

DESENVOLVIMENTO DE AÇOS ATENDENDO A NORMA API 5L, NO LAMINADOR DE TIRAS A QUENTE DA COMPANHIA SIDERÚRGICA DE TUBARÃO (CST)⁽¹⁾

Everaldo Antônio Caldeira⁽²⁾

Paulo de Tarso Lourenço⁽²⁾

Roberto de Oliveira Costa⁽³⁾

Julio Cezar Bellon⁽³⁾

Renato Diniz Carvalho⁽⁴⁾

Paulo Roberto Cetlin⁽⁵⁾

Resumo

Em 2002, a CST iniciou a operação de seu laminador de tiras a quente (LTQ) com capacidade nominal de 2 milhões de t/ano. Objetivando aumentar a produção de materiais de alto valor agregado, a CST vem desenvolvendo aços para aplicações em gasodutos e oleodutos segundo a norma API, do “American Petroleum Institute”, especificação 5L. Os aços para tubulações petrolíferas têm requisitos de elevada resistência mecânica, boa tenacidade em baixas temperaturas, ductilidade e soldabilidade. Para atender os requisitos, é necessária a adoção de procedimentos rígidos na fabricação de placas e na laminação de bobinas. Atualmente, devido à extensão e pressão de operação das novas tubulações, o desenvolvimento de aços Alta-Resistência e Baixa-Liga (ARBL) se apresenta como uma alternativa viável para a redução dos custos dos projetos das tubulações. Neste cenário, a adoção do processamento termomecânico controlado é indispensável para maximizar os efeitos dos microligantes com Nb, V e Ti no controle do tamanho de grão, endurecimento por precipitação e nas transformações de fase. Este artigo descreve os fundamentos metalúrgicos adotados e apresenta os resultados obtidos, pela CST, no desenvolvimento de aços para aplicação em gasodutos e oleodutos, de acordo com a norma API 5L, como tiras a quente.

Palavras-chave: Aços API; Aços microligados; Laminador de tiras a quente.

(1) – Contribuição técnica a ser apresentada no 60º Congresso Anual da ABM – Internacional, Belo Horizonte, 25 a 28 de Julho de 2005.

(2) – Especialista de Desenvolvimento de Produto – Divisão de Metalurgia - CST.

(3) – Especialista de Laminação de Tiras a Quente – Divisão Técnica da Laminação - CST.

(4) – Especialista em Assistência Técnica a Clientes – Divisão de Assistência Técnica – CST.

(5) – Dr., Professor Titular do Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais, Escola de Engenharia - UFMG, Belo Horizonte - MG.

INTRODUÇÃO

A Companhia Siderúrgica de Tubarão (CST) é uma usina integrada com capacidade de produção de 5 milhões de t/ano de placas de aço e 2 milhões de t/ano de bobinas a quente. As placas de aço, produzidas pela CST, são destinadas às aplicações que variam desde estampagem extra-profunda, embalagens, fins-elétricos, esmaltação vítrea, autopeças, estruturais de elevada resistência, construção naval e tubos para oleodutos e gasodutos.

Os principais equipamentos da aciaria da CST são:

- Dois convertedores BOF, com capacidade de 320t de aço líquido;
- Desgaseificador a vácuo RH, com lança KTB para aquecimento alumino-térmico;
- Unidade de tratamento de Ca-Si, acoplada ao desgaseificador RH;
- Unidade de refino secundário IR-UT, para ajuste de composição química, ajuste de temperatura e tratamento de Ca-Si.
- Máquina de Lingotamento Contínuo #1, com molde curvo e capacidade de 2,4 milhões de t/ano;
- Máquina de Lingotamento Contínuo #2, com molde vertical-curvo e capacidade de 3 milhões de t/ano.

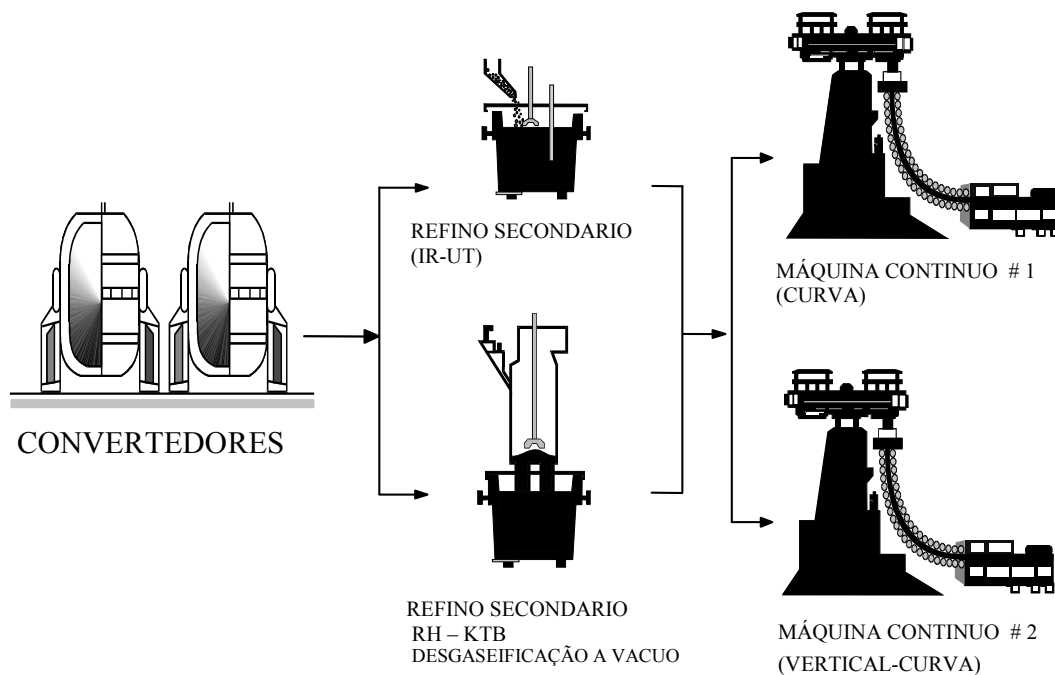


Figura 1. Fluxograma de Produção na Aciaria da CST.

Em agosto de 2002, a CST iniciou a operação do seu laminador de tiras a quente (LTQ) com capacidade nominal 2 milhões de t/ano de bobinas a quente, com dimensões variando entre 1,2 e 16mm de espessura e 700 a 1880mm de largura.

As principais características deste laminador são:

- Forno de reaquecimento de placas tipo vigas caminantes com queimadores laterais e de teto e capacidade produção de 400 toneladas/hora;
- Laminador de desbaste tipo quadro reversível e laminador de bordas com ajuste de largura hidráulico e capacidade de redução total na largura de 75 mm;

- Coilbox sem mandril, com dois estágios e proteção térmica;
- Laminador de acabamento, com seis cadeiras tipo quadro equipadas com *Work Roll Shift (WRS)* e *Work Roll Bending (WRB)* e *Continuously Variable Crown (CVC)*, nas cadeiras F1 a F3;
- Mesa de resfriamento forçado *Laminar flow* do tipo sifão, com quinze bancas de resfriamento independentes;
- Duas bobinadeiras hidráulicas com sistema de ajuste de abertura de acordo com a largura medida da tira e abraçadores com ajuste hidráulico.

A Figura 2 mostra o layout do laminador de tiras a quente da CST, com a indicação da distribuição dos pirômetros para medição de temperatura.

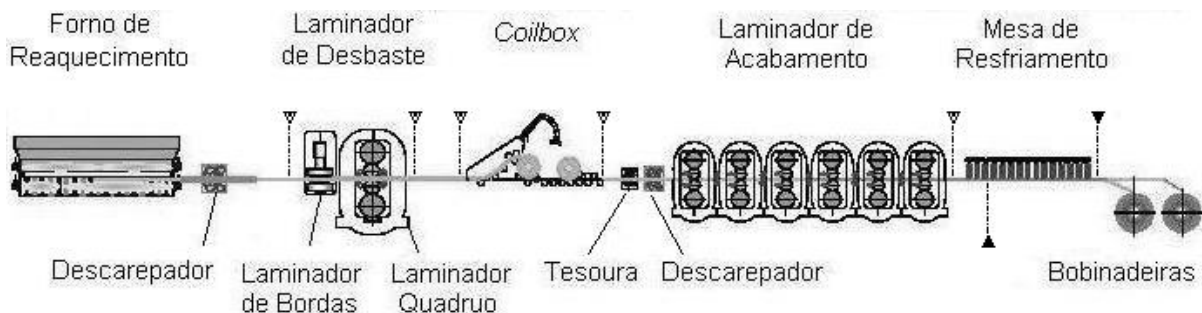


Figura 2. Layout do laminador de tiras a quente da CST.

DESENVOLVIMENTO

Propriedades Mecânicas

Os requisitos de propriedades mecânicas, composição química e ensaios mecânicos dos tubos para oleodutos e gasodutos são definidos pela norma API especificação 5L, do “American Petroleum Institute”. A Tabela 1 mostra os valores especificados pela norma API 5L, propriedades de tração e Charpy com entalhe em “V”, para as qualidades X56, X65, X70 e X80, nível PSL2.

Tabela 1. Propriedades mecânicas especificadas na norma API 5L para as qualidades X56, X65, X70 e X80 – PSL2.

	Ensaio de Tração				Ensaio Charpy a 0°C			
	Transversal				Transversal		Longitudinal	
	Limite de Escoamento 0,5%		Limite de Resistência		Energia	Área Dúctil	Energia	Área Dúctil
Grau	Mín.	Máx.	Mín.	Máx.	Mín.	Mín.	Mín.	Mín.
X56	386MPa	544MPa	490MPa	758MPa	27J/cm ²	-	41 J/cm ²	-
X65	448MPa	600MPa	531MPa	758MPa	27 J/cm ²	-	41 J/cm ²	-
X70	483MPa	621MPa	565MPa	758MPa	27 J/cm ²	-	41 J/cm ²	-
X80	552MPa	690MPa	621MPa	827MPa	68 J/cm ²	70%	101J/cm ²	70%

Composição Química dos Aços para tubos API

Os tubos API são fabricados com aços de baixos teores de carbono, teores de manganês até 1,70% e adições de nióbio, vanádio e titânio, que somadas não ultrapassam a 0,15% em peso. Dependendo da microestrutura objetivada e da prática de laminação adotada, outros elementos, como molibdênio e boro podem ser adicionados. Estes aços são classificados como Aços de Alta-Resistência e Baixa-Liga (ARBL).

Carbono - É o elemento que apresenta a melhor relação custo/benefício para o incremento da resistência mecânica, mas tem efeito negativo na soldabilidade e tenacidade dos aços. Nos aços API de graus elevados, como X65 e X70, o teor de carbono está entre 0,04 e 0,10%.

Manganês - É utilizado em substituição ao carbono para aumento da tenacidade sem prejuízo à resistência mecânica dos aços. Pela redução da temperatura de transformação $\gamma \rightarrow \alpha$, o manganês atua como refinador do grão de α e, conseqüentemente, melhora a resistência mecânica e tenacidade dos aços. Os teores de manganês nos aços API estão, normalmente, entre 1,00% e 1,70%.

Nitrogênio - Forma precipitados TiN, AlN e Nb(CN) na faixa de temperaturas de recristalização de γ e, assim, controla o crescimento do grão austenítico. Na faixa de temperatura de transformação $\gamma \rightarrow \alpha$, o nitrogênio pode formar precipitados de VN, com efeito no endurecimento por precipitação. O nitrogênio em solução contribui para o aumento na resistência mecânica, entretanto é prejudicial à tenacidade do aço. Nos aços API, o teor de nitrogênio é, normalmente, abaixo 70ppm.

Titânio - Combina com o nitrogênio e forma precipitados de TiN, estáveis em altas temperaturas e inibidores do crescimento do grão austenítico. Através do controle do crescimento do grão e da redução da quantidade de nitrogênio em solução sólida, teores de titânio entre 0,010 e 0,020% melhoram a tenacidade dos aços. Entretanto, concentrações de titânio acima da relação estequiométrica com o nitrogênio ($\%Ti/\%N = 3,42$) têm um efeito deletério na tenacidade do aço⁽³⁾.

Vanádio - Precipita como VN e VC durante e após a transformação $\gamma \rightarrow \alpha$. Devido às baixas temperaturas de formação, estes precipitados são bastante finos e tem efeito pronunciado no endurecimento. Nos aços ARBL com adição de titânio, a formação de VN é inibida e o efeito do vanádio no endurecimento por precipitação é causado pelo VC.

Nióbio - Pode variar de 0,020 a 0,060% nos aços API e, em função do processamento termomecânico e composição química, contribui de várias formas para a resistência mecânica:

- Controle do tamanho do grão de γ , na região de recristalização de γ , pela precipitação de Nb(CN) nos contornos de grão;
- Aumento da temperatura de não recristalização de γ , pelo “arraste de soluto” e formação de precipitados de Nb(CN) induzidos pela deformação no campo austenítico;
- Abaixamento da temperatura de transformação $\gamma \rightarrow \alpha$, pelo “arraste de soluto” e formação de precipitados de NbC na interface γ/α ;
- Endurecimento por precipitação, pela precipitação de NbC finos e dispersos na matriz, após a transformação $\gamma \rightarrow \alpha$.

Fósforo - Durante a solidificação, o fósforo tem forte tendência a segregar e assim contribui para o aumento da segregação central e para o aparecimento de estruturas bandeadas nos aços com microestrutura ferrita-perlita. Como mostrado na figura 03, o teor de fósforo dos aços API produzidos na CST deve ser mantido abaixo de 0,020%.

Enxofre - O enxofre é extremamente prejudicial à tenacidade dos aços, pela formação de inclusões alongadas de MnS que reduzem a energia absorvida no ensaio de impacto e, portanto, deve ser mantido abaixo de 0,0050%, como mostrado na figura 04.

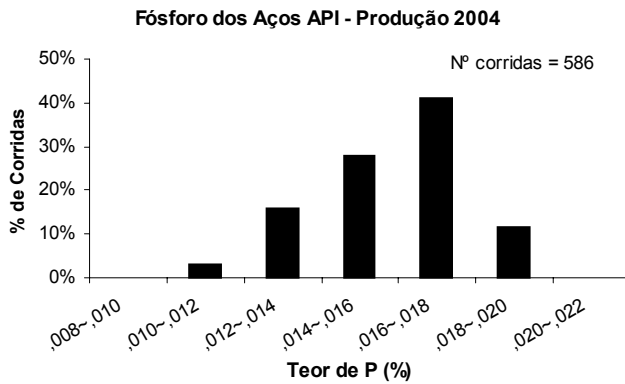


Figura 3. Fósforo dos aços API em 2004.

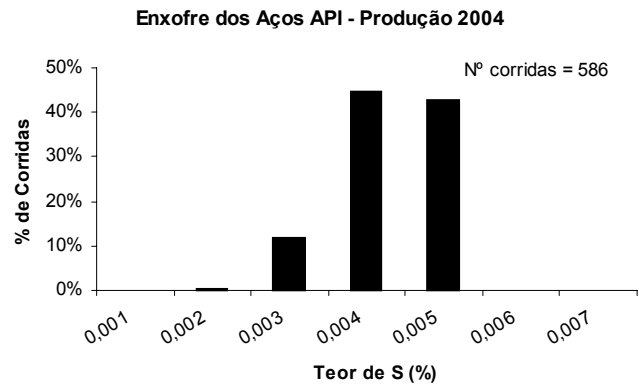


Figura 4. Enxofre dos aços API em 2004.

Efeito dos Mecanismos de Endurecimento

Os valores de resistência mecânica e tenacidade dos aços ARBL são resultantes das contribuições dos vários mecanismos de endurecimento. Como mostrado, esquematicamente, na Tabela 2, o refino grão é o único mecanismo de endurecimento com efeito positivo na resistência mecânica e tenacidade dos aços ARBL.

Tabela 2. Efeito dos mecanismos de endurecimentos na resistência mecânica e tenacidade dos aços.

Mecanismos de Endurecimento	Resistência Mecânica	Tenacidade
Solução sólida substitucional/intersticial	↑↑	↓
Presença de segunda fase	↑	↓
Aumento da densidade de discordâncias	↑	↓
Precipitação	↑	↓
Refino de Grão	↑↑	↑↑

Soldabilidade

A soldabilidade é bastante dependente da composição química do aço e pode ser descrita quantitativamente em termos do carbono equivalente (Ceq), conforme as equações 1 e 2. Quanto maior o carbono equivalente, menor a soldabilidade do aço.

$$Ceq = C + \frac{Mn}{6} + \frac{(Cr + Mo + V)}{5} + \frac{(Cu + Ni)}{15} \quad (1)$$

$$Ceq(pcm) = C + \frac{Si}{30} + \frac{(Mn + Cu + Cr)}{20} + \frac{Ni}{60} + \frac{Mo}{15} + \frac{V}{10} + 5 \times B \quad (2)$$

A norma API recomenda que o C_{eq} seja calculado pela equação 1, para teores de carbono acima de 0,12%, e pela equação 2, para teores de carbono até 0,12%.

Processamento Termomecânico Controlado (TMCP)

Os principais parâmetros do processamento termomecânico controlado adotado na CST para os aços API, esquematizado na Figura 5, estão listados abaixo:

- Temperatura de extração do forno de reaquecimento entre 1170 e 1220°C. Na etapa de reaquecimento, é objetivado que os precipitados de nióbio e vanádio se dissolvam e os precipitados de TiN controlem o crescimento dos grãos de γ .
- Laminação de desbaste na região de recristalização de γ , com temperatura acima de 1100°C e redução total entre 80 e 90%. Nesta fase, o refino de grão é feito pelos sucessivos passes de laminação seguidos da recristalização de γ e o controle do crescimento dos grãos recristalizados é feito pelos precipitados de TiN e Nb(CN).
- Bobinamento no *Coilbox*, que resulta em uma maior homogeneidade de temperatura ao longo do esboço.
- Laminação de acabamento na região de não-recristalização da γ , abaixo da temperatura de não-recristalização de γ (T_{nr})¹, e com valores de deformação total de até 87%.
- Estratégia de resfriamento acelerado, que pode variar em função da espessura da tira, da composição química e propriedades objetivadas.
- Temperatura de bobinamento entre 650 a 550°C, para os aços API.

A figura 5 apresenta a estratégia de TMCP adotada na CST, na produção dos aços API.

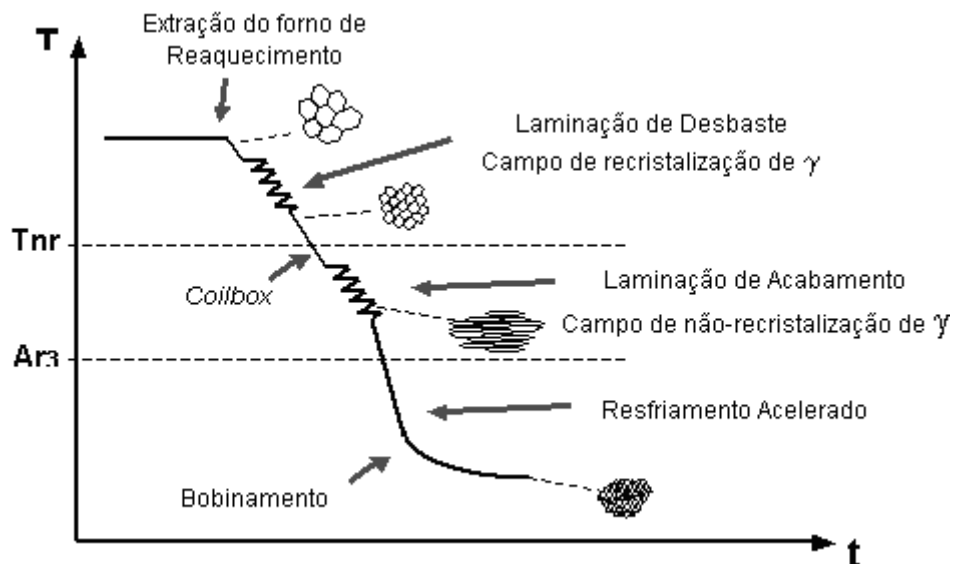


Figura 5. Processamento termomecânico controlado adotado na CST para a produção de aços API.

¹ Temperatura de não-recristalização de γ (Borato *et al* 1988):

$$T_{nr} (\text{°C}) = 877 + 464C + (6645Nb - 664\sqrt{Nb}) + (732V - 230\sqrt{V}) + 890Ti + 363Al - 357Si$$

RESULTADOS

A CST já produziu os graus API 5L X56 – PSL1 e API 5L X65 – PLS2, em bobinas a quente para a produção de tubos de grande diâmetro com soldagem ERW, de aços baixo carbono microligados com Nb e Ti. Os resultados dos testes mecânicos das bobinas atenderam todos requisitos estabelecidos pela norma API 5L e pelos clientes.

As Figuras 6, 7 e 8, e as Tabelas 3, 4 e 5 a seguir, apresentam os resultados de tração transversal do grau API 5L X56 – PSL1 e os resultados de tração transversal e charpy transversal a -20°C do grau API 5L X65 – PSL2.

Tabela 3. Ensaio de tração do grau API 5L X56 – PLS1, espessura de 9,35 a 12,5mm.

	Especificação API 5L		Especificação cliente		Resultados na bobina	
	Mín.	Máx.	Mín.	Máx.	Méd.	Desvio Padrão
LE _{0,5%}	386MPa	544MPa	415MPa	520MPa	464MPa	13MPa
LR	490MPa	758MPa	500MPa	610MPa	555Mpa	13MPa
LE/LR	-	0,90	-	0,90	0,84	0,017
Ap%	26%	-	25%	55%	38%	1,9%

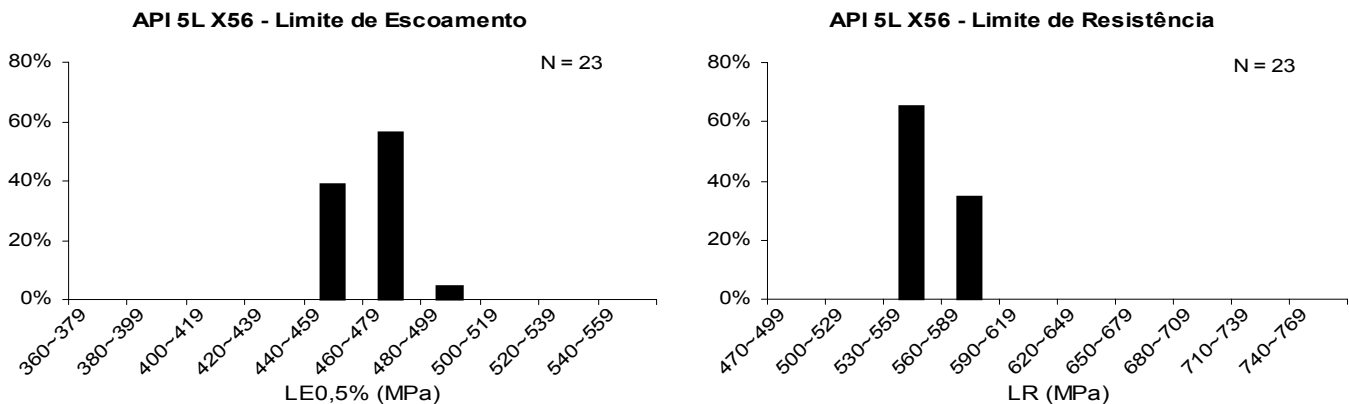


Figura 6. Distribuição do LE_{0,5%} e LR do grau API 5L X56 – Espessura de 9,35 a 12,5mm.

Tabela 4. Ensaio de tração do grau API 5L X65 – PLS2, espessura de 6,28 a 9,50mm.

	Especificação API 5L		Especificação cliente		Resultados na bobina	
	Mín.	Máx.	Mín.	Máx.	Média	Desvio Padrão
LE _{0,5%}	448MPa	600MPa	475MPa	580MPa	521MPa	13MPa
LR	531MPa	758MPa	546MPa	664MPa	605Mpa	11MPa
LE/LR		0,90	-	0,90	0,86	0,015
Ap%	27%		27%	55%	33%	2%

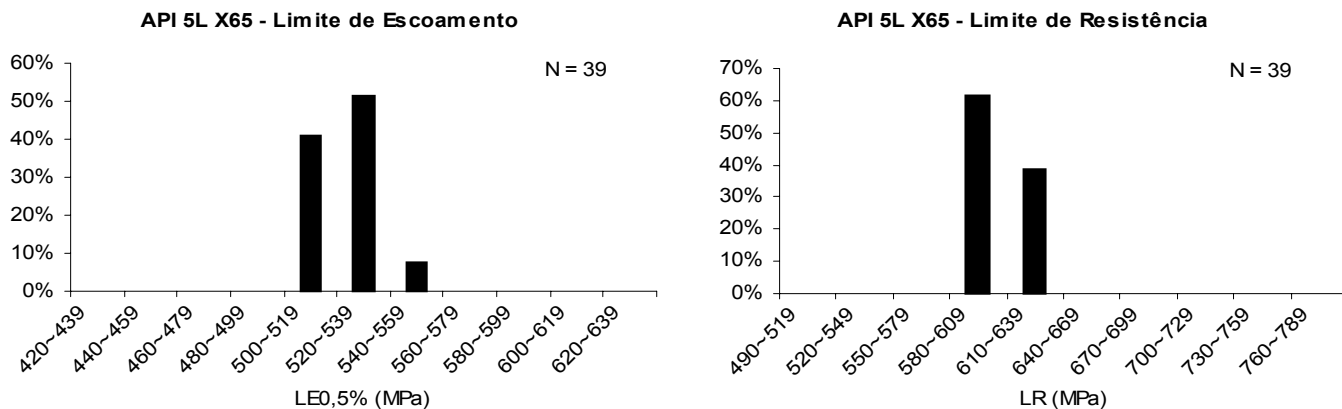


Figura 7. Distribuição do LE_{0,5%} e LR do grau API 5L X65 – Espessura de 6,28 a 9,50mm.

Tabela 5. Charpy transversal a -20°C do grau API 5L X65 – PLS2, espessura de 6,28 a 9,50mm.

	Especificação API 5L (0°C)	Especificação cliente (-20°C)	Resultados na bobina (-20°C)	
	Mín.	Mín.	Média.	Desvio Padrão
Energia Absorvida	27 J/cm ²	27 J/cm ²	196J/cm ²	15J/cm ²
Área Dúctil	-	70%	100%	0,5%

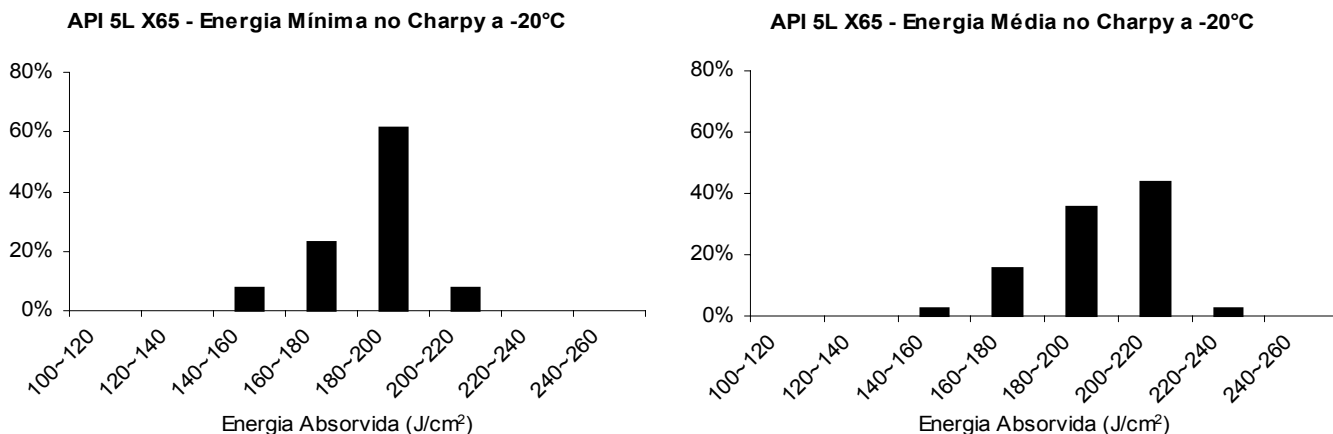


Figura 8. Distribuição da energia absorvida no ensaio charpy a -20°C do grau API 5L X65 – Espessura entre 6,28 e 9,50mm.

CONCLUSÕES

A CST vem desenvolvendo de bobinas a quente para aplicação em gasodutos e oleodutos no seu LTQ, com resultados de propriedades mecânicas que atendem todos os requisitos da aplicação.

Os lotes experimentais dos graus API 5L X56 – PSL1 e API 5L X65 – PSL2 atenderam a todos os requisitos definidos pela norma API e pelos clientes da CST.

Dando continuidade ao desenvolvimento de aços de alto valor agregado no LQT da CST, já foi definida a produção de um lote experimental do grau API 5L X70 – PSL2, microligado com Nb-V-Ti.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS:

- 1 American Petroleum Institute, Washington, DC. API specification 5L; Specification for Line Pipe, 4.ed., Março 2004. 155p.
- 2 BELLON, J. C. Aplicação de Tratamento Termomecânico a um Aço Bainítico Microligado com Nióbio, Titânio e Boro. Campinas: UNICAMP, 1995. 117p. (Dissertação, Mestrado em Engenharia Mecânica).
- 3 HEISTERKAMP, F., HULKA, K., GRAY, J. M. Metallurgical Concept And Full-Scale Testing of High Toughness, H₂S Resistant 0.03%C - 0.10%Nb Steel. Niobium Technical Report, CBMM, São Paulo, February 1993.
- 4 TAMEHIRO, H., YAMADA, N., MATSUDA, H. Effect of the Thermo-Mechanical Control Process on the Properties of High-Strength Low Alloy Steel. Transactions ISIJ, v. 25, p. 54-61, 1985.
- 5 DAVIS, J. R. High-Strength Low-Alloy Steels. In: DAVIS, J. R. Alloying: Understanding the Basics. Materials Park: ASM International, 2001. p.193-209.
- 6 PANIGRAHI, B. K. Processing of Low Carbon Steel Plate and Hot Strip – an Overview. Bull. Mater. Sci., v. 24, n. 4, p. 361-371, August 2001.
- 7 Gräf, M. et. al. Production of Large Diameter Pipes Grade X 70 with High Toughness Using Acicular Ferrite Microstructures. Niobium Technical Report, www.cbmm.com.br.
- 8 Llewellyn, D. T. Nitrogen in Steels, Ironmaking and Steelmaking, v. 20, n. 1, p. 35-41, 1993.

DEVELOPMENT OF GRADES IN ACCORDANCE WITH API 5L SPECIFICATION, IN THE HOT STRIP MILL OF COMPANHIA SIDERÚRGICA DE TUBARÃO (CST)(1)

*Everaldo Antônio Caldeira⁽²⁾
Paulo de Tarso Lourenço⁽²⁾
Roberto de Oliveira Costa⁽³⁾
Julio Cezar Bellon⁽³⁾
Renato Diniz Carvalho⁽⁴⁾
Paulo Roberto Cetlin⁽⁵⁾*

Abstract

In the year 2002, CST started up its Hot Strip Mill with an annual capacity of 2 millions metric tons per year. Aiming to increase the production of high value added materials, CST has developed steels for linepipe applications according to the American Petroleum Institute – API specification 5L. The main requirements for petroleum tubes application are the mechanical strength, toughness, ductility and weldability. In order to fulfill these requirements, it is necessary to adopt strict procedures in slab production and hot strip rolling phases. Nowadays, due to the new pipelines extension and the operation pressure, the development of High-Strength Low-Alloy Steel (HSLA) is a good choice for cost saving. In this context, the use of Thermo-mechanical Controlled-Process (TMCP) is necessary to maximize the effects of Nb, V and Ti in the grain size, precipitation strengthening and phase transformation. This paper describes the metallurgical fundamentals and the results obtained at CST's Hot Strip Mill in the development of steel for linepipe application in accordance with API 5L standard.

Key-words: API Steel; Microalloyed steel; Hot strip mill.

(1) – Technical contribution for 60th Annual ABM Congress; Belo Horizonte, 25 - 28 de July, 2005.

(2) – Product Development Engineer – Metallurgy Department – CST.

(3) – Hot Strip Mill Technical Division Engineer – Hot Strip Mill Department - CST.

(4) – Technical Assistance Engineer – Commercial Department – CST.

(5) – Dr., Titular Professor of Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais, Escola de Engenharia - UFMG.