

# DESENVOLVIMENTO DE AÇOS MICROLIGADOS COM ALTA RESISTÊNCIA MECÂNICA E BOA DUCTILIDADE<sup>1</sup>

*Antonio Augusto Gorni<sup>2</sup>  
Marcos Domingos Xavier<sup>3</sup>  
Benedito Dias Chivites<sup>4</sup>  
Maurício Domingos Campos Junior<sup>5</sup>*

## Resumo

O objetivo deste trabalho foi determinar, através de ensaios de laminação a quente, as ligas e parâmetros de processo mais adequados para aços microligados com alta resistência mecânica e boa ductilidade. As faixas de valores recomendados para as diversas propriedades são: limite de escoamento entre 450 e 550 MPa, limite de resistência entre 550 e 650 MPa, razão elástica menor ou igual a 85% e alongamento total mínimo de 25%. Os resultados dos ensaios de laminação laboratorial efetuados neste trabalho mostraram que aço ao NbTi, contendo teores máximos de 0,12% C, 1,30% Mn e 0,080% Nb+Ti permitiu atender a esses objetivos.

**Palavras-chave:** Aços de alta resistência e baixa liga; Ductilidade; Laminação de tiras a quente.

## DEVELOPMENT OF MICROALLOYED STEELS WITH HIGH STRENGTH AND GOOD DUCTILITY

### Abstracts

The aim of this work was to identify, through laboratory hot rolling tests, the most adequate alloys and process parameters that must be used for the production of hot coils of HSLA steels with good ductility. The aimed value ranges for mechanical properties are: yield strength, 450~550 MPa; tensile strength, 550~650 MPa; maximum yield ratio, 0.85; and total elongation, 25%. The results got from the hot rolling trials performed in this work showed that NbTi steels, with maximum amounts of 0.12% C, 1.30% Mn and 0.080% Nb+Ti, can reach that goal.

**Key words:** High strength low alloy steels; Ductility; Hot strip rolling.

---

<sup>1</sup>Contribuição técnica ao 62º Congresso Anual da ABM – Internacional, 23 a 27 de julho de 2007, Vitória – ES, Brasil.

<sup>2</sup>Membro da ABM. Engenheiro de Materiais, M. Eng., Dr. Eng., Analista de Processos da Gerência de Suporte Técnico da Laminação a Quente, Companhia Siderúrgica Paulista – COSIPA, Cubatão SP. E-Mail: [gorni@cosipa.com.br](mailto:gorni@cosipa.com.br)

<sup>3</sup>Membro da ABM. Engenheiro Metalurgista, M.Sc., Técnico do SENAI 1.19, Osasco SP. E-Mail: [controles119@sp.senai.br](mailto:controles119@sp.senai.br)

<sup>4</sup>Membro da ABM. Técnico Metalurgista, Assistente Técnico de Produto da Gerência de Gerência de Controle Integrado do Produto, Companhia Siderúrgica Paulista – COSIPA, Cubatão SP. E-Mail: [chivites@cosipa.com.br](mailto:chivites@cosipa.com.br)

<sup>5</sup>Membro da ABM. Técnico em Siderurgia, Gerente de Produção, Araya do Brasil Industrial Ltda., Taubaté SP.

## INTRODUÇÃO

A crescente instabilidade política nas regiões produtoras de petróleo e a ameaça cada vez mais próxima de alterações climáticas radicais provocadas pelo efeito estufa continuam a reiterar a necessidade de se reduzir o consumo de combustíveis fósseis. Na área automotiva tal necessidade se traduz, entre outras medidas, na redução do peso dos veículos, a qual pode ser conseguida pelo uso de materiais alternativos mais leves, mas com mesmo nível de resistência mecânica que os convencionais. Essa necessidade se torna ainda mais premente em função da crescente incorporação de itens de conforto e recursos eletroeletrônicos nos automóveis, a qual anula parte da redução de peso conseguida pelos novos materiais.

Essa situação forçou as usinas siderúrgicas a aperfeiçoarem cada vez mais seus produtos, incluindo o desenvolvimento de novos aços com combinações inéditas de microestruturas que resultam em propriedades mecânicas mais favoráveis à manufatura e ao desempenho sob serviço dos componentes automotivos, com redução de seu peso e baixo impacto no custo final. No caso dos produtos laminados a quente essa evolução foi conseguida através do uso de elementos de microliga e adoção de tratamentos termomecânicos, obtendo-se a partir daí os aços com fração reduzida de perlita, bifásicos (*dual phase*), multifásicos (*TRIP*) etc.<sup>[1-5]</sup>

O objetivo deste trabalho foi desenvolver, em escala laboratorial, aços microligados laminados a quente com alta resistência e boa ductilidade. As faixas de valores recomendados para as diversas propriedades são: limite de escoamento entre 450 e 550 MPa, limite de resistência entre 550 e 650 MPa, razão elástica menor ou igual a 85% e alongamento total mínimo de 25%.

## PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Foram estudados aços microligados onde, de acordo com a literatura, pode-se obter alta resistência mecânica aliada à boa ductilidade [4-5,6]. O titânio foi incluído em função de seu efeito refinador do tamanho de grão e pela proteção que ele proporciona ao boro contra o nitrogênio. Todas as ligas possuíam teor de C máximo igual a 0,12% e Mn máximo de 1,30%. A liga 1 é microligada ao Nb e Ti sob teor máximo conjunto de 0,080%; a liga 2 possui Mo e B sob teor conjunto máximo de 0,50% e a liga 3 é similar à liga 2, mas com teor de Mn máximo de 2,0%

As ligas aqui listadas foram elaboradas em forno a vácuo, tendo sido obtidos lingotes com 40 kg de peso, os quais foram posteriormente forjados na forma de placas com espessura média de 45 mm. A partir delas foram usinados corpos de prova com dimensões 30,5 mm x 35,0 mm x 76,0 mm, com chanfros de 25° em seus extremos para facilitar a mordida pelo laminador experimental.

Os ensaios de laminação laboratorial a quente foram realizados no Departamento de Engenharia de Materiais da Faculdade de Engenharia Mecânica da UNICAMP. As amostras foram aquecidas a 1200°C durante 30 minutos visando solubilizar completamente o nióbio. A seguir elas foram submetidas aos ensaios de laminação, sendo submetidas a taxa de deformação total de 70% e temperaturas de acabamento entre 900 e 850°C.

Os esboços foram submetidos a três velocidades de resfriamento imediatamente após a laminação a quente: 1, 15 e 30°C/s, sendo a primeira decorrente de resfriamento natural ao ar e as outras duas de resfriamento através de *sprays* de água. As amostras resfriadas com *spray* de água foram resfriadas até que fosse alcançada uma das três temperaturas de “bobinamento” objetivadas neste trabalho:

450, 500 e 550°C. Nesse momento a amostra tinha seu resfriamento interrompido e era introduzida num forno previamente aquecido na correspondente temperatura de “bobinamento”. A amostra lá permanecia por uma hora, após o que era desenformada e resfriada ao ar calmo. O objetivo deste ciclo térmico foi simular o padrão de resfriamento que ocorre numa bobina a quente industrial. Já o material resfriado ao ar foi processado de duas maneiras distintas: ou resfriado dessa forma diretamente até a temperatura ambiente ou então submetido a uma temperatura de “bobinamento” de 550°C da mesma maneira descrita acima.

A partir das amostras laminadas foram extraídos corpos de prova *sub-size* cilíndricos, longitudinais e com diâmetro de 4,0 mm para a execução de ensaios de tração nos laboratórios da UNICAMP. A medição da dureza Brinell das amostras foi feita no Centro de Testes da COSIPA.

## RESULTADOS EXPERIMENTAIS E DISCUSSÃO

A Tabela 1 indica as faixas de valores de propriedades mecânicas obtidos para as três ligas estudadas. Como se pode verificar, as ligas 2 e 3 apresentaram perfil de propriedades mecânicas totalmente inadequado para os objetivos deste trabalho, com limite de escoamento médio superior a 650 MPa e alongamento total inferior a 25%; além disso, a dispersão verificada nas propriedades foi muito maior do que o observado para as demais ligas.

**Tabela 1.** Faixas de propriedades mecânicas obtidas após a laminação a quente dos aços estudados.

	LE [MPa]	LR [MPa]	RE	AT [%]	HB
<b>1</b>	370~490	500~600	76~84	25~37	154~169
<b>2</b>	537~880	695~931	74~97	7~29	210~290
<b>3</b>	525~875	715~920	68~95	11~24	219~290

A Tabela 2 mostra o efeito de cada parâmetro do processo de laminação a quente sobre as propriedades mecânicas de cada liga aqui estudada. Como se pode observar, a elevação da temperatura de acabamento de 850 a 900°C não produziu alterações consistentes nessas propriedades. Isto está de acordo com resultados da literatura.<sup>[7]</sup> Já a elevação da taxa de resfriamento de 1°C/s para 15 ou 30°C/s elevou consistentemente a resistência mecânica e a razão elástica, geralmente também acarretando ligeira perda de ductilidade. Esses efeitos não foram observados ao se elevar a taxa de resfriamento de 15 para 30°C/s, indicando um efeito de saturação.

A literatura informa que ocorre um máximo no limite de escoamento de aços ARBL para temperaturas intermediárias de bobinamento, da ordem de 600°C; o valor dessa propriedade declina para maiores ou menores valores dessa temperatura. Na verdade o efeito desse parâmetro do processo sobre as propriedades do produto dependerá da competição entre os efeitos contrários sobre a resistência mecânica decorrentes do endurecimento por precipitação dos elementos de microliga e do amaciamento pelo crescimento do tamanho de grão ferrítico.<sup>[7]</sup> Isso explica os efeitos contraditórios desse parâmetro de processo sobre as propriedades mecânicas das ligas estudadas.

**Tabela 2.** Efeito da elevação na magnitude dos parâmetros do processo de laminação a quente sobre as propriedades mecânicas de cada liga aqui estudada.

Aço	Variável de Processo	LE	LR	RE	AT	HB
1	$T_{AC}$	•	•	•	•	•
	$\dot{T}$	↑	↑	↑	↑	•
	$T_{BOB}$	•	•	•	↑	•
2	$T_{AC}$	•	•	•	•	•
	$\dot{T}$	↑	↑	↑	↓	↑
	$T_{BOB}$	↓	•	↓	•	↑
3	$T_{AC}$	•	•	•	•	•
	$\dot{T}$	↑	↑	↑	↓	↑
	$T_{BOB}$	↑	↑	↑	↓	•

A partir dos resultados aqui obtidos pode-se sugerir a adoção do aço 1 para a fabricação de aços com alta resistência mecânica e boa ductilidade.

## CONCLUSÕES

Este trabalho objetivou o desenvolvimento de material laminado a quente com o seguinte perfil de propriedades: limite de escoamento entre 450 e 550 MPa, limite de resistência entre 550 e 650 MPa, razão elástica máxima de 85% e alongamento total mínimo de 25%. O resultado dos ensaios de laminação laboratorial efetuados neste trabalho mostraram que aços ao NbTi, contendo teores máximos de 0,12% C, 1,30% Mn e 0,080% Nb+Ti permitiram atender a esse objetivo.

## REFERÊNCIAS

- 1 BROSS, S. & REICHERT, B. Hot-Rolled High-Strength Steel Grades by Salzgitter Flachstahl GmbH. **Steel Grips**, 3:2003, 184-187.
- 2 RIGAUT, G. & MARRON, G. Les Roues Allégées. **Revue de Metallurgie – CIT**, Novembre 1997, 1413-1423.
- 3 GORNI, A.A. & VIEIRA, R.R. Efeito da Temperatura de Acabamento e Velocidade de Resfriamento na Microestrutura e Propriedades de Aço Bifásico Laminado a Quente. In: 45° Congresso Anual da ABM. **Anais**. Volume 2, Rio de Janeiro, 1990, 113-132.
- 4 HASHIMOTO, S. e outros. Development of Nb Added Ferrite-Bainite Steels and their Automotive Application. **SAE Technical Paper Series 820283**, 1982, 9 p.
- 5 SUDO, M. et al. Niobium Bearing Ferrite-Bainite High Strength Hot-Rolled Sheet Steel with Improved Formability. **Transactions of the ISIJ**, 23:4, April 1983, 303-311.
- 6 TAMEHIRO, H. e outros. Optimum Chemical Composition and Thermomechanical Processing Condition for Nb-B Steel. **Transactions of the ISIJ**, 27:2, February 1987, 130-138.
- 7 RESCH, H. e outros. Slab- and Strip-Quality Control through In-Depth Metallurgical Modeling. In: VAI Continuous Casting and Hot Rolling Conference - CCR '04. **Proceedings**. VAI, Linz, 2004, Paper 5.4, 6 p.