

INFLUÊNCIA DOS PARÂMETROS DE LAMINAÇÃO DE NORMALIZAÇÃO SOBRE A TENACIDADE DE UM AÇO MICROLIGADO AO Nb, V E Ti PROCESSADO NA LINHA DE CHAPAS GROSSAS DA GERDAU*

Ricardo José de Faria¹
Antônio Augusto Gorni²
Daniel Bojikian Matsubara³
José Herbert Dolabela da Silveira⁴
Romeu Thomaz Viana Junior⁵
Thais de Lima Barreto⁶

Resumo

Foi investigada a influência dos parâmetros de laminação de normalização sobre a tenacidade de umaço microligado ao NbVTi em espessuras de 15 e 30 mm. Os materiais foram caracterizados através dos ensaios de tração, resistência ao impacto Charpy e medição de tamanho de grão médio. O processo de laminação foi analisado através da determinação da resistência média à deformação a quente (*Mean Flow Stress - MFS*) e pelo modelo MicroSim para avaliação da evolução microestrutural. O modelo MicroSim apresentou resultados interessantes que ajudaram a explicar de certa forma os valores de tenacidade obtidos. Essas análises foram feitas com o objetivo de buscar correlações entre o processo de laminação e os valores de tenacidade obtidos no produto final.

Palavras-chave: Aço microligado; Evolução Microestrutural; Tenacidade.

INFLUENCE OF THE NORMALIZING ROLLING PARAMETERS ON THE TOUGHNESS OF ANB, V AND Ti MICROALLOYED STEEL PROCESSED IN THE GERDAU PLATE MILL

Abstract

The influence of normalizing rolling parameters on the toughness of NbVTi microalloyed steel was investigated in 15 and 30 mm thick. The materials were characterized using tension tests, Charpy impact tests, and mean grain size measurements. The rolling process was analyzed by the determination of the hot mean flow stress (MFS) using the MicroSim model for microstructural evolution. The MicroSim model presented interesting results that helped to explain in some way the obtained toughness values. These analysis were made with the objective to establish correlations between the rolling process and the toughness results on the final product.

Keywords: Microalloyed Steel; Microstructural Evolution; Toughness.

¹ Engenheiro Metalurgista, M. Eng., Especialista em Produtos, Gerência de P&D, Gerdau, Ouro Branco, MG, Brasil.

² Engenheiro de Materiais, M. Eng., Dr. Eng., Consultor Técnico, Gerência de P&D, Gerdau, Ouro Branco, MG, Brasil.

³ Engenheiro Metalurgista, M. Eng., Especialista em Produtos, Gerência de P&D, Gerdau, Ouro Branco, MG, Brasil.

⁴ Engenheiro Metalurgista, M. Eng., Gerente de Chapas Grossas, Gerência de Laminação de Chapas Grossas, Gerdau, Ouro Branco, MG, Brasil.

⁵ Engenheiro Metalurgista, Especialista, Gerência de P&D, Gerdau, Ouro Branco, MG, Brasil.

⁶ Estudante de Engenharia Metalúrgica, Estagiária, Gerência de P&D, Gerdau, Ouro Branco, MG, Brasil.

1 INTRODUÇÃO

A laminação de normalização é um tratamento termomecânico que vem sendo muito aplicado nas últimas décadas, em função da supressão do tratamento térmico em forno, que contribui para agilizar e reduzir os custos de fabricação. 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 [1].

De uma forma geral, a principal finalidade metalúrgica do processo de laminação é criar um balanço adequado entre as fases de esboçamento e acabamento. Desta forma, é de suma importância o conhecimento das temperaturas críticas do produto a ser processado bem como a quantidade de Nb em solução sólida, para desta forma desenvolver um esquema de passes apropriado para o condicionamento do tamanho de grão da austenita durante a fase de esboçamento e promover a precipitação induzida pelos carbonitreto de Nb nos passes de acabamento que irão definir a microestrutura final [2, 3].

O tamanho final do grão de ferrita transformada e sua distribuição são definidos pelos tipos de recristalização que decorrem do projeto de liga utilizado e do processo de laminação. Esses três tipos são: Tipo I - Recristalização plena, Tipo II - Recristalização suprimida e Tipo III - Recristalização parcial. Para se atingir condições ótimas de propriedades mecânicas e microestrutura é necessário um mínimo de 50-60% de deformação onde ocorre a recristalização do Tipo I, seguido por um mínimo de 30% onde ocorre a recristalização do Tipo II e o mínimo possível de deformação onde ocorre a recristalização do Tipo III [3].

O desempenho do esboço em termos de tenacidade, medida pelo ensaio DWTT, está relacionado diretamente com a temperatura de início de acabamento, conforme mostra a figura 1, adaptada [4]. Como se pode observar, os valores de área dúctil da fratura obtidos no ensaio DWTT apresentam máxima dispersão quando o acabamento se inicia acima da RLT (Recrystallization Limit Temperature). Essa dispersão diminui progressivamente quando a temperatura de início de acabamento encontra-se abaixo de RLT e se aproxima de RST (Recrystallization Stop Temperature). A tenacidade medida pelo ensaio DWTT assume valores máximos e com baixa dispersão quando o acabamento se inicia abaixo de RST.

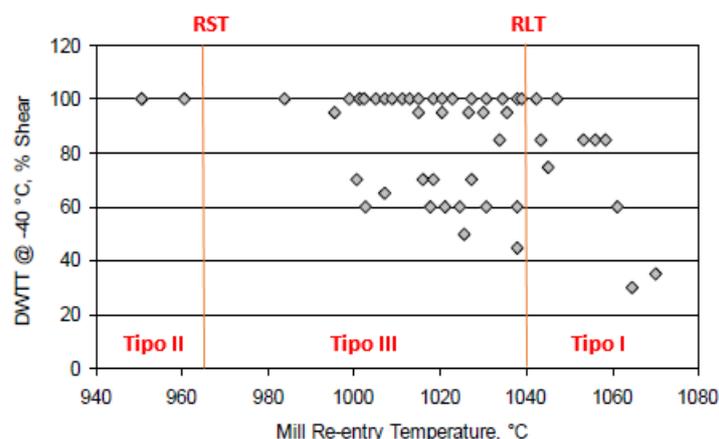


Figura 1. Efeito da temperatura de início da fase de acabamento nos valores de área dúctil no ensaio de DWTT transversal.

2 DESENVOLVIMENTO

O projeto de liga adotado foi um aço CMnmicroligadoaoNb, Ti e V, material consagrado para a produção de chapasgrossas via laminação de normalização conforme várias indicações da literatura [5-7], com o Ti atuando no sentido de refinar o tamanho de grão durante o reaquecimento da placa e o Nb exercendo o mesmo efeito, mas durante a laminação a quente, além de contribuir para algum endurecimento por precipitação. A tabela 1 mostra o projeto de liga utilizado.

Tabela 1: Composição química visada nas corridasprovenientes dos esboços deste estudo.

%C	%Mn	%(S + P)	%(Nb + V + TI)	N ppm
0,15	1,45	<0,035	0,09	< 70

Foram reaquecidas quatro placas, todas na espessura de 250 mm, sob temperatura suficiente para solubilizar o Nb, de acordo com o valor previsto pela equação de Irvine [8], mas com redução no teor de N dissolvido 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 cumprir adequadamente a temperatura de acabamento, a qual se situou dentro do campo austenítico da liga, de acordo com o valor de A_{r3} calculado pela equação de Ouchi [9]. As placas foram laminadas nas espessuras de 15 e 30 mm, sendo objetivado o atendimento 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 laminado, bem como ensaios de resistência ao impacto Charpy usando corpos de prova medindo 10 mm x 10 mm, usinados na direção longitudinal do laminado e usando entalhe em forma de "V". Também foram realizados ensaios metalográficos visando a determinação do tamanho de grão médio das microestruturas obtidas, segundo a norma ASTM E 112.

O processo de laminação de normalização foi analisado através da determinação da resistência média à deformação a quente para cada passe usando o modelo inverso de Sims [10], bem como da determinação dos tipos de recristalização previstos e a evolução microestrutural ocorrida durante o processo usando-se o programa computacional MicroSim, desenvolvido pelo CEIT sob patrocínio da CBMM [11].

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A tabela 2 mostra os resultados de tração e impacto Charpy obtidos em casos selecionados, podendo-se observar que eles atenderam plenamente aos requisitos especificados pela norma EN 10025-2 S355 J2.

Tabela 2. Propriedades mecânicas de tração e impacto Charpy obtidas em amostras referentes aos esboços de 15 mm e 30 mm de espessura.

Amostra	Espessura (mm)	LE (MPa)	LR (MPa)	AL $_{5,65 \sqrt{A_0}}$ (%)	Energia Média (J)
Moderada tenacidade	15	399	546	30	47
Boa tenacidade	15	421	537	28	186
Moderada tenacidade	30	400	568	22	58
Boa tenacidade	30	387	528	28	141

Apesar do atendimento à especificação, os valores obtidos no ensaio de resistência ao impacto Charpy foram muito diferentes entre os pares com mesma espessura. Devido a isso, fez-se necessário avaliar o motivo destas diferenças.

As figuras de 2 a 9 mostram as microestruturas típicas das chapas de aço Nb, Ti e V processadas por laminação de normalização, nas posições próximo à superfície e a 1/4 da espessura das 4 amostras aqui estudadas. Pode-se observar que não há diferenças visuais marcantes entre as microestruturas aqui apresentadas.



Figura 2: Micrografia do esboço com 15 mm de boa tenacidade. Ataque de nital 4%, aumento de 50 vezes, superfície.

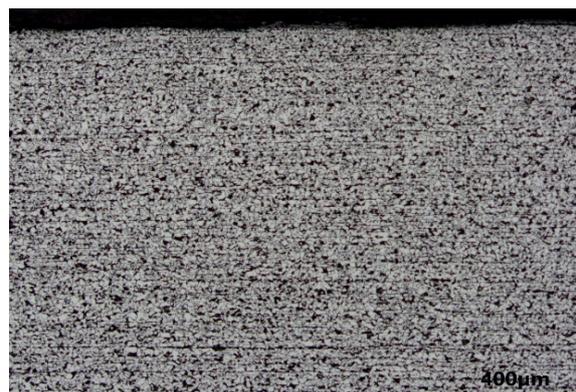


Figura 3: Micrografia do esboço com 15 mm de tenacidade moderada. Ataque de nital 4%, aumento de 50 vezes, superfície.

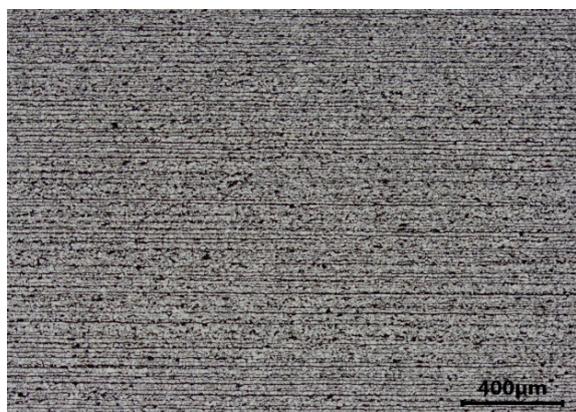


Figura 4: Micrografia do esboço com 15 mm de boa tenacidade. Ataque de nital 4%, aumento de 50 vezes, 1/4 da espessura.

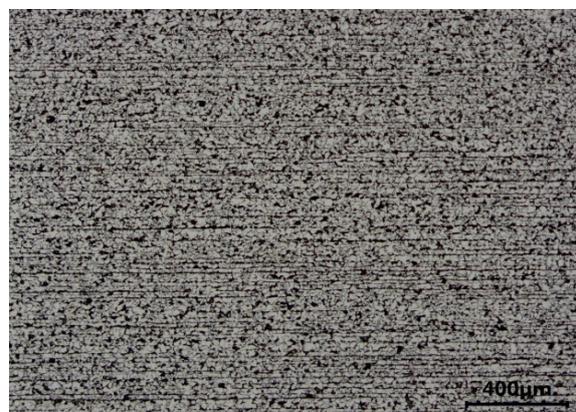


Figura 5: Micrografia do esboço com 15 mm de tenacidade moderada. Ataque de nital 4%, aumento de 50 vezes, 1/4 da espessura.

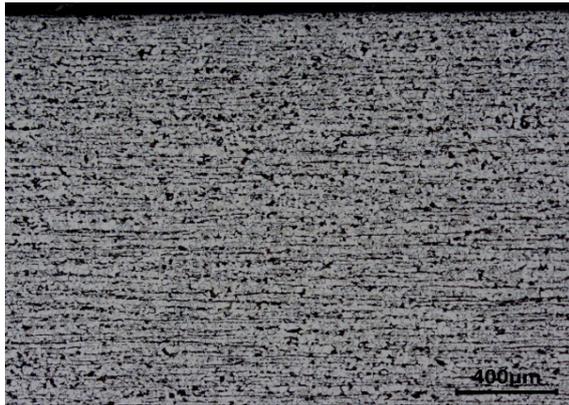


Figura 6: Micrografia do esboço com 30 mm de boa tenacidade. Ataque de nital 4%, aumento de 50 vezes, superfície.

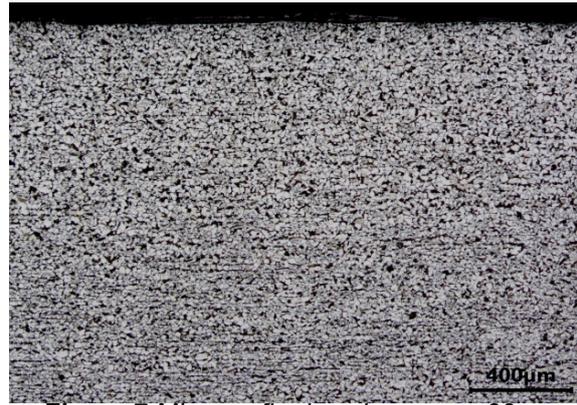


Figura 7: Micrografia do esboço com 30 mm de tenacidade moderada. Ataque de nital 4%, aumento de 50 vezes, superfície.

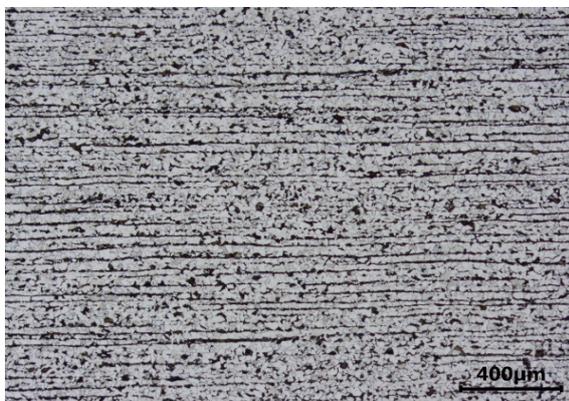


Figura 8: Micrografia do esboço com 30 mm de boa tenacidade. Ataque de nital 4%, aumento de 50 vezes, 1/4 da espessura.

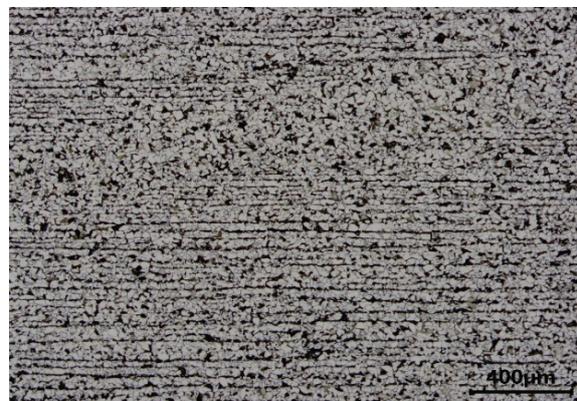


Figura 9: Micrografia do esboço com 30 mm de tenacidade moderada. Ataque de nital 4%, aumento de 50 vezes, 1/4 da espessura.

A tabela 3 mostra os resultados o tamanho médio de grão medido conforme a norma ASTM E112.

Tabela 3. Medição de tamanho de grão ferrítico médio obtidas em amostras referentes aos esboços de 15 mm e 30 mm de espessura.

Amostra	Espessura (mm)	Tamanho de grão médio (µm)	Desvio Padrão	Amplitude
Moderada tenacidade	15	8,2	1,27	0,64
Boa tenacidade	15	6,0	1,16	0,59
Moderada tenacidade	30	8,4	1,44	0,73
Boa tenacidade	30	8,9	1,34	0,68

Foram obtidos tamanhos de grão de 6,0 e 8,2 µm, respectivamente, para os esboços de 15 mm de espessura, o que justifica de certa forma os diferentes valores de tenacidade encontrados para esse material. Entretanto, essa diferença não foi observada no material com 30 mm de espessura.

As figuras de 10 a 13 mostram os gráficos da resistência média à deformação a quente (*Mean Flow Stress, MFS*) determinados a partir das condições do processo de laminação dos quatro esboços deste estudo.

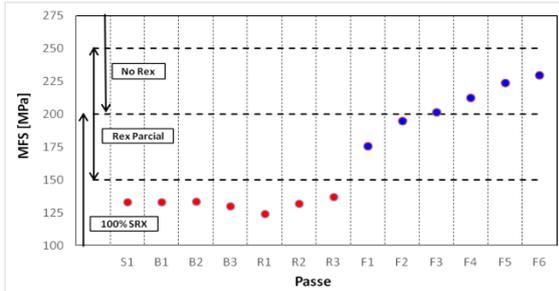


Figura 10: Resistência média a deformação a quente por passe para o esboço de 15 mm de boa tenacidade.

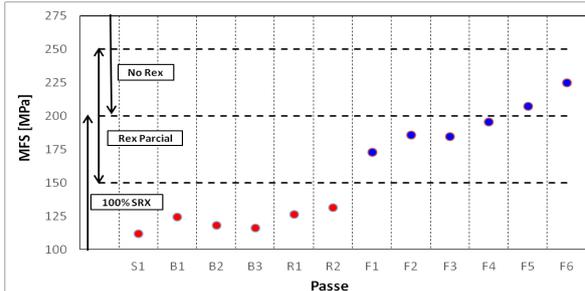


Figura 11: Resistência média a deformação a quente por passe para o esboço de 15 mm de tenacidade moderada.

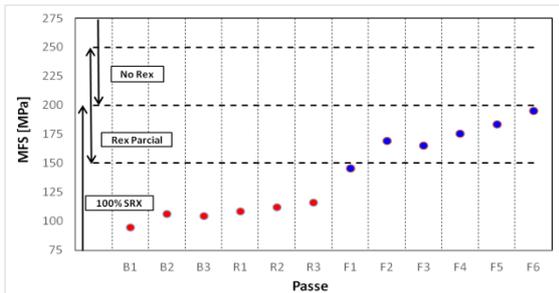


Figura 12: Resistência média a deformação a quente por passe para o esboço de 30 mm de boa tenacidade

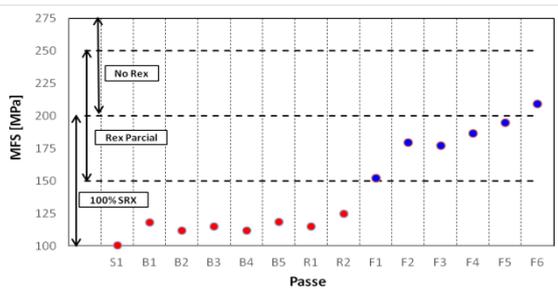


Figura 13: Resistência média a deformação a quente por passe para o esboço de 30 mm de tenacidade moderada.

Neste trabalho não puderam ser observadas diferenças nas evoluções de resistência média a deformação a quente ao longo do esquema de passes que justificassem as diferenças nos valores obtidos de tenacidade. Contudo, é preciso observar que a pequena quantidade de dados dificulta uma análise mais abrangente.

As figuras 14 a 15 mostram os gráficos de percentual de recristalização após os passes calculados pelo modelo MicroSim nos esboços de 15 mm de espessura a partir dos parâmetros efetivos de processo.

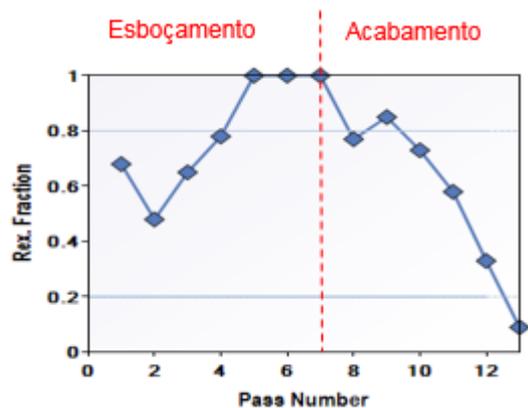


Figura 14: Percentual de recristalização ocorrida após os passes no esboço de 15 mm de boa tenacidade.

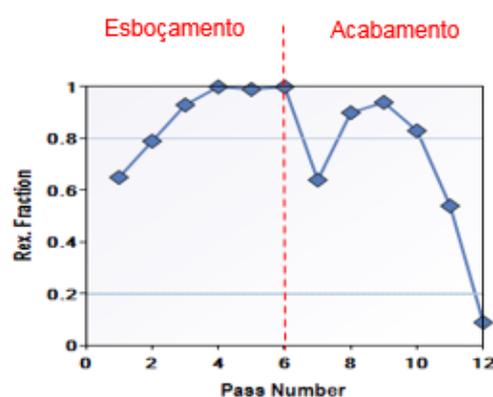


Figura 15: Percentual de recristalização ocorrida após os passes no esboço de 15 mm de tenacidade moderada.

A tabela 4 mostra os diferentes tipos de recristalização previstos pelo modelo MicroSim ao longo do esquema de passes para os esboços de 15 mm de espessura a partir de parâmetros efetivos de processo.

Tabela 4: Tipos de recristalização previstos para os esboços de 15 mm de espessura, segundo o modelo MicroSim.

Esboço 15 mm	% Redução			
	Plena (Tipo I)	Parcial (Tipo III)	Suprimida (Tipo II)	Deformação Acumulada
Boa tenacidade	73,1	23,0	61,8	0,91
Moderada tenacidade	81,5	21,5	26,0	0,55

A tabela 5 mostra os resultados de tamanhos de grão finais previstos pelo modelo MicroSim para os dois esboços de 15 mm de espessura, a partir de parâmetros efetivos de processo.

Tabela 5: Evolução microestrutural para os esboços de 15 mm de espessura, segundo o modelo MicroSim.

Esboço 15 mm	Tamanho de Grão - μm				
	Austenítico pós laminação				Ferrítico Médio
	Médio	Máximo	Zd	Crítico	
Boa tenacidade	9,3	133	14,3	34	8,2
Moderada tenacidade	14,5	132	9,1	48	9,9

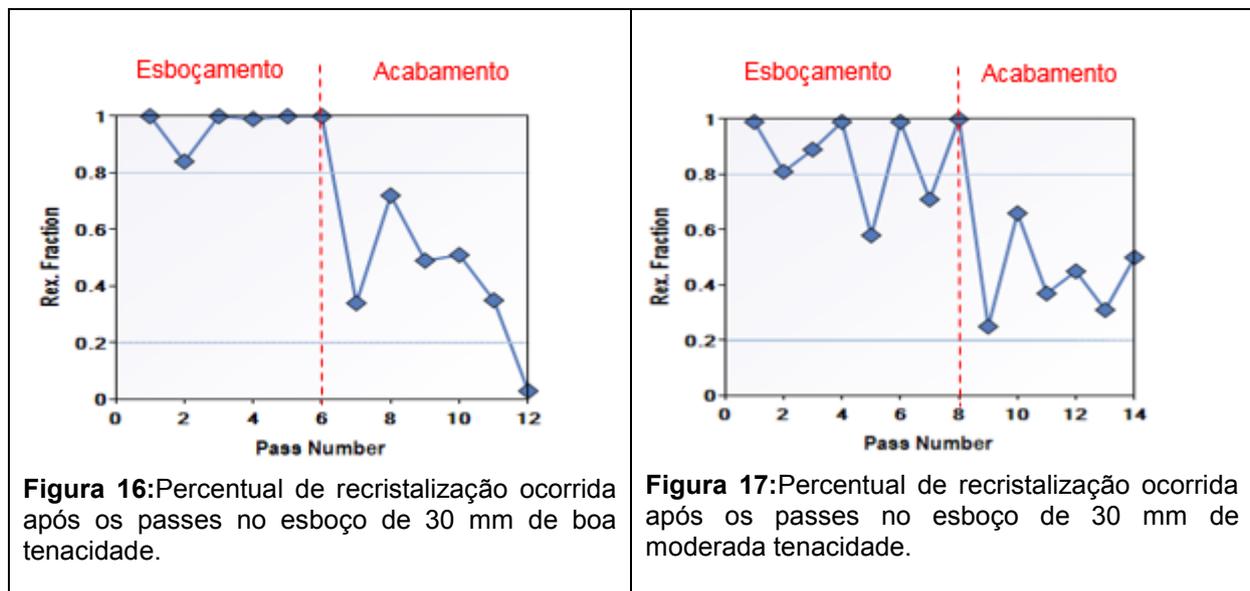
* Crítico: 10% dos grãos com maior tamanho estão acima desse valor.

Pode-se observar na figura 15 que o MicroSim previu a ocorrência de graus de recristalização superiores a 80% entre os passes de acabamento de 2 a 4 no caso do material de moderada tenacidade, tornando-os virtualmente passes de esboçamento. Portanto pode-se inferir que se perdeu boa parte do efeito de refino microestrutural que a fase de acabamento deveria exercer sobre a austenita.

A tabela 5 mostra que o material que apresentou tenacidade moderada apresentou maior tamanho de grão austenítico final, o qual possui relação direta com o tamanho de grão ferrítico obtido, que ficou menos refinado. Além disso, este apresentou menor grau de encruamento da austenita (0,55) comparado ao material de boa tenacidade (0,91), o que deve ter reduzido a densidade de núcleos de ferrita durante a transformação da austenita, contribuindo para o maior valor de seu tamanho de grão. Curiosamente, o material de tenacidade moderada apresentou microestrutura mais homogênea, ou seja, menor valor da razão entre os valores máximo e médio de tamanho de grão (Zd). Isso certamente é consequência do maior efeito de homogeneização microestrutural decorrente da aplicação de maior número de passes onde ocorreu mais de 80% de recristalização no intervalo entre passes.

Vale ressaltar que os valores de tamanho de grão ferrítico medidos e calculados pelo MicroSim para os esboços com 15 mm de espessura não foram exatamente iguais, mas apresentaram a mesma tendência: menor valor para material com boa tenacidade.

As figuras 16 a 17 mostram os gráficos de percentual de recristalização após os passes obtidos nos dois esboços laminados com espessura de 30 mm.



A tabela 6 mostra os diferentes tipos de recristalização previstos pelo MicroSim para os esboços com 30 mm de espessura a partir de parâmetros efetivos de processo.

Tabela 6: Tipos de recristalização previstos nos esboços de 30 mm de espessura segundo o modelo MicroSim.

Esboço 30 mm	% Redução			
	Plena (Tipo I)	Parcial (Tipo III)	Suprimida (Tipo II)	Deformação Acumulada
Boa tenacidade	45,9	14,4	61,4	0,53
Moderada tenacidade	23,1	0	77,0	0,70

A tabela 7 mostra os resultados de tamanhos de grão finais previstos pelo modelo MicroSim para os dois esboços de 30 mm de espessura a partir de parâmetros efetivos de processo.

Tabela 7: Evolução microestrutural para os esboços de 30 mm de espessura segundo o modelo MicroSim.

Esboço 30 mm	Tamanho de Grão - μm				
	Austenítico pós laminação				Ferrítico
	Médio	Máximo	Zd	Crítico	
Boa tenacidade	19,2	199	10,4	51	14,5
Moderada tenacidade	11,8	162	13,8	35	12,9

*Crítico: 10% dos grãos com maior tamanho estão acima desse valor.

O número exagerado de passes de esboçamento no caso do material de tenacidade moderada (figura 17) impediu a ocorrência de sucessivos ciclos de recristalização plena após cada passe, fazendo com que sua microestrutura fosse menos homogênea que a do material que apresentou boa tenacidade. O parâmetro Zd do

material de tenacidade moderada foi igual a 13,8 μm , contra 10,4 μm do esboço com boa tenacidade.

As primeiras reduções durante o acabamento do material de tenacidade moderada foram menores do que no caso do material com boa tenacidade. De acordo com o modelo MicroSim, isso levou à menor ocorrência de recristalização parcial, refinando mais o grão e aumentando a deformação acumulada, o que se refletiu num tamanho de grão ferrítico ligeiramente menor no esboço de tenacidade moderada. Contudo, a fase de acabamento não conseguiu reduzir o grau de heterogeneidade presente no tamanho de grão austenítico herdado do esboço, o que deve ter se refletido na microestrutura final e comprometeu a tenacidade.

Também neste caso a tendência observada entre os tamanhos de grão ferríticos medidos para os esboços com 30 mm de espessura foi a mesma verificada nos valores calculados pelo MicroSim.

3 CONCLUSÃO

Foram apresentados aspectos fundamentais relacionados a tenacidade, microestrutura, tamanho de grão médio e processamento termomecânico de chapas grossas.

Não puderam ser observadas diferenças nas evoluções de resistência média a deformação a quente entre os materiais aqui estudados que justificassem as diferenças nos valores obtidos de tenacidade.

A análise via MicroSim apresentou resultados interessantes que ajudaram de certa forma a explicar os valores obtidos na tenacidade encontrados nos materiais deste estudo. Embora não houvesse uma concordância numérica plena, os resultados de tamanho de grão ferríticos médio calculados pelo MicroSim foram coerentes em termos de tendência com os valores medidos. Entretanto, ainda é necessário analisar um número bem maior de casos para revelar de forma mais precisa e confiável, as relações entre os parâmetros de tratamento termomecânico e microestrutura final, de forma a se obter bons valores de tenacidade.

Agradecimentos

Os autores agradecem à CBMM, na pessoa de Marcelo Arantes Rebellato, pela possibilidade do uso do modelo de evolução microestrutural MicroSim para efetuar a análise do processo de laminação de normalização dos materiais aqui estudados.

REFERÊNCIAS

1. Chaboud A, Cunche G, Fazan B. New Computer System for Normalizing Rolling of Custom Size Plates. In: 4th International Conference on Steel Rolling, Deauville. Proceedings, 1987, p. 10.1-10.6.
2. Stalheim D. Recrystallization Behaviors in the Production of Structural Steels, Proceedings of ABM 52nd Rolling Seminar, Brazil, 2015.
3. Stalheim D. Basic metallurgy/processing design concepts For optimized hot strip structural steel in Yield strengths from 300–700 MPa, Proceedings of ABM 53rd Rolling Seminar, Brazil, 2016.
4. Bodnar R, Bai D, Dorricot J, Ward J. Development of Discrete X80 Line Pipe Plate at SSAB Americas. In: International Symposium on the Recent Developments in Plate Steels. 2016.

5. De Sousa G, dallaBernardina 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.
6. 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.
7. 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.
8. Irvine KJ, Pickering FB, Gladman T. Grain-Refined C-Mn Steels. Journal of the Iron and Steel Institute, 1967, 205:161-182.
9. 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.
10. Maccagno T. M., JONAS J. J, YUE S. Determination of Recrystallization Stop Temperature from Rolling Mill Logs and Comparison with Laboratory Simulation Results. ISIJ international, Vol 34 (1994), NO. 11, pp. 917-922.
11. Uranga, P. et al. Application of Practical Modeling of Microalloyed Steels for Improved Metallurgy, Productivity and Cost Reduction in Hot Strip Mill Applications. In: Iron & Steel Technology Conf. - AISTech 2016, Association for Iron and Steel Technology, Pittsburgh, May 2016, 1769-1778.