vanadium. Steel in Translation. 2015;45(8):55-61.
- 11 Stalheim, DG. Optimized Production of Niobium Microalloyed Slabs, Plate and Coil. In: 4<sup>th</sup> International Conference on Thermo-Mechanical Simulation and Processing of Steels – SimPro '16, Ranchi. Proceedings... Steel Authority of India, 2016, 171-184.