

# CRIAÇÃO ORIENTADA AO CLIENTE DE UM AÇO LAMINADO A QUENTE PARA TUBOS API 5L X70 PSL2 BASEADO EM INTELIGÊNCIA COMPUTACIONAL: PRODUÇÃO E DESEMPENHO<sup>1</sup>

Willy Ank de Moraes<sup>2</sup>  
Herbert Christian Borges<sup>3</sup>

## Resumo

Aços com elevados valores de resistência mecânica e de tenacidade permitem trabalhar-se com dutos de maior diâmetro, menores espessuras e maiores pressões de linha, aumentando a eficácia e economicidade no transporte. Por outro lado, as naturais restrições nas composições químicas e condições de laminação tornam complexo o projeto de um aço do nível de resistência X70 que atenda aos requisitos finais desejados. Porém, graças à introdução de modelos de projeto de produto baseados em inteligência computacional (RNAs), tornou-se possível não só projetar um aço eficiente como também prever e informar o seu desempenho no cliente final antes mesmo de um pedido ter sido emitido. Neste trabalho serão apresentadas as etapas de produção, os resultados obtidos e o desempenho de um material integralmente projetado via inteligência computacional.

**Palavras-chave:** Aço plano; API; Redes neurais; Desenvolvimento de produto.

## CUSTOMER ORIENTED CREATION OF A HOT ROLLED STEEL FOR TUBES API 5L X70 PSL2 BASED ON COMPUTATION INTELLIGENCE: PRODUCTION AND PERFORMANCE

### Abstract

High strength and toughness steels have allowed bigger diameter, low thickness and high pressure pipelines increasing transport efficiency and economic performance. On the other hand, limitations on chemical composition and hot mill capacity make a X70 steel project, which compiles all desired final requirements, very complex. However, due the introduction of product models based on computational intelligence (Adaptative Neural Networks - ANNs), it became possible not only project a proof steel as preview and inform its performance to the final customer before it ordered. This work presents the production steps, obtained results and performance of an intelligent project material by computational intelligence.

**Key-words:** Flat steel; API; Neural network; Product development.

<sup>1</sup> Contribuição técnica ao 66º Congresso Anual da ABM, 18 a 22 de julho de 2011, São Paulo, SP, Brasil.

<sup>2</sup> Doutorando, MSc., Eng<sup>o</sup> Metalurgista, Téc. em Metalurgia. Engenheiro de Produto Sênior da Usiminas-Cubatão, Prof. Faculdade de Engenharia da UNISANTA e Diretor da divisão técnica "Aplicações de Materiais" da ABM. E-mail: willyank@unisanta.br ou willy.morais@usiminas.com.

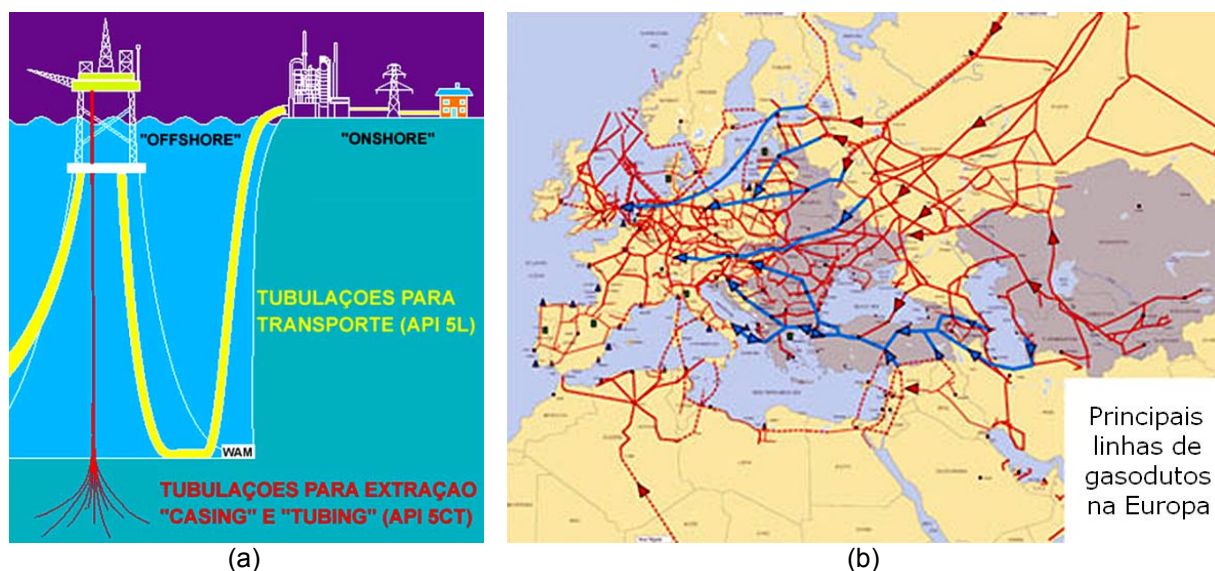
<sup>3</sup> Mestrando, Eng<sup>o</sup> Metalurgista, Engenheiro do Produto Pleno. E-mail: herbert.borges@usiminas.com

## 1 INTRODUÇÃO

Ao longo do século XX a sociedade humana passou a depender intensamente do petróleo, uma das matérias-primas e fontes de energia mais exploradas e cobiçadas em todo o mundo. A obtenção, processamento, distribuição e uso do petróleo e gás natural e de seus subprodutos (petroquímicos), é requerida grande quantidade de tubos. Os tubos para as aplicações são especificados por rígidas normas (API, ISO, etc.), cuja característica marcante é o foco sobre a especificação do produto final (tubos), em que se objetiva aumentar a segurança de uso.<sup>(1,2)</sup>

Na extração do petróleo e do gás natural e na movimentação dos fluídos durante a extração, são utilizados tubos para a perfuração e revestimento de poços, os últimos conhecidos como tubos OCTG (*Oil Country Tubular Goods*).<sup>(1)</sup> Tubos também são utilizados no transporte dos poços até a superfície (no caso de plataformas marinhas) e dos locais de perfuração até as plantas de separação das impurezas e/ou refino,<sup>(2)</sup> conforme ilustrado na Figura 1.a. Os tubos OCTG são unidos entre si por meio de rosqueamento, já os tubos utilizados no transporte são unidos por meio de solda, feita no local de montagem do duto. Gigantescas linhas de tubos (dutos) podem ser utilizadas para o transporte do óleo ou gás até os principais centros consumidores, por ser o meio mais econômico e conveniente para o transporte dos produtos petroquímicos.<sup>(3-6)</sup>

No caso em particular do gás natural, grandes pressões de trabalho devem ser empregadas nos dutos para aumentar a eficácia do transporte, já que o gás ocupa um volume bem maior do que o óleo.<sup>(3,7)</sup> O transporte até os consumidores é normalmente feito por meio de uma rede de dutos, como na rede de gasodutos que servem a Europa<sup>(8)</sup> e ilustrada na Figura 1.b. Salienta-se que a rede existente na América do Sul ainda é pequena, porém encontra-se em expansão.<sup>(7,9)</sup>



**Figura 1.** Dutos API: (a) tipos de tubos API utilizado no transporte de gás e petróleo/óleo dos poços de produção (*off-shore*) até os consumidores finais;<sup>(6,7)</sup> (b) Rede principal de gasodutos que servem o continente Europeu provenientes da Ásia (ex-URSS e Oriente médio), África e mar do Norte.<sup>(8)</sup>

A produção destes tipos de tubos não é uma tarefa trivial e normalmente envolve do fornecedor de aço até o usuário final. Para exemplificar esta situação, a seguir estão listadas as principais características desejáveis nestes tubos:<sup>(1,6,7)</sup>

- obtenção de estreitas faixas de propriedades mecânicas nos tubos (deve-se considerar que o processo de fabricação de tubos soldados altera as propriedades mecânicas do tubo em relação à matéria-prima utilizada);
- controle de qualidade da matéria-prima, que deve possuir um baixo nível de inclusões e impurezas. Especialmente enxofre (S), fósforo (P) e até mesmo nitrogênio (N) e oxigênio (O);
- tubos com costura devem ter juntas soldadas homogêneas (geometricamente e mecanicamente) em relação ao metal base; e
- características dimensionais e geométricas muito bem controladas para oferecer homogeneidade aos tubos.

A Tabela 1 ilustra os graus disponíveis para tubos utilizados na condução de óleo e gás, segundo definidos pela última versão da norma API 5L nível PSL 2.<sup>(2)</sup> Atualmente, os graus que têm sido mais utilizados em linhas de condução são:

- o API 5L X70, já consolidado em todos os tipos de tubos e;
- o API 5L X80, que está em consolidação para tubos de grandes diâmetros.<sup>(9)</sup>

**Tabela 1.** Resumo dos requisitos químicos e mecânicos da API 5L PSL2<sup>(2)</sup>

GRAUS	B	X42	X46	X52	X56	X60	X65	X70	X80
<b>COMPOSIÇÃO QUÍMICA - PANELA E PRODUTO (%)</b>									
C máx.	0,22								
Mn máx.	1,20	1,30	1,40			1,45	1,65	1,85	
P máx.	0,025								
S máx.	0,015								
(Nb + V + Ti) máx.	0,15								
Ceq máx. (segundo IIW <sup>(10)</sup> )	0,43								
Pcm máx. (vide Ito e Bessyo <sup>(11)</sup> )	0,25								
<b>PROPRIEDADES MECÂNICAS (Tração na direção transversal para diâmetros acima de 8,5")</b>									
Limite de Escoamento (L.E.) MPa	241-448	290-496	317-524	359-531	386-544	414-565	448-600	483-621	552-690
Limite de Resistência (L.R.) MPa	414-758		434-758	455-758	490-758	517-758	531-758	565-758	621-827
(L.E. / L.R.) máx.	0,93								
Alongamento Mínimo (%) Lo=50,80mm	6,40 ≤ e ≤ 6,99 mm	26	25	24	22	21	21	20	18
	7,50 ≤ e ≤ 7,69 mm	27	26	24	23	22	21	20	19
	9,30 ≤ e ≤ 9,79 mm	28	27	26	24	23	22	21	19
	12,50 ≤ e ≤ 12,69 mm	29	28	27	25	24	24	22	20
Resistência ao Impacto J min.	TEMPERATURA °C								
	ZERO								
	Transversal Entalhe (V)								outros
	27								

Os aços e tubos empregados nos grandes dutos passam por um sofisticado controle de qualidade que se estende até o momento de liberação do duto já finalizado em campo com o teste de linha. Como o desempenho na soldagem é um fator primordial, torna-se necessária a utilização de materiais com baixos teores de carbono equivalente ( $C_{eq}$ ) e com grande homogeneidade química e dimensional.

A redução do carbono equivalente é contraditória com a necessidade de aumento da resistência mecânica, pois o projeto padrão dos aços de alta resistência é feito pela utilização de elementos de liga que tendem a aumentar os valores do carbono equivalente.<sup>(5-7)</sup> Assim sendo, novos métodos de obtenção de resistência mecânica devem ser empregados: adição de elementos formadores de precipitados (Cr, Mo),

microligantes (V, Ti, Nb), e especialmente, processamento termomecânico (laminação controlada + resfriamento acelerado). Estas práticas visam obter um aço com estrutura de grãos ferríticos finos (eventualmente aciculares), com grande presença de precipitados finamente dispersos, de forma a oferecer uma maior resistência mecânica e tenacidade, essenciais à aplicação.

A soldabilidade dos tubos de condução é importante não apenas para a fabricação de tubo com costura, mas principalmente para a instalação destes tubos no campo, especialmente quando instalados em ambientes com baixas temperaturas. Tradicionalmente, a fórmula do Instituto Internacional de Soldagem<sup>(10)</sup> (IIW – *International Institute of Welding*) tem sido utilizada para caracterizar a soldabilidade. Porém em tubos API mais modernos, com teores de carbono muito baixos têm-se adotado os valores de  $P_{CM}$  – *Parameter of Crack Measurement*<sup>(11)</sup> como forma de caracterizar a sua soldabilidade.

Nestes últimos dez anos, foi realizado na Usiminas-Cubatão um forte trabalho de retorno ao fornecimento de aços para tubos API.<sup>(7,12)</sup> Este esforço baseou-se, principalmente, no fornecimento de aços para tubos de grande diâmetro, dentro de um programa de sinergia com a Usiminas-Ipatinga.<sup>(7)</sup> Também foi de primordial importância o restabelecimento do fornecimento para produção de tubos OCTG de pequenos diâmetros.<sup>(12)</sup> A Tabela 2 ilustra a evolução da produção de aços para tubos API, fornecidos como laminados a quente em bobinas, nesta última década.

**Tabela 2.** Fornecimento de aços para tubos API em bobinas laminadas a quente pela Usina de Cubatão nos últimos anos (valores em mil toneladas)

Tipo de tubo	ANO									
	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	Total
<b>OCTG</b>	0,0	8,3	11,8	19,3	42,0	14,4	12,3	6,4	3,17	<b>118</b>
<b>5L (MR*)</b>	3,5	12,7	7,12	28,3	18,2	9,7	16,5	14,5	1,51	<b>112</b>
<b>5L (AR**)</b>	0,0	10,9	3,32	1,30	0,18	0,0	1,06	0,46	0,0	<b>17</b>

\* - Tubos com Limite de Escoamento até 380MPa ( $LE \leq 380MPa$ , graus: 5L B, X42 a X52); \*\* - Tubos com Limite de Escoamento acima de 380MPa ( $LE > 380MPa$ , graus: 5L X56 a X70).

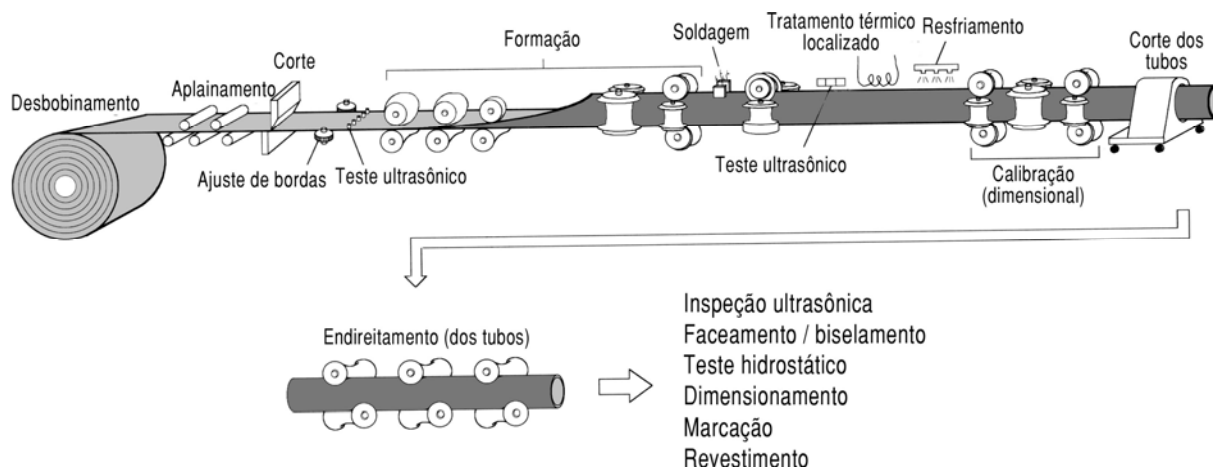
Pela Tabela 2, pode-se notar que a produção de aço para tubos API com maiores níveis de resistência mecânica, normalmente utilizados em gasodutos, foi bem menor (17 mil t) do que os produzidos para as outras duas categorias: 118 mil t para tubos OCTG e 112 mil t para tubos de condução com menores níveis de resistência (5L MR ou  $LE \leq 380MPa$ ). Justamente devido a esta diferença, ao desenvolvimento de modelos de previsão de propriedades mecânicas e enfocando o potencial existente pela descoberta das reservas do pré-sal, realizou-se um trabalho de consolidação da produção de graus de resistência mais elevados, pelo fornecimento de um aço para tubos API 5L X70 PSL2, totalmente baseado em inteligência computacional, conforme descrito neste artigo.

## 2 MATERIAIS E MÉTODOS

O desenvolvimento de um aço laminado a quente para a produção de tubos API não é tarefa trivial. Os itens a seguir ilustram as particularidades no processo de produção do aço e dos tubos e como estas características foram consideradas no projeto de liga utilizado.

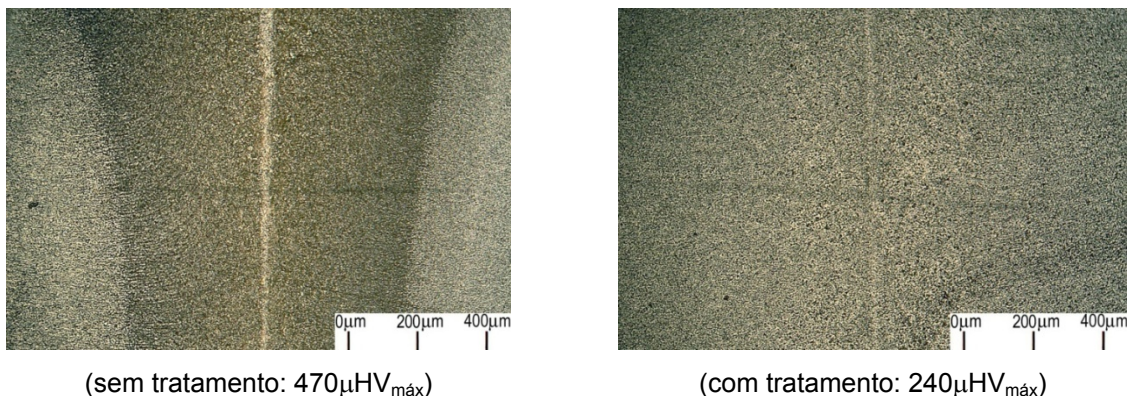
## 2.1 Processo de Produção de Tubos

A maioria das empresas produtoras de tubos do país emprega um dos dois processos de produção por soldagem sem adição de metal: ERW ou HFIW.<sup>(13)</sup> A diferença entre os dois é que a soldagem pode ser feita pela passagem de uma corrente elétrica que é transferida por contato elétrico (ERW) ou por indução através de uma bobina (HFIW). A Figura 2 ilustra como o processo é executado: basicamente após a conformação contínua por meio de rolos alinhados, a chapa metálica (na forma de uma bobina ou rolo) é soldada por resistência elétrica ou indução, inspecionada, calibrada e cortada na dimensão final.



**Figura 2.** Visão esquemática do processo de produção de tubos de médio e pequeno diâmetro ERW / HFIW para produção de tubos API.<sup>(14)</sup>

Em tubos soldados deve-se empregar um procedimento de soldagem conveniente para obter uma homogeneidade estrutural e mecânica. A possibilidade de um tratamento térmico localizado na linha de solda (feito por indução, conforme ilustrado na Figura 2) é uma variância do processo<sup>(13)</sup> praticamente obrigatória para produzir tubos API soldados continuamente e de forma econômica, pois somente a região da solda é efetivamente tratada e não todo o tubo. Este tratamento térmico é realizado em temperaturas suficientemente elevadas de tal modo a promover uma reversão da microestrutura de solda, homogeneizando-se suas propriedades em relação ao restante do tubo, conforme ilustrado na Figura 3. Obviamente a estrutura e a composição química do aço devem ser compatíveis com este tratamento térmico. Outro aspecto que deve ser considerado é a alteração das propriedades mecânicas induzidas pela formação contínua. Em tubos de pequenos diâmetros (menores que 114,30 mm ou 4,5") ocorre um grande encruamento, que pode elevar o limite de escoamento em mais de 100 MPa.<sup>(13)</sup> Em tubos de grandes diâmetros (maiores que 177,80 mm ou 8"), um encruamento também ocorre, porém em menor grau. Os corpos de prova (CPs) devem ser retirados na direção transversal do tubo. A planificação destes CPs causa um encruamento reverso que pode diminuir o limite de escoamento a níveis até mesmo inferiores aos observados na chapa original, em torno de 6% de redução média.<sup>(7)</sup> Para o atendimento das faixas de propriedades esperadas para tubos API (Tabela 1) e para manter a homogeneidade entre os diferentes tubos, esta variação nas propriedades mecânicas também deve ser considerada no projeto do aço empregado na produção dos tubos obtidos por formação a frio. No caso em questão, o tubo final teria um diâmetro de 16 polegadas e uma espessura de 9,52 mm (0,375").



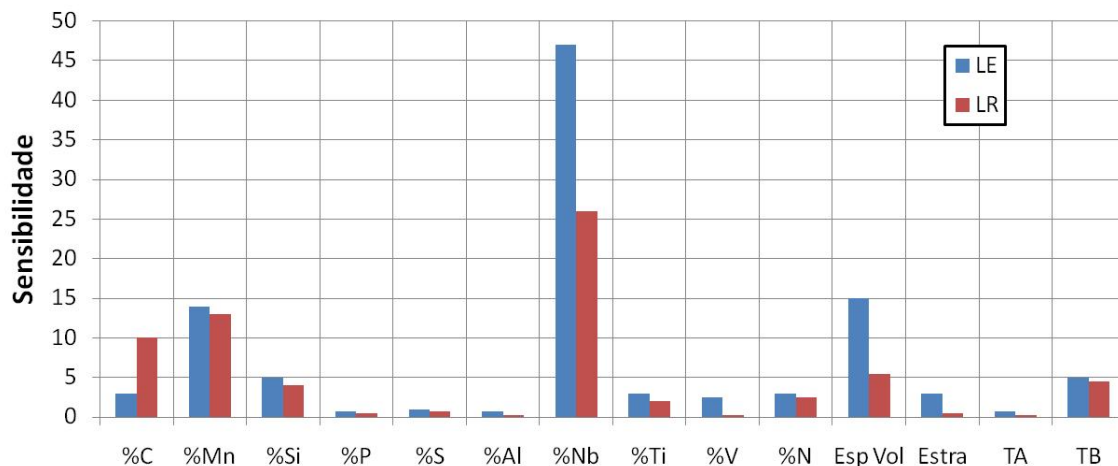
**Figura 3.** Aspecto microestrutural ao longo da região de solda de um tubo API. Estão indicados os valores máximos de microdureza mensurados nestas regiões.<sup>(12)</sup>

Além de um carbono equivalente adequado ao processo de soldagem ERW/HFIW, os aços também devem ter um teor de silício compatível com o teor de manganês. Não são desejáveis aços com faixas muito baixas da relação Mn/Si, por exemplo,  $Mn/Si < 1$ , e nem muito altas, como  $Mn/Si > 20$ .<sup>(15)</sup> Neste caso é gerada uma carepa de solda formada de uma mistura de óxidos de manganês e silício durante o processo de soldagem ERW/HFIW. Estes óxidos apresentam uma maior dificuldade de eliminação do interior da junta soldada pelo processo de recalque da solda e podem, conforme o tipo de regulagem empregada, gerar uma descontinuidade conhecida como *penetrator*.<sup>(15)</sup>

## 2.2 Uso de Redes Neurais Adaptativas (RNAs)

Com a adoção de modelos de previsão de propriedades mecânicas,<sup>(16,17)</sup> o projeto de aços com restrições nos teores de elementos químicos e nas relações entre estes elementos (por exemplo: %Ceq, %Pcm,  $\Sigma(Nb, V, Ti)$  etc.) ficou mais simples. O gráfico da Figura 4 ilustra um resultado expressivo obtido em um destes estudos<sup>(18)</sup> e ilustra uma forma de definir o tipo de liga empregado no desenvolvimento do aço para tubos API 5L X70 PLS2.

O gráfico traduz, por um coeficiente adimensional de sensibilidade, o impacto de várias variáveis de composição química (%C, %Mn, %Si, etc.), da espessura final (Esp. Vol.) e de alguns parâmetros de laminação, tais como a estratégia de resfriamento na saída do laminador (Estra) e as temperaturas de acabamento e bobinamento (TA e TB, respectivamente). Este gráfico é fornecido diretamente da rede neural criada para o projeto do aço conforme publicado por Borges,<sup>(17,18)</sup> para a faixa de valores de composição estudados.<sup>(18)</sup> Esta quantificação permite definir a quantidade das variáveis modeladas para obter as propriedades mecânicas visadas, no caso: Limite de Escoamento (LE) e Limite de Resistência (LR).



**Figura 4.** Grau de influência (ou sensibilidade) das principais variáveis de aços planos laminados a quente microligados conforme modelamento via RNAs.<sup>(17,18)</sup>

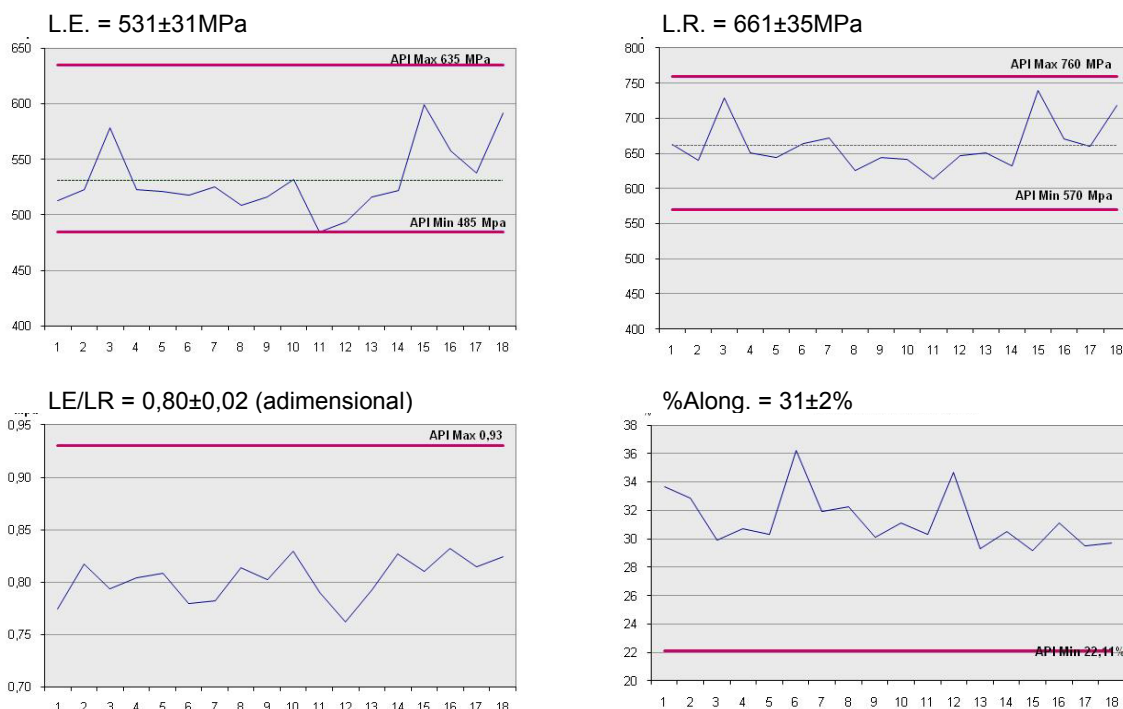
O projeto de liga e a especificação dos parâmetros de produção do aço foram estabelecidos com o auxílio dos modelamentos feitos através de RNAs.<sup>(17,18)</sup> Além disso, a previsão das propriedades finais das bobinas de aço pode ser apresentada ao produtor dos tubos API, durante uma reunião na fase de negociação do fornecimento do aço, que ocorreu alguns meses antes da produção e entrega das bobinas. O projeto definido visou obter um aço destinado à produção de tubos API 5L X70 PSL2 de forma a:

- atender às especificações do cliente e da norma API 5L;<sup>(2)</sup>
- adequar o projeto às características da linha de produção de bobinas laminadas a quente da Usiminas-Cubatão;
- reduzir os custos de produção de toda a cadeia (aço+tubo), maximizar o desempenho do material e minimizar a dispersão das propriedades mecânicas;
- testar as características da nova máquina de lingotamento contínuo com recurso de redução suave com controle dinâmico (*dynamic soft reduction*);<sup>(19)</sup>
- Apresentar as seguintes características gerais:
  - menor teor de carbono equivalente<sup>(10)</sup> e PCM<sup>(11)</sup> possível;
  - uso de elementos microligantes para incrementar resistência, tenacidade e homogeneizar a microestrutura (especialmente durante o processamento na fase austenítica);
  - dessulfuração em forno panela com emprego de escória sintética;
  - emprego de alteração da morfologia das inclusões (tratamento de globulização);
  - lingotamento contínuo em máquina vertical curva com *dynamic soft reduction*;
  - controle de resfriamento diferenciado ao longo do comprimento da tira laminada a quente de forma a homogeneizar as diferenças entre as pontas externas da bobina com o seu interior;
  - faixa de propriedades mecânicas estreitas, de forma a oferecer um produto mais homogêneo em termos de desempenho;
  - relação elástica (LE/LR) a mais baixa possível, para maximizar o desempenho na conformação dos tubos e no seu uso em campo.

Foram produzidas duas corridas ambas lingotadas em máquina vertical curva, porém uma empregando o equipamento com o recurso de redução suave com controle dinâmico. Ao todo foram embarcadas 130 t de bobinas nas dimensões 9,52×1.460 mm que foram transformadas, através do processo ERW, em cerca de 100 tubos API 5L X70 PSL2 com diâmetro de 16 polegadas e espessura de 3/8 ou 0,375 polegadas.

### 3 RESULTADOS

Os dados a seguir ilustram o desempenho do material em termos das propriedades mecânicas obtidas nos tubos conforme fornecidos pelo produtor dos tubos. A Figura 5 apresenta os resultados obtidos em ensaios de tração de amostras retiradas transversalmente ao sentido de laminação. Já a Figura 6 apresenta os resultados obtidos em amostras testadas em tração segundo a direção longitudinal (paralela ao sentido de laminação).

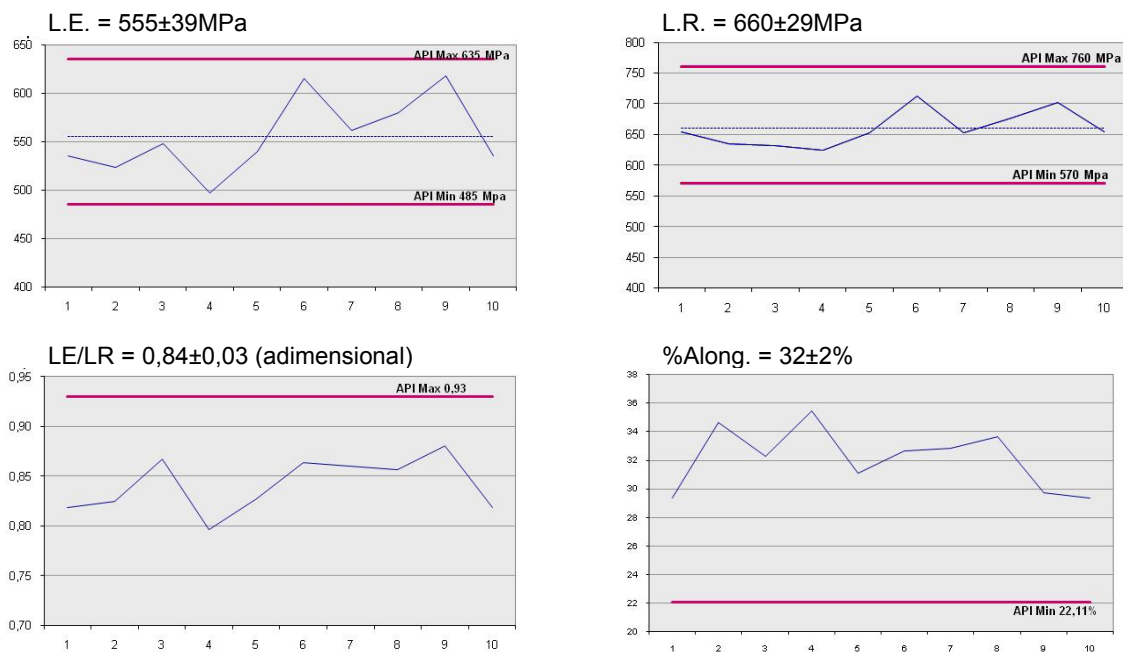


**Figura 5.** Ensaios de tração transversal em tubos API 5L X70 PSL2 realizados e cedidos pelo cliente (L.E.; L.R.; LE/LR e %Along.) – 18 resultados.

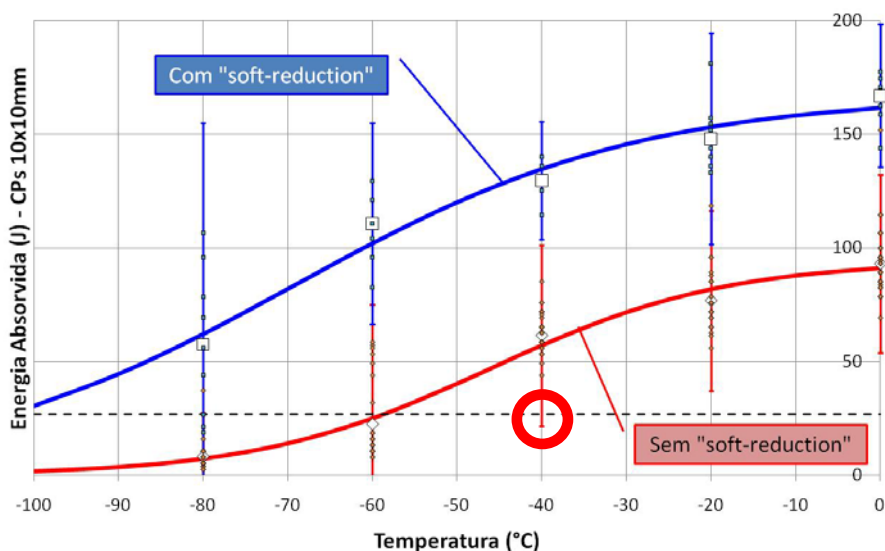
A Figura 7 apresenta os resultados obtidos em ensaios de Impacto Charpy, para amostras com o corpo de prova orientado na direção transversal ao sentido de laminação e conseqüentemente com o entalhe em “V” colocado no sentido longitudinal.

Os ensaios de impacto Charpy utilizaram CPs de tamanho reduzido (*subsize*) usinados com uma área de  $10 \times 6,7 \text{ mm}^2$  devido à limitação na espessura dos tubos de 9,52 mm. Os dados mostrados no gráfico foram convertidos, para efeito de comparação, para os valores equivalentes em CPs de área  $10 \times 10 \text{ mm}^2$  multiplicando-se os resultados obtidos por 1,49 ( $=10/6,7$ ). Os valores obtidos estão bem acima do mínimo de 27J necessários para a aprovação pela norma API (Tabela 1). Conforme indicado no gráfico da Figura 7, este valor só seria atingido, considerando a dispersão dos dados, em uma temperatura de  $-40^\circ\text{C}$ .





**Figura 6.** Ensaios de tração longitudinal em tubos API 5L X70 PSL2 realizados e cedidos pelo cliente (LE; LR; LE/LR e %Along.) – 10 resultados.



**Figura 7.** Valores de Energia Charpy em função das temperaturas de teste de amostras oriundas de tubos obtidos de aço lingotado em máquina vertical curva com e sem o recurso de redução suave dinâmica (*dynamic soft reduction*). O círculo indica a temperatura na qual o mínimo da norma (27J) seria atingido.

Os dados mostrados no gráfico da Figura 7 foram modelados por uma equação de regressão tipo Boltzman:

$$E = \left[ \frac{(E_{Máx} - E_{Mín})}{1 + e^{(T_0 - T)/d_T}} \right] + E_{Mín}. \quad (\text{Eq.1})$$

Onde: E é a energia Charpy em Joules, para corpos de prova 10x10mm;  $E_{Máx}$  e  $E_{Mín}$  são os respectivos valores de energia máxima e mínima na faixa do modelamento;

$T_0$  é a temperatura de inflexão da curva, que pode ser considerada com uma forma de temperatura de transição e  $1/d_T$  é um parâmetro da taxa de inflexão (mudança) nos valores de energia.

No modelamento pela Eq.1, por definição, a energia mínima foi considerada igual a zero. Os demais parâmetros foram calculados através do *software* Minitab<sup>®</sup> versão 16.1.1. A Tabela 3 apresenta os parâmetros obtidos no modelamento.

**Tabela 3.** Dados de modelamento da curva de transição Charpy de tubos API 5L X70 PSL2 (16×0,375 polegadas)

Tipo de amostra	$E_{Máx}$	$E_{Mín}$	$T_0$	$1/d_T$
Com <i>soft-reduction</i>	167,2	0 <sup>(*)</sup>	-69,2	0,045
Sem <i>soft-reduction</i>	94,6	0 <sup>(*)</sup>	-45,9	0,072
%Diferença	77%	–	51%	-32%

<sup>(\*)</sup> – Por definição do modelamento.

#### 4 DISCUSSÃO

O volume de aço para tubos API 5L X70 PSL2 produzido é relativamente pequeno (130t), mas considerando a grande quantidade de dados prévios de bobinas de aço em outros graus e principalmente pelo uso de modelos de projeto de produto<sup>(16-18)</sup> pode-se fazer uma análise mais abrangente e representativa. Os resultados apontam para o atendimento aos requisitos da norma API 5L<sup>(2)</sup> e também aos acordados com o produtor de tubos.

Porém, conforme pode ser notado na Figura 5, deve-se tomar cuidado com os valores do limite de escoamento, pois o objetivo de diminuir a relação elástica abriu a possibilidade de obter valores de limite de escoamento (LE) abaixo do requisitado pela norma API 5L X70 nos tubos. Conforme pode ser calculado via distribuição estatística de Student, esta possibilidade é de 8%, considerando-se uma média de 531 MPa, desvio padrão de 31 MPa e 18 amostras. Esta situação é facilmente corrigida no modelamento, simplesmente visando uma relação elástica um pouco mais alta, pois os valores obtidos ( $0,80 \pm 0,02$ ) foram muito mais baixos do que o máximo permissível pela norma API 5L ( $0,93$ )<sup>(2)</sup>.

Os dados de propriedades mecânicas apontam que o desempenho do material passado na máquina de lingotamento contínuo equipada com o recurso de redução suave com controle dinâmico no final do processo de lingotamento é importante para obtenção de materiais com maiores níveis de tenacidade. É possível perceber, pelo modelamento ilustrado pelo gráfico da Figura 7 e cujos resultados estão descritos na Tabela 3, que o material lingotado com este recurso apresenta:

- maiores valores de energia (parâmetro  $E_{Máx}$ );
- uma menor temperatura de transição (indicada pelo parâmetro  $T_0$ );
- uma transição mais suave (devido aos menores valores de  $1/d_T$ ).

#### 5 CONCLUSÕES

Os dados de produção da experiência feita neste fornecimento experimental de aço para tubos API 5L X70 PSL2 validou os modelos utilizados atualmente pelo Controle Integrado de Produto da Usiminas-Cubatão e servem como referência para demonstrar a aptidão de produzir aços para tubos API 5L X70 PSL2 nessa usina.



O contexto no qual esta experiência foi realizada é promissor, pois além da instalação do novo laminador de tiras a quente da Usiminas-Cubatão, têm-se várias notícias apontando para a expansão da atual linha de gasodutos do país, o que demandará uma maior produção deste tipo de tubo no país.

## REFERÊNCIAS

- 1 Specification for Casing and Tubing. API Specification 5CT, American Petroleum Institute (API), 8<sup>th</sup> edition, October, 2005.
- 2 Specification for Line Pipe, API Specification 5L. American Petroleum Institute (API), 44<sup>th</sup> edition, March, 2007.
- 3 KUSHIDA, T.; Pipe and tubes for oil/gas development. Steel Today & Tomorrow, n.157, p.5-8, Jan., 2002.
- 4 McGraw-Hill Encyclopedia of Engineering. 2nd edition, New York, 1993.
- 5 LLEWELLYN, D.T.; Steels: metallurgy and applications. Butterworth-Heinemann, 2nd edition, Trowbridge (UK), 1992.
- 6 MORAIS, W.A.; Tubos para a indústria de exploração do petróleo e gás - características e particularidades de produção, revista TUBO & Cia, vol. 2, no 5, p. 8 a 18, jul./set. de 2005.
- 7 MORAIS, W.A. et. Al.; Desenvolvimento de aços laminados a quente na Cosipa destinados à produção de tubos API pelo processo ERW. 40<sup>o</sup> Seminário de Laminação da ABM, out., 2003.
- 8 INOGATE – Interstate Oil and Gás Transport to Europe, European Comission: <<http://www.inogate.org/html/maps/mapsgas.htm>> Acesso em: Jun./2009.
- 9 GRAY, M.J.; Metallurgy, Procurement Strategy and Application of Near Stoichiometric 0.10% Niobium X-80 Linepipe. Pipeline Steels Seminar, Nova Deli, Nov. 2010.
- 10 International Institute of Welding (IIW): Technical Report, 1967, IIW doc. IX-535-67.
- 11 ITO, Y.; BESSYO, K.; Weldability formula of high strength steels related to heat-affected zone cracking. The Sumitomo Search, n.1, p.59-70, May, 1969.
- 12 MORAIS, W.A. et. Al.; Desenvolvimento na Cosipa do aço API 5CT J55 para tubos de pequeno e grande diâmetros. 41<sup>o</sup> Seminário de Laminação da ABM, Joinville, out., 2004.
- 13 MORAIS, W.A.; SAMPAIO Jr., H.D.; FRANCIS, C.; Cenário brasileiro de tubos de aço de pequeno diâmetro: o olhar sobre o setor. 65<sup>o</sup> Congresso Anual da ABM, Rio de Janeiro, jul. 2010.
- 14 KYRIAKIDES, S.; CORONA, E. Pipe and Tube Manufacturing Process. In: \_\_\_\_\_ . Mechanics of Offshore Pipelines. Slovenia: Elsevier, 2007. Cap. 3, p.59-88.
- 15 YOKOYAMA, E; KANO, N; YAMAGATA, M.; WATANABE, S.; Effects on Penetrator Defect Occurrence of Welding Conditions and Mn/Si Ratio of ERW High Manganese Line Pipe. KAWASAKI STEEL GIHO, v.10, n.1, 1978. <[http://www.jfe-steel.co.jp/archives/ksc\\_giho/10-1/j10-023-033.pdf](http://www.jfe-steel.co.jp/archives/ksc_giho/10-1/j10-023-033.pdf)> Acesso em 15 de Abril de 2010.
- 16 MORAIS, W.A.; BORGES, H.C.; PEREZ, F.A.. Modelamento e quantificação da relação propriedades X microestrutura nos aços estruturais laminados a quente da Cosipa. 62<sup>o</sup> Congresso Anual da ABM, Vitória, jul. 2007.
- 17 MORAIS, W.A.; BORGES, H.C.; Uso de inteligência computacional no desenvolvimento, adequação e controle de qualidade de aços laminados a quente na usiminas cubatão. Tecnologia em Metalurgia e Materiais, São Paulo, v. 6, n. 4, abr.-jun. 2010.
- 18 BORGES, H.C., Predição de propriedades mecânicas em aços laminados a quente utilizando redes neurais adaptativas. 87p. Monografia (MBA em Siderurgia) – Universidade de São Paulo, São Paulo, 2008.
- 19 FLICK, A.; et al. Siemens Vai's next generation casting technology for ultimate productivity and flexibility. 40<sup>o</sup> Seminário de Aciaria da ABM (Internacional), São Paulo, mai., 2009.