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

EFEITO DE DIFERENTES ESTRATÉGIAS DE LAMINAÇÃO EM PROPRIEDADES MECÂNICAS DE UM AÇO LAMINADO A QUENTE E DE ULTRA-ALTA RESISTÊNCIA

Ricardo Porto[1,2], Charles de Abreu Martins[1], Leonardo Barbosa Godefroid[2], Geovane de Assis Faria[2]
1. ArcelorMittal Brasil ; 2. Universidade Federal de Ouro Preto / REDEMAT

Introdução

Aços S700 são amplamente utilizados em aplicações estruturais devido à sua elevada resistência mecânica. Entretanto, a obtenção simultânea de alta resistência e elevada tenacidade permanece um desafio, uma vez que estratégias tradicionais de endurecimento por precipitação podem comprometer a tenacidade do material.

Objetivos

Desenvolver uma estratégia de laminação termomecânica capaz de gerar microestrutura acicular refinada e preservar o endurecimento por nanoprecipitação, visando melhorar o balanço entre resistência mecânica e tenacidade.

Metodologia

Produção industrial com 2 estratégias de fabricação (Figura 1) para comparar os resultados da estratégia convencional com a estratégia alternativa. Para esta última estratégia, foi utilizado um atraso no início de refriamento para minimizar a redução na precipitação.

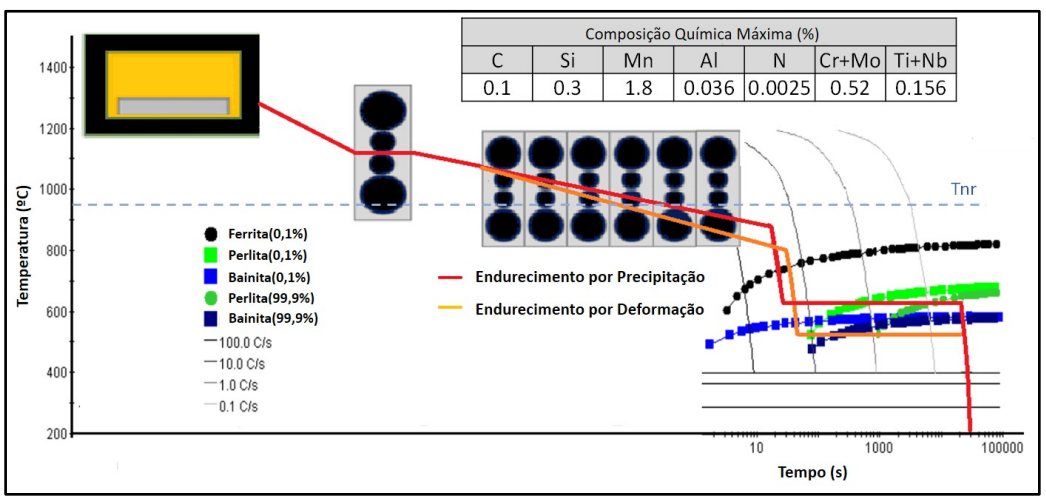


Figura 1. Estratégias de laminação.

As metodologias empregadas para avaliação do material produzido são apresentadas na Tabela 1.

Microestrutural	Ensaios Mecânicos
○ Microestrutura; ○ Tamanho de Grão; ○ EBSD (KAM/GND); ○ Precipitados (TEM – Réplica de Carbono).	○ Tração; ○ Impacto Charpy – curva de transição; ○ Tenacidade à Fratura - integral J; ○ Fadiga - SxN e da/dN x ΔK.

Tabela 1. Procedimentos experimentais.

Resultados e Discussão

A utilização da estratégia de endurecimento por deformação associada ao atraso no início de resfriamento resultou no aumento das propriedades mecânicas obtidas no ensaio de tração, conjuntamente com aumento da tenacidade e resistência à fadiga do material (Tabela 2).

Propriedades Mecânicas	Precipitação	Deformação
σ_{YS} (MPa)	719	800
σ_{UTS} (MPa)	785	868
CVN a -20°C (J)	20	67
DBTT (ºC)	-10	-42
J_{IC} (kJ/m^2)	147	170
σ_{FL} (MPa) (1x10^7 ciclos)	155	190
ΔK_{TH} (MPa.m$^{1/2}$)	7,8	8,8

Tabela 2. Propriedades Mecânicas.

O atraso no início de resfriamento proporcionou:

- Obtenção de uma janela cinética para a nucleação de carbetos complexos (Ti,Nb,Mo)C na interface em migração γ/α.
- Preservação do endurecimento por precipitação, conforme indicado (Tabela 3). A análise de réplica de carbono via MET confirmou densidade equivalente de nanoprecipitados entre as 2 estratégias de laminação utilizadas.
- Redução da quantidade de precipitados grosseiros formados no processo de laminação e eliminação do crescimento anormal de grãos.

Mecanismo de Endurecimento	Precipitação	Deformação
Fricção da Rede (σ_0)	53 MPa	53 MPa
Solução Sólida ($\Delta\sigma_{ss}$)	123 MPa	119 MPa
Refino de Grão ($\Delta\sigma_{gb}$)	230 MPa	285 MPa
Discordâncias ($\Delta\sigma_{dis}$)	140 MPa	170 MPa
Nanoprecipitação ($\Delta\sigma_{prec}$)	181 MPa	182 MPa
Total Calculado (σ_{YS})	**727 MPa**	**809 MPa**
Resultado Experimental	**719 MPa**	**800 MPa**

Erro Médio= 1,1%

Tabela 3. Contribuição dos Mecanismos de Endurecimento.

Conclusões

- O atraso controlado do início do resfriamento permitiu o não interrompimento da precipitação na interface de transformação γ/α;
- A rota desenvolvida permitiu ganhos simultâneos de resistência mecânica, tenacidade e desempenho em fadiga.
- A estratégia demonstrou potencial para aplicação industrial na produção de aços estruturais da classe S700.

Referências e Agradecimentos

- Hu, C.Y., Dong, H.Y., Wu, G.H. et al. A Thermodynamic Analysis of Strengthening Mechanisms and Process-Structure-Property Relationships in Ti-Nb-Mo High-Strength Ferritic Alloy. J. of Materi Eng and Perform 30, 2946–2954 (2021). https://doi.org/10.1007/s11665-021-05517-6;
- Mao X, Huo X, Sun X, Chai Y. Strengthening Mechanisms of a New 700MPa Hot Rolled Ti-Microalloyed Steel Produced by Compact Strip Production. Journal of Materials Processing Technology 2010;210:1660–6. https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2010.05.018;
- Stalheim DG. Metallurgical and Process Strategy for the Production of 700 MPa Hot Rolled Structural Steel Coil. Anais do Congresso Anual da ABM, Rio de Janeiro: Editora Blucher; 2017, p. 745–56. https://doi.org/10.5151/1516-392X-30301.

Agradecimentos: ArcelorMittal Tubarão, UFOP / REDEMAT, CDTN e ArcelorMittal Global R&D East Chicago pelo suporte técnico e análises realizadas.