



DESAFIOS NA CRIAÇÃO E ESPECIFICAÇÃO DE AÇOS PARA TUBOS SOLDADOS (ERW/HFIW) VISANDO APLICAÇÕES NA EXTRAÇÃO E TRANSPORTE DE PRODUTOS PETROQUÍMICOS (TUBOS API)¹

Herbert Christian Borges²
Willy Ank de Moraes³

Resumo

A atual demanda para a extração e transporte de gás natural tem exigido requisitos cada vez mais restritivos para os dutos. Como o desempenho na soldagem é um fator primordial na instalação de um duto de transporte, torna-se necessária a utilização de materiais com baixos teores de carbono equivalente e com grande homogeneidade química e dimensional. No caso dos dutos de extração, a resistência mecânica e estabilidade das propriedades mecânicas em meios de alta pressão e eventualmente corrosivos são os principais desafios. Este trabalho visa apresentar uma revisão sucinta sobre aços para tubos API e seu processo de especificação, fabricação, ensaios de liberação e especiais, para o atendimento da produção de tubos ERW/HFIW de grandes e pequenos diâmetros.

Palavras-chave: Aço plano; Tubos; API; Desenvolvimento de produto.

CHALLENGES IN THE CREATION AND SPECIFICATION OF WELDED STEEL PIPES FOR APPLICATIONS IN PRODUCTION AND TRANSPORT OF PETROCHEMICAL PRODUCTS (API PIPES)

Abstract

The current demand for extraction and transportation of natural gas has required increasingly stringent requirements for pipelines. As welding performance is a key factor in the installation of a pipeline transportation, it becomes necessary to use materials with low carbon equivalent and with great chemical and dimensional homogeneity. In the case of production pipes, the mechanical strength and stability of mechanical properties at high pressure and eventually corrosive environments are the main challenges. This work presents a short review of API steel pipe and their specification process, manufacture and tests to attend the production of ERW/HFIW pipes of large and small diameters.

Key-words: Flat steel; Pipes; API; Product development.

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

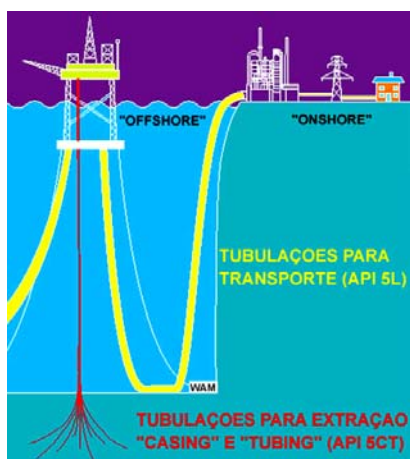
² Mestrando, Eng^o Metalurgista, Eng. do Produto Pleno. E-mail: herbert.borges@usiminas.com.

³ Doutorando, MSc., Eng^o 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.

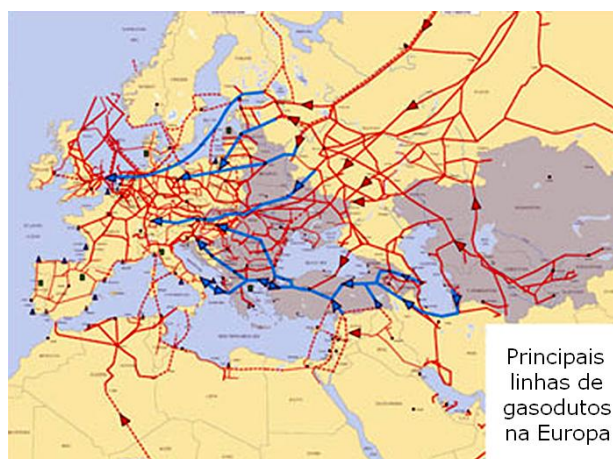
1 INTRODUÇÃO

O petróleo e o gás natural são algumas das matérias-primas e fontes de energia mais exploradas e cobiçadas em todo o mundo. Tanto a obtenção quanto o processamento, a distribuição e o uso destas duas matérias-primas (petróleo e gás natural) e de seus subprodutos (petroquímicos) requerem grande quantidade de tubos. Estes tubos são especificados por rígidas normas (API, ISO etc.), cuja característica marcante é o foco sobre a especificação do produto final (tubos) objetivando-se aumentar a segurança de uso.^(1,2)

Na extração do petróleo e do gás natural, os tubos utilizados para a perfuração e revestimento de poços e na movimentação dos fluidos durante a extração, são conhecidos como tubos OCTG (*Oil Country Tubular Goods*).⁽¹⁾ Os tubos 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, são conhecidos como *Linepipes*,⁽²⁾ 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, como mostrado na Figura 1.b.⁽³⁻⁶⁾



(a)



(b)

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;^(6,7) (b) Rede principal de gasodutos que servem o continente Europeu.⁽⁸⁾

Com as novas descobertas de gás natural na bacia de Santos e com a crescente demanda deste combustível no país, abre-se um cenário bastante positivo para o incremento da produção e utilização destes tubos especialmente na ampliação da malha de distribuição do país.

2 TUBOS API

No processo de extração e transporte de petróleo e gás natural, são utilizados basicamente duas classes de tubos, sendo os tubos OCTG⁽²⁾ (*Oil Country Tubular Goods*) utilizados para a extração/produção e os *Linepipes*,⁽¹⁾ que são os tubos utilizados para o transporte dos fluidos.

2.1. Tubos para Dutos de Produção/Extração de Gás e Petróleo (OCTG: *Oil Country Tubular Goods*)

Os tubos OCTG (*Oil-Country Tubular Goods*) são utilizados para a perfuração de poços de petróleo e gás e também na sua extração. Podem ser classificados nos três tipos listados a seguir:

- *tubos de perfuração (drilling)*: são utilizados para a perfuração de poços, sendo necessárias resistências à abrasão, à fadiga e à corrosão-fadiga;
- *tubos de revestimento (casing)*: são inseridos nas perfurações e assentados com cimento;
- *tubos de produção (tubing)*: são posicionados dentro dos tubos de revestimento e utilizados para a extração de óleo e gás assim como no transporte de fluídos hidráulicos para acionamento de equipamentos.

Os tubos OCTG são unidos entre si por meio de rosqueamento, portanto, a soldabilidade destes tubos não é uma característica primordial, permitindo a utilização de aços com maiores teores de carbono equivalente ($\%C_{eq}$). Nestes tipos de tubos as propriedades mecânicas podem ser obtidas por meio de aços mais simples ou por meio de tratamentos térmicos de têmpera seguida de revenimento ou normalização. Tais tratamentos térmicos são necessários para alcançar os níveis de resistência mecânica e tenacidade exigidos e melhorar características de resistência à corrosão e controle sobre as propriedades mecânicas finais.

Este é um mercado em rápida expansão.⁽⁹⁾ A Tabela 1 ilustra a distribuição de consumo médio de tubos de pequenos diâmetros empregados na extração destes produtos.^(10,11) Considerando que um poço de petróleo da região do pré-sal terá cerca de 6 quilômetros de profundidade,⁽¹²⁾ isto equivale a dizer que mais de 500 t de tubos serão utilizados por poço. Esta estimativa foi feita considerando-se:

- que existem tubos de revestimento e condução no mesmo poço; e
- uma massa linear média de 50kg/m, conforme Tabela 1.

Tabela 1. Distribuições de consumo de tubos para extração de petróleo e gás⁽¹¹⁾

	Diâmetros (mm)	Massa linear (kg/m)	Participação
Tubos API 5CT	> 400	> 100	50%
	200 a 400	50 a 100	25%
	< 200	< 50	25%

A norma API 5CT⁽¹⁾ descreve os graus dos tubos de revestimento e produção por meio de letras e números associados com o grau de resistência mecânica requisitada para seu uso, conforme sucintamente apresentado pela Tabela 2. A resistência mecânica destes tubos é diretamente proporcional à profundidade de operação nos poços petrolíferos, como mostrado no gráfico da Figura 2a. Tubos sem costura são os principais produtos utilizados para estas aplicações, devido a sua confiabilidade. Porém os tubos soldados por resistência elétrica (processo ERW) ou por indução (processo HFIW) têm ganhado terreno, à medida que a tecnologia de soldagem vem progredindo assim como o processo de fabricação dos aços.

Tabela 2. Requisitos de tração e dureza de alguns graus da norma API 5CT⁽¹⁾

Grau	Limite de Escoamento (MPa)		Limite de Resistência (MPa)		Dureza (HR _C)	
	Mín.	Máx.	Mín.	Máx.	Mín.	Máx.
H40	276	552	414		–	
J55	379	552	517		–	
K55	379	552	655		–	
N80	552	758	689		–	
M65	448	586	586		22	
L80	552	655	655		23	
C90	621	724	689		25,4	
C95	655	758	724		–	
T95	655	758	724		25,4	
P110	758	965	862		–	
Q125	862	1034	931		–	

2.2 Tubos para Dutos de Condução (Linepipe)

Estes tubos podem se destinar a três diferentes tipos de linhas de dutos:⁽³⁾

- recolhimento (*gathering lines*): que coletam o óleo cru ou o gás natural provenientes dos poços produtores;
- fluxo (*flow lines*): que transportam o óleo cru ou o gás natural até as plataformas produtoras, ou até as plantas de desidratação/refinarias;
- transporte (*trunk lines*): que transportam óleo desidratado ou gás em longas distâncias até os centros consumidores.

Nos dois primeiros casos, as tubulações podem estar submetidas a ambientes agressivos, como esquematizado no gráfico da Figura 2b. Também podem estar presentes altas pressões de trabalho (tanto internas quanto externas), por isso, tubos de produção (*tubing*) de paredes espessas sem costura são normalmente a melhor opção nesta aplicação, embora estejam sendo desenvolvidos tubos soldados *high collapse*, para estas aplicações. Os dutos de transporte (*trunk lines*) são utilizados para o transporte dos produtos petroquímicos, dos sítios de produção para os grandes centros consumidores. Neste caso, os tubos empregados são normalmente produzidos pelo processo de dobramento de chapas de aço seguido de soldagem por arco submerso, sendo que o mais comum é o UOE.⁽¹¹⁻¹³⁾

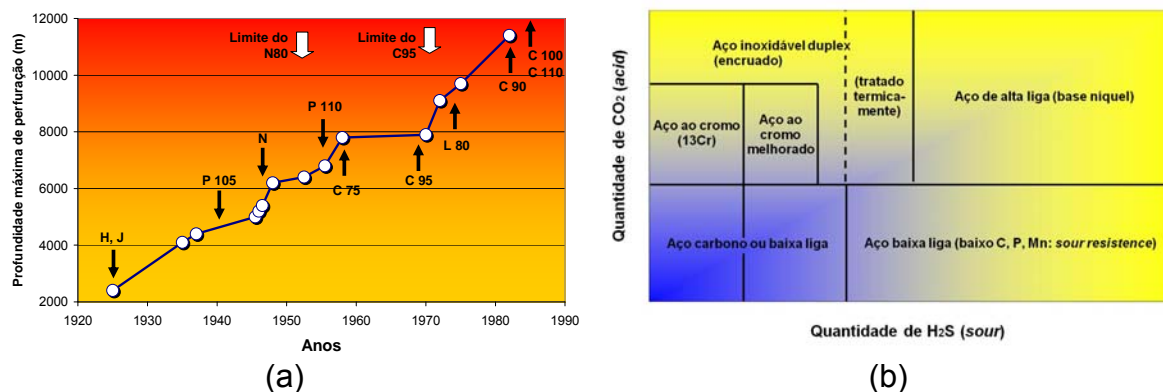


Figura 2. (a) Máximas profundidades de poços para os graus de resistência dos tubos API 5CT.⁽¹¹⁾ (b) Tipos de tubos de aço empregados em diferentes ambientes de extração de petróleo e gás natural.⁽¹¹⁾

O aumento na demanda tem levado a um aumento das pressões de trabalho (podendo chegar a 100 atm ou 1.450 lbf/in²). Um grande fator limitante da pressão de trabalho é o grau de resistência dos tubos empregados. A Tabela 3 ilustra alguns

graus de resistência para tubos utilizados na condução de óleo e gás, segundo definidos pela norma API 5L nível PSL 2.⁽²⁾ Atualmente, os graus que têm sido mais utilizados em linhas de condução são o X70, já consolidado em todos os tipos de tubos (pequeno a grande diâmetro), e o X80, que está em consolidação para tubos de grandes diâmetros.⁽¹⁴⁾

Tabela 3. Requisitos mecânicos da norma API 5L PSL2⁽²⁾

GRAUS		B	X42	X46	X52	X56	X60	X65	X70	X80
PROPRIEDADES MECÂNICAS										
LE mín. MPa (Tração Transv.)		241	290-	317-	359-	386-	414-	448-	483-	552-
LR mín. MPa		414-758		434-	455-	490-	517-	531-	565-	621-
LE/LR máx. (3)		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 mín.	TEMPERATURA °C	ZERO								
	Transversal ("2V")	27								outros

Diferentemente dos dutos utilizados na extração, os tubos utilizados no transporte são unidos por meio de solda, que é feita no local de montagem do duto. Como o desempenho na soldagem é um fator primordial na instalação de um duto, torna-se necessária a utilização de materiais com baixos teores de carbono equivalente e com grande homogeneidade química e dimensional. A redução do carbono equivalente é contraditória com a necessidade de aumento da resistência mecânica dos tubos, pois o projeto padrão dos aços de alta resistência é feito pela utilização de elementos de liga que aumentam os valores do carbono equivalente.

Assim, novos métodos de obtenção de resistência mecânica têm sido empregados, como adição de elementos formadores de precipitados (Cr, Mo) e microligantes (V, Ti, Nb), laminação controlada e processamento termomecânico (laminação controlada + resfriamento acelerado). Os aços empregados nos tubos das grandes obras apresentam um sofisticado controle de qualidade, de fabricação e de inspeção, que se estende até o momento de liberação do duto já finalizado em campo (teste de linha).

Tubos de condução podem ser fabricados sem ou com costura. O último caso é especialmente empregado para a produção de dutos de grandes diâmetros e vazão. Os tubos soldados podem ser produzidos via soldagem por resistência elétrica (ERW – *Electric Resistance Welding*) ou por arco submerso (SAW – *Submerged Arc Welding*), seja longitudinal (UOE-SAW ou JCO-SAW) ou transversal (Spiral-SAW). Tubos ERW são limitados, normalmente, a diâmetros de até 600 mm (24") e espessuras de 19 mm (0.75"). Tubos soldados por arco submerso podem possuir diâmetros de até 2.000 mm (80") ou espessuras de até 50 mm (2"). Tubos ERW e espirais (SAW) utilizam bobinas laminadas a quente e tubos UOE e JCO (SAW) utilizam chapas grossas.

3 PROCESSOS PRODUTIVOS DE TUBOS

Existem basicamente dois tipos de tubos: com costura (soldados) e sem costura. Cada tipo de tubo pode ser produzido por alguns processos e variantes destes, sendo que os principais processos para tubos soldados são ilustrados pelas Figuras 3 e 4. Pelo processo de laminação a quente é possível obter tubos a partir de materiais de difícil trabalho a frio, como os aços de alto carbono ($C \geq 0,50\%$) ou aços inoxidáveis martensíticos, como por exemplo, da norma API 5CT L80 13Cr.⁽¹⁾ Os processos UOE, JCO e Helicoidal são empregados para produzir tubos de grandes diâmetros. Os tubos Helicoidais são largamente empregados para o transporte de fluidos em baixa pressão (aquedutos, saneamento etc.) e os tubos UOE são bastante aplicados em gasodutos, onde a pressão de trabalho é elevada. Porém esta tendência está se equilibrando com a crescente utilização de tubos helicoidais também no transporte de petróleo e gás.⁽¹⁵⁾

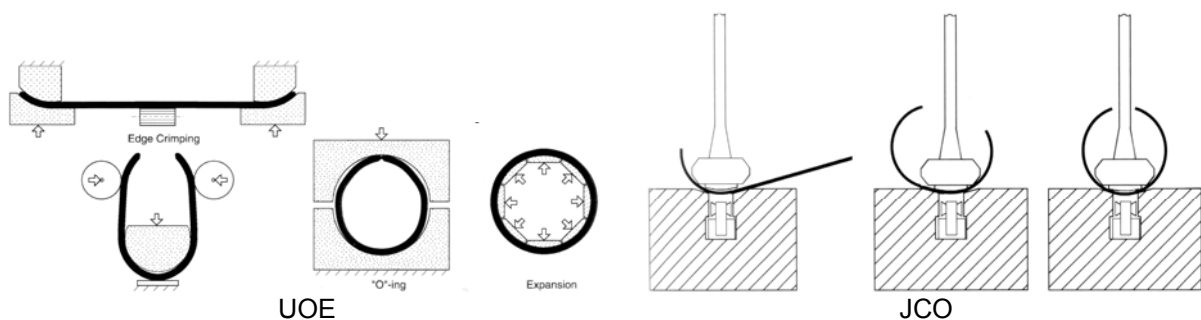


Figura 3. Dois processos de produção de tubos de grande diâmetro.⁽¹⁶⁾

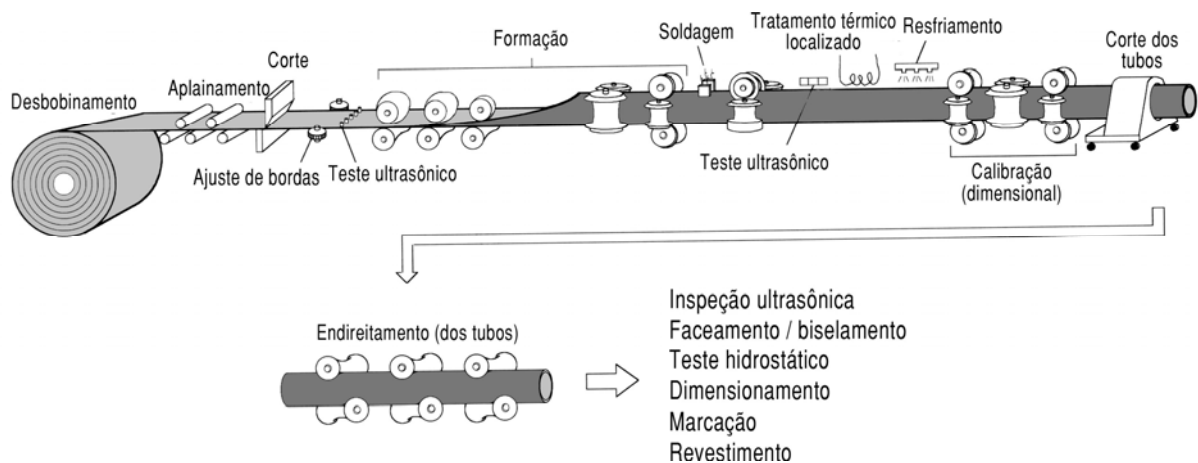


Figura 4. Visão esquemática do processo de produção de tubos de médio e pequeno diâmetro ERW / HFIW para produção de tubos API.⁽¹⁶⁾

A grande parte das empresas instaladas no país emprega o processo de produção por soldagem sem adição de metal, conhecido pela sigla ERW e o HFIW, conforme ilustrado pela Figura 4. A possibilidade de um tratamento térmico por indução, localizado na linha de solda, também é uma variância do processo praticamente obrigatória para produzir tubos API de forma econômica. Porém, este recurso é pouco comum entre os fabricantes de tubos ERW/HFIW nacionais, mesmo porque não seria obrigatório para a maioria das aplicações. Os produtos tubulares de uso mais comum para o mercado são produzidos pelo processo de conformação contínua e solda ERW/HFIW, conforme ilustrado pela Tabela 4.

Tabela 4. Dados de produção de tubos no Brasil nos últimos dois anos⁽¹⁶⁾

Anos	Mercado Nacional (*)	Produção de tubos (**)			Capacidade instalada total
		Pequeno diâmetro (***)	Grande diâmetro (***)	Sem costura	
2008	2.250 (55%)	1.230 (55%)	490 (22%)	533 (24%)	4.100
2009	1.420 (32%)	842 (59%)	212 (15%)	364 (26%)	4.400

(*) – Percentual em relação à capacidade instalada total. (**) – Percentual em relação ao mercado nacional. (***) – Tubos com costura. Números em mil toneladas.

3.1 Ensaios de Liberação de Tubos

Os produtos tubulares possuem características particulares e usos específicos, daí surgiu-se a necessidade de ensaios tecnológicos também específicos para os produtos tubulares em adição aos tradicionais ensaios de análise química e resistência mecânica (tração e dureza).

No caso dos tubos soldados, a maioria dos ensaios tecnológicos visa determinar o desempenho especialmente da região soldada, pois esta região é tipicamente um ponto de heterogeneidade de propriedades mecânicas, como ilustrado pela Figura 5.

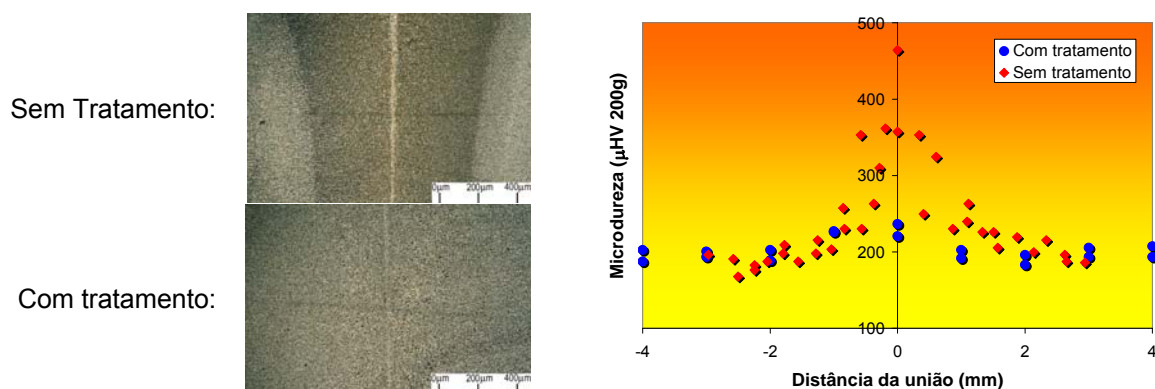


Figura 5. Aspecto microestrutural da variação de microdurezas ao longo da região de solda de um tubo API 5CT J55 produzido via HFIW: (a) sem tratamento térmico e (b) com tratamento térmico localizado.⁽¹¹⁾

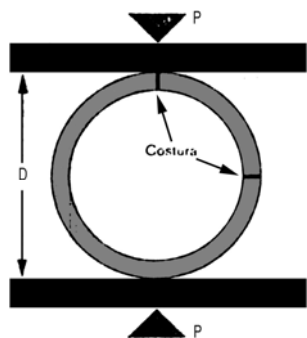
Os ensaios típicos que visam verificar a qualidade da solda são basicamente três: alongamento (abertura), flangeamento e achatamento, sendo este último empregado para tubos API, como exemplificado esquematicamente na Figura 6a. Estes testes medem a capacidade de integração e homogeneidade da solda com o aço do tubo, nos quais a ductilidade da solda é de primordial importância para a aprovação do material.

Similarmente, também são empregados diferentes ensaios não destrutivos, especialmente utilizando-se equipamentos de inspeção *on-line*, sendo o mais empregado a inspeção por ultrassom, como mostrado na Figura 6b.

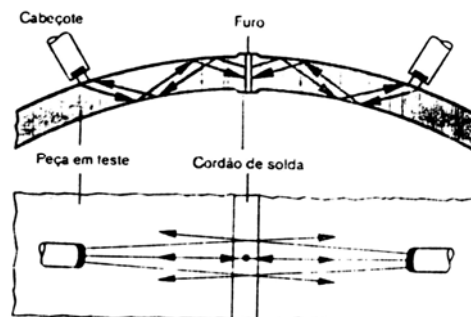
4 PROPRIEDADES MECÂNICAS

Como os tubos para tal aplicação têm seu foco sobre a especificação do produto final, a produção destes tipos de tubos torna-se uma tarefa não trivial, normalmente envolvendo do fornecedor de aço até o usuário final de forma a:

- obter estreitas faixas de propriedades mecânicas nos tubos, já que o processo de fabricação altera variavelmente as propriedades mecânicas do tubo final em relação à matéria-prima utilizada;⁽²⁾
- controlar a 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);
- gerar juntas soldadas (no caso de tubos com costura) homogêneas em relação ao metal base; e
- alcançar características dimensionais e geométricas muito bem controladas para oferecer homogeneidade aos tubos.



(a) - Ensaio de achatamento



(b) - Ensaio de ultrassom

Figura 6. Esquemas de ensaios empregados na liberação de tubos API.⁽¹⁶⁾

4.1 Soldabilidade e Resistência à Fratura

A soldabilidade dos tubos de condução é importante não apenas para a fabricação do tubo, mas principalmente para a instalação destes tubos no campo, principalmente quando instalados em ambientes com baixas temperaturas. Tradicionalmente a fórmula do Instituto Internacional de Soldagem (IIW - *International Institute of Welding*) têm sido utilizada para caracterizar a soldabilidade destes tubos. Porém em aços mais modernos, com teores de carbono mais baixos a fórmula do IIW⁽¹⁷⁾ não é tão adequada e têm sido utilizados os valores de PCM - *Parameter of Crack Measurement*.⁽¹⁸⁾ Nos tubos de maior exigência (grandes diâmetros, espessuras e resistência) há uma tendência futura do C_{eq} se limitar a 0,40% e do P_{cm} em 0,20%, descritos pelas equações a seguir:

$$\%C_{eq} = \%C + \%Mn/6 + (\%Mo+\%Cr+\%V)/5 + (\%Ni+\%Cu)/15 \quad (\text{Eq. 1})$$

$$\%P_{cm} = \%C + \%Si/30 + (\%Mn+\%Cu+\%Cr)/20 + Ni/60 + Mo/15 + V/10 + 5B \quad (\text{Eq. 2})$$

A exigência de maiores valores de tenacidade é necessária especialmente em gasodutos, pois em oleodutos uma trinca pequena produz uma rápida descompressão dissipando rapidamente a força para a propagação de trincas. Para obter melhores níveis de tenacidade, assim como à fragilização por hidrogênio (HIC - *Hydrogen Induced Cracking*),⁽¹⁹⁾ uma microestrutura fina deve ser empregada nos aços o que requer intensivo uso das tecnologias de adição de microligantes, laminação controlada e resfriamento acelerado. São comumente requisitados: garantia de Charpy em baixas temperaturas, menores valores de C_{eq} , P_{cm} , S, P e para produtos mais espessos,⁽⁵⁾ rígidos ensaios para garantia de área de fratura dúctil mínima em baixas temperaturas (DWTT - *Drop Weight Tear Test*).

Uma característica necessária é a homogeneidade de propriedades mecânicas. Em tubos soldados, deve-se empregar um procedimento de soldagem conveniente para obter uma homogeneidade estrutural e mecânica. No caso de tubos soldados por resistência elétrica o meio mais econômico de se fazer esta homogeneização é por meio de um tratamento térmico na região de solda, em temperaturas suficientemente elevadas de tal modo a promover uma reversão da microestrutura de solda, homogeneizando-se suas propriedades, conforme ilustrado na Figura 5.

Outra característica importante é a resistência do material à fratura. Os ensaios normalmente utilizados para este fim são o Charpy e o DWTT (*Drop Weight Tear Test*). Sabe-se que o teor de certos elementos considerados residuais, especialmente o enxofre, afeta diretamente o desempenho do material, como pode ser observado pelos dados gerados por fornecimentos anteriores de aços para tubos API realizados pela Usina de Cubatão, apresentados na Figura 7. Atualmente, têm-se tornado mais usuais ensaios de tenacidade à fratura por CTOD (*Crack Tip Open Displacement*).

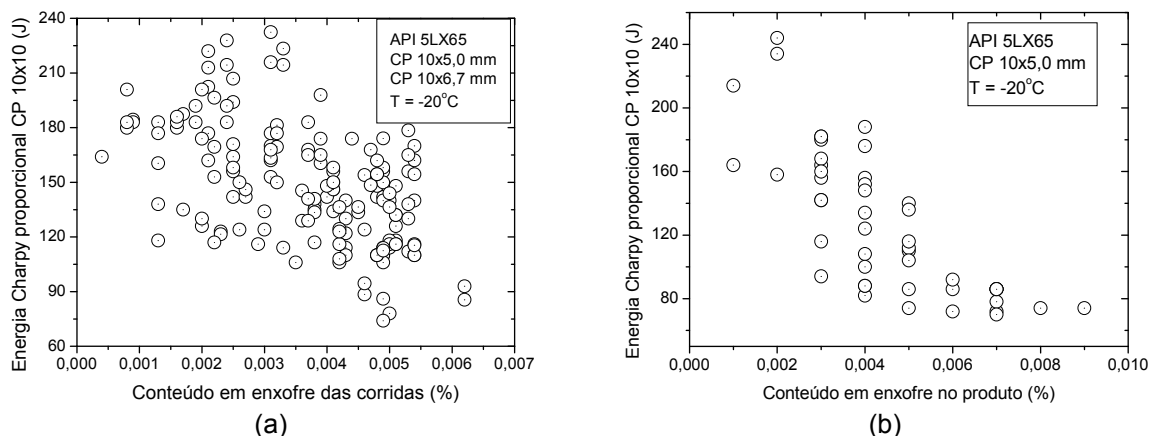


Figura 7. Variação da energia Charpy de um aço API 5L X65-PSL2 com o teor de enxofre (a) na corrida e (b) no produto final (amostra retirada de bobina).^(8,11)

Também está se tornando uma necessidade a comprovação da resistência à fratura na região de solda de tubos ERW/HFIW. Neste caso o maior desafio é manter a homogeneidade desta linha de solda e minimizar a ocorrência da linha central ferrítica, que tende a criar dispersões nos valores de energia Charpy.

4.2 Ajustes nas Propriedades Mecânicas Chapa – Tubo

Em tubos de grandes diâmetros, um encruamento também pode ocorrer, porém em menor grau. Os corpos de prova devem ser retirados na direção transversal do tubo, conforme ilustrado pela 8a. A planificação destes CP's causa um encruamento reverso que pode diminuir o limite de escoamento a níveis até mesmo inferiores aos observados na chapa original: redução de até 6%, em média, pelos dados da Tabela 5. O fenômeno metalúrgico que produz este efeito é conhecido como efeito Bauschinger e é mais intenso em tubos de grande diâmetro e de pequena espessura, produzidos com aços de estrutura ferrita-perlita.⁽⁵⁾

No caso dos dutos de pequenos diâmetros, o encruamento gerado na conformação das chapas de aço deve ser considerado de forma que o aço seja projetado para apresentar uma resistência menor do que a requisitada no tubo, de modo que o nível de resistência que falta é oferecido pelo encruamento, conforme observado na Figura 8b e na Tabela 5.

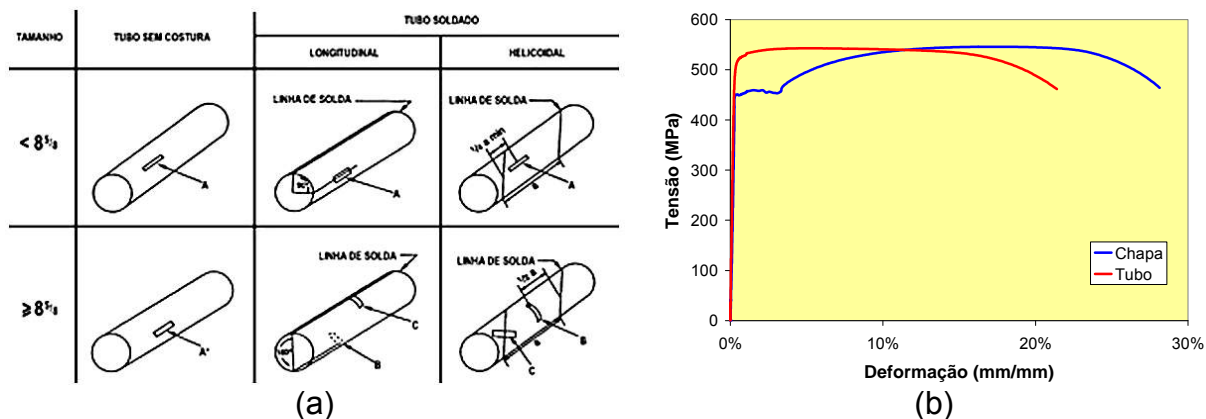


Figura 8. (a) Posição de retirada das amostras de tração para os diversos tipos de tubos.⁽²⁾ (b) Comparação das curvas tensão x deformação apresentado por um tubo de pequeno diâmetro conformado a frio a partir de uma chapa de aço.⁽¹⁰⁾

A classificação do tipo de tubo (pequeno, médio e grande diâmetro) é feita conforme prática na Usina de Cubatão⁽²⁰⁾ descrita abaixo:

- Tubos de Pequeno diâmetro: apresentam diâmetros menores que 4,5”;
- Tubos de Médio diâmetro: apresentam diâmetros entre 4,5 e 8”;
- Tubos de Grande Diâmetro: possuem espessuras maiores que 8”.

Tabela 5. Exemplos da variação nas propriedades mecânicas médias chapa/tubo⁽⁶⁾

Grau (API 5L ou 5CT)	Número de amostras	Limite de escoamento (MPa)	Limite de Resistência (MPa)	Relação Elástica (LE/LR)	Along. %	Diâm. (pol)	Perímetro (mm)	Limite de escoamento (MPa)	Variação LE	Limite de Resistência (MPa)	Variação LR	Relação Elástica (LE/LR)	Along %	Variação
X65	94	543	638	0,85	33	18	1436	477	-12%	617	-3,3%	0,77	31	-6,1%
	10	534	620	0,86	35	18	1436	490	-8,2%	610	-1,6%	0,80	32	-8,6%
X60	17	480	575	0,83	39	16	1277	483	+0,6%	580	0,9%	0,83	33	-15,4%
X56	56	450	545	0,83	38	18	1436	401	-11%	540	-0,9%	0,74	36	-5,3%
	7	452	563	0,80	41	18	1436	403	-11%	535	-5,0%	0,75	37	-9,8%
X42	6	320	478	0,67	42	16	1277	337	+5,3%	454	-5,0%	0,74	40	-4,8%
5LB	2	324	485	0,67	36	18	1436	322	-0,6%	458	-5,6%	0,70	n.d.	
J55	40	438	568	0,77	40	4,5	358	544	+24%	595	+4,0%	0,92	23	-42%

Os dados obtidos para tubos de pequeno diâmetro, como ilustrados na Tabela 5, foram utilizados para criar uma equação biparamétrica pelo software de análise Estatística[®]. Esta equação oferece a dependência do encruamento com o diâmetro (ϕ) e a espessura (e), conforme reproduzida abaixo:⁽²¹⁾

$$\Delta LE = -218,6 - 0,751 \cdot \phi + 160,5 \cdot e - 0,009 \cdot \phi^2 + 0,176 \cdot \phi \cdot e - 15,7 \cdot e^2 \quad (\text{Eq. 3})$$

Onde: ΔLE - variação no limite de escoamento (MPa); ϕ - diâmetro nominal externo do tubo em mm; e - espessura do tubo em mm;

Para obter a Eq. 3, utilizou-se uma regressão quadrática suave.⁽²¹⁾ O erro obtido pela correlação da curva com os dados experimentais médios para cada combinação

diâmetro/espessura (ϕ / e) encontra-se em torno de 5%. A Figura 9 ilustra dois exemplos de alteração de propriedades mecânicas entre bobinas (chapas) e tubos produzidos a partir deste material.

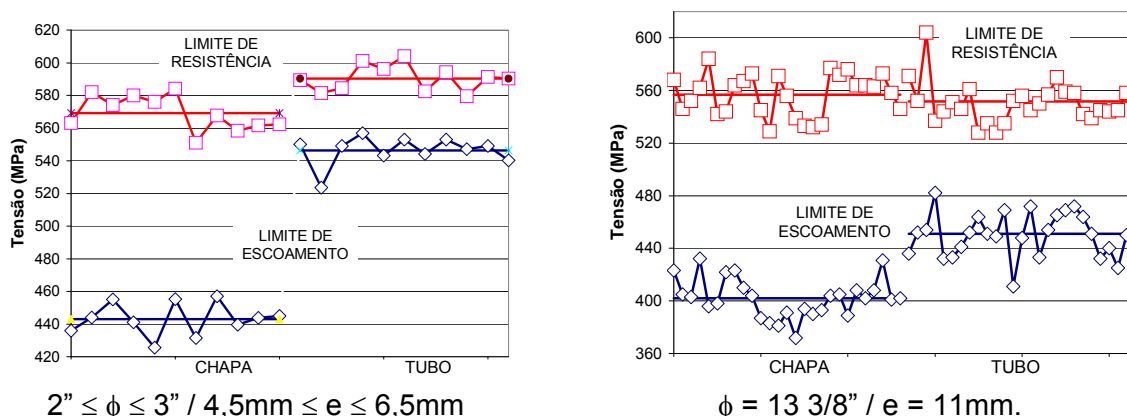


Figura 9. Variação das propriedades mecânicas entre amostras retiradas de chapas (bobinas) e tubos do tipo API 5CT J55 produzidos a partir destas bobinas.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os desafios para a produção de aços e tubos para a indústria petroquímica são grandes, inclusive para tubos soldados aplicáveis na extração e condução de produtos petroquímicos. Inúmeras considerações a respeito da homogeneidade química, mecânica e conseqüentemente estrutural devem ser previstas nos processos produtivos. A Usiminas-Cubatão tem desenvolvido e continuará evoluindo na produção destes materiais visto que o cenário futuro parece promissor, com indícios de expansão da atual linha de gasodutos do país, que levará a maior produção e consumo destes tubos no Brasil.

REFERÊNCIAS

- 1 Specification for Casing and Tubing. **API Specification 5CT**, American Petroleum Institute (API), 7th edition, October, 2001.
- 2 Specification for Line Pipe, **API Specification 5L**. American Petroleum Institute (API), 43rd edition, March, 2004.
- 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 MARTINEZ, J.A.; ABREU, P.L.; **Gás Natural: o combustível do novo milênio**. Porto Alegre: Plural Comunicação, 2003.
- 7 INOGATE – **Interstate Oil and Gás Transport to Europe**, European Comission: <http://www.inogate.org/html/maps/mapsgas.htm> <Acessado em: Jun./2009>.
- 8 MORAIS, W.A. et. Al.; **Desenvolvimento de aços laminados a quente na Cosipa destinados à produção de tubos API pelo processo ERW**. 40^o Seminário de Laminação da ABM, out., 2003.
- 9 SANTOS OFF-SHORE Oil & Gas Expo.: Inspebras acredita no crescimento do setor de petróleo e gás <http://www.santosoffshore.com.br/detalhes-noticia.aspx?id=331> <Acesso em 13 de Abril de 2010>.
- 10 MORAIS, W.A. et. Al.; **Desenvolvimento na Cosipa do aço API 5CT J55 para tubos de pequeno e grande diâmetros**. 41^o Seminário de Laminação da ABM, out., 2004.



- 11 MORAIS, W. A. Tubos para a indústria de exploração do petróleo e gás - características e particularidades de produção. In: **Tubo & Cia**, v. 2, p. 8-18, 2005.
- 12 MORAIS, W.A. et. Al.; **O Mercado de Aços para a Indústria do Gás e Petróleo Projeções 2007-2012**. Workshop: "Aços de elevado valor agregado", Vitória, 23 de Julho de 2007.
- 13 MATSUBARA, D.B.; DE AGUIAR Jr., A.F. **Desenvolvimento de Chapas Grossas para Tubos API 5L X70 de Elevada Tenacidade na Usiminas-Cubatão**. 66o Congresso da ABM, Jul., 2011.
- 14 GRAY, M.J.; **Metallurgy, Procurement Strategy and Application of Near Stoichiometric 0.10% Niobium X-80 Linepipe**. Pipeline Steels Seminar, Nova Deli, Nov. 2010.
- 15 TRINDADE, V.B.; ALENCAR, P.F; PARANHOS, R.; DINIZ, R. **Produção de tubos de aço de grandes diâmetros soldados pelo processo arco submerso helicoidal (espiral)**. In: ABM. CONGRESSO ANUAL DA ABM, 61, Rio de Janeiro. Anais. São Paulo. 2006. 1 CD.
- 16 KYRIAKIDES, S.; CORONA, E. Pipe and Tube Manufacturing Process. In: _____ . **Mechanics of Offshore Pipelines**. Slovenia: Elsevier, 2007. Cap. 3, p.59-88.
- 17 International Institute of Welding (IIW): **Technical Report**, 1967, IIW doc. IX-535-67.
- 18 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.
- 19 LANCASTER, J. The metallurgical effects of fusion welding. Chapter 2, p.56-113. In: _____; **Handbook of Structural Welding, Processes, materials and methods used in the welding of major structures, pipelines and process plants**. Abington, Cambridge(UK): Noyes Data Corporation/Noyes Publications, 1997.
- 20 GALLI, A.; **Especificação de matéria prima API-EMP 31**. Aquisição de bobinas de aço carbono pela PÉRSICO PIZZAMIGLIO, 2004.
- 21 MORAIS, W.A. et. al.; **Análise da variação das propriedades mecânicas durante a conformação de tubos de pequenos diâmetros visando desempenho de projeto**, 61^o Congresso Anual da ABM, Rio de Janeiro, Jul., 2006.