

TUBOS COM AÇO TiB PARA APLICAÇÃO EM REVESTIMENTO DE POÇOS DE PETRÓLEO¹

Fábio Arroyo Moreira²
Ronaldo Silva²
Ricardo Gomes³
Marcelo Carlos Fritz⁴
Luís Chad⁵

Resumo

A utilização de tubos para aplicação OCTG (Oil Country Tubular Goods) aumentará com a descoberta de novos poços de petróleo em águas ultra profundas. Este estudo visa avaliar a desempenho mecânico e microestrutural de tubos soldados e tratados termicamente por têmpera e revenimento utilizando um projeto de aço ligado ao titânio/boro para aplicação em revestimento de poços de petróleo. O objetivo deste trabalho é apresentar um conjunto de técnicas utilizadas na fabricação de Tubos ERW tratados termicamente e ligados ao Boro, discutindo os aspectos mecânicos e metalúrgicos do projeto do aço, conformação, tratamento térmico e procedimentos de ensaios, onde uma boa resistência mecânica obtida através de um rigoroso controle de processo, focado na uniformidade das propriedades mecânicas e das tolerâncias dimensionais. Através dos ensaios mecânicos e químicos realizados foi possível observar que tanto o processo de tratamento térmico quanto o projeto de liga titânio/boro utilizado para a fabricação dos tubos mostraram-se eficazes. Os resultados obtidos se encontram dentro dos limites estabelecidos pela norma API 5CT. Verificou-se que os tubos obtiveram boa geometria e uniformidade de propriedades mecânicas, mostrando que este produto pode ser aplicado com segurança e confiabilidade como revestimento de poços de petróleo.

Palavras-chave: Tubos; Titânio-Boro; Tratamento térmico; ERW.

TiB STEEL PIPES FOR CASING WELLS APPLICATION

Abstract

The utilization of OCTG (Oil Country Tubular Goods) pipes will increase with the discovery of new oil wells in ultra deep waters. This study aims to evaluate the mechanical and microstructural performance of welded and heat treated pipes through quenching and tempering using a steel project based in titanium/boron for casing pipes. The objective of this development is to present a set of techniques used during the manufacturing of heated treated ERW pipes boron allowing, discussing mechanical and metallurgical aspects of the steel project, coil conformation, heat treatment and test procedures. The results are within the limits set by the API 5CT standard. It was found that the pipes obtained good geometry and uniformity of mechanical properties, showing that this product can be applied safely and reliability as wells' casing.

Key words: Pipes; titanium-boron; Heat treatment; ERW.

¹ *Contribuição técnica ao 63º Congresso Anual da ABM – Internacional, 28 a 31 de julho de 2008, Santos – SP, Brasil.*

² *Engenheiro de Produto – TenarisConfab.*

³ *Engenheiro de Processos – TenarisConfab*

⁴ *Gerente do Departamento de Engenharia do Produto – TenarisConfab*

⁵ *Coordenador da Engenharia do Produto – TenarisConfab.*

1 INTRODUÇÃO

Com a descoberta de poços de petróleo e gás em águas ultra-profundas a boa uniformidade da resistência mecânica de produtos tubulares é de grande importância técnica e econômica; para evitar a falha do equipamento durante utilização o que pode implicar em grandes perdas econômicas para a operadora do poço podendo causar acidentes ambientais catastróficos. Para isso, a indústria petroleira tem aumentado a demanda de produtos *casing* com ótimas uniformidades mecânicas.

Para uma produção confiável de tubos soldados por resistência elétrica, um rigoroso procedimento para controle de processo deve ser estabelecido. Onde

Este trabalho visa apresentar e discutir os aspectos mecânicos e metalúrgicos desde o projeto do aço, conformação, tratamento térmico e procedimentos de ensaios dos tubos.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 Projeto do Aço

O projeto do aço visou a obtenção de uma microestrutura ferrita-perlita na tira laminada a quente, objetivando baixos níveis de segregação e inclusão não metálica. Para o desenho do aço, procurou-se equilibrar temperabilidade com a quantidade de carbono equivalente durante a produção do aço evitando assim fragilização na linha de solda.

O aço teve que apresentar baixos níveis de C e P para adequar-se à formulação de aços B-Ti. O aço foi desoxidado através da adição de Al e Si. Durante o refino secundário, foi realizada a adição dos ferros-liga e os tratamentos de dessulfuração e globulização das inclusões para obtenção da composição química visada e com elevado nível de limpidez interna. O tratamento de globulização das inclusões foi realizado com adição de Ca-Si. Um tamanho de grão mais fino que ASTM n° 5 foi objetivado. A morfologia globularizada das inclusões é desejável para se obter um melhor desempenho nos ensaios na linha de solda e nos testes de ductilidade e tenacidade requeridos. A composição química final obtida é mostrada na Tabela 1.

Tabela 1. Composição química obtida na análise de produto (% em peso).

C	Mn	Si	P	S	Ti	N	B	Ceq ⁽¹⁾
0.29	1.40	0.25	0.020	0.005	0.040	0.0090	0.0035	0.53
máx.	máx.	máx.	máx.	máx.	máx.	máx.	máx.	máx.

Nota: (1) cálculo do Ceq conforme equação 1 abaixo: (API 5L, 2004)⁽¹⁾

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

Durante a laminação de acabamento o controle da espessura foi realizado automaticamente para minimizar a dispersão dos valores de espessura ao longo do comprimento da tira e para garantir propriedades mecânicas uniformes após o tratamento térmico do tubo.

A composição química proposta, baseada no desenho B-Ti, tem como objetivo a obtenção de uma microestrutura predominantemente martensítica após a realização da têmpera no tubo. Para atingir este objetivo é necessário garantir a segregação do

Boro livre nos contornos de grãos austeníticos, retardando a nucleação da ferrita e favorecendo a formação da martensita, garantindo assim a efetividade da têmpera. Devido a grande afinidade do Boro em combinar com o oxigênio e nitrogênio, a proteção do Boro contra a oxidação e precipitação na forma de nitretos e carboboretos é de grande importância, assim é fundamental a presença de Boro livre para segregar nos contornos de grão.⁽²⁻⁴⁾ As práticas de aciaria e as quantidades adicionadas de Boro são fundamentais para maximizar o efeito do Boro. No desenho da composição química objetiva-se uma relação $Ti/N > 3,5$ e $Al/N > 4,0$ a fim de garantir efetividade do Boro.⁽²⁻⁸⁾

Para otimizar a segregação do Boro é necessário também um controle da temperatura de austenitização durante o tratamento térmico do tubo, para que o efeito seja maximizado.

2.2 Fabricação do Tubo

Os tubos soldados por resistência elétrica desenvolvidos pela TenarisConfab passam por um rigoroso controle de processo tanto na planta de formação e soldagem dos tubos como na planta de tratamento térmico. Para garantir a confiabilidade exigida pelo produto é feito um controle da espessura do tubo ao longo do comprimento (garantindo assim a relação D/t), o limite de escoamento, ovalização, empeno, tensões residuais e imperfeições localizadas no corpo do tubo. A Figura 1 apresenta o fluxograma do processo de fabricação dos tubos.



Figura 1. Fluxograma de fabricação de soldados por resistência elétrica e tratados térmicamente na planta da TenarisConfab

A Figura 2 mostra de forma esquemática a linha de fabricação de tubos ERW da TenarisConfab.

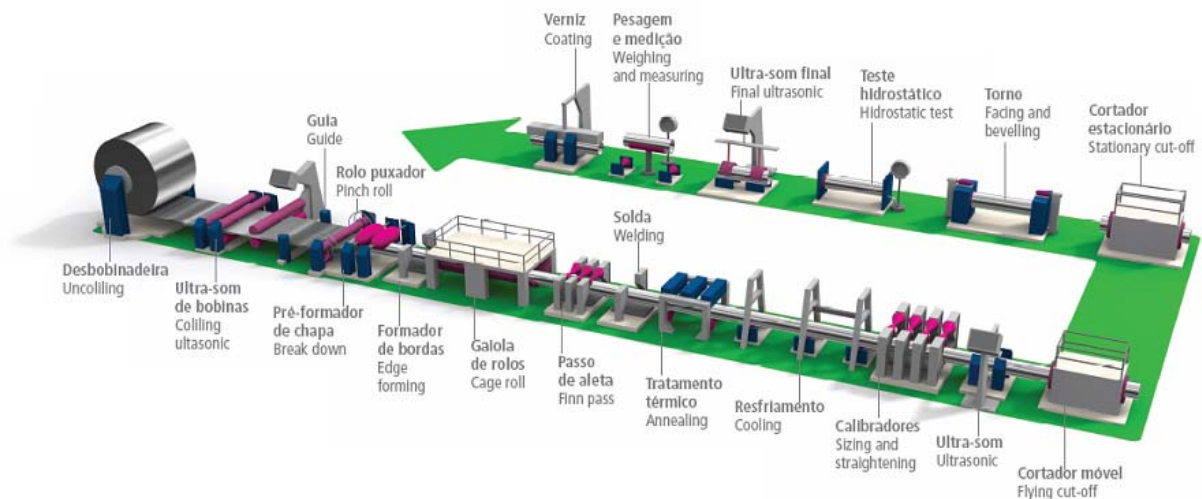


Figura 2. Desenho esquemático da linha de fabricação de tubos ERW.

As bobinas são manuseadas e estocadas de forma que não sejam causados defeitos superficiais. Antes do processamento das bobinas são retiradas amostras para ensaios de inspeção de recebimento, com o objetivo de checar se as propriedades mecânicas e a composição química, das corridas fornecidas pela usina, estão em conformidade com o especificado.

As bobinas depois de colocadas na desbobinadeira são centralizadas, tracionadas e endireitadas através de um conjunto de rolos. As bobinas são inspecionadas por ultra-som (US) para detecção de dupla laminação no corpo e borda.

As bordas da bobina são então cortadas através de tesouras circulares que livram a superfície de rebarbas e auxiliam na garantia da qualidade da região soldada, já que eliminam boa parte da oxidação. A largura objetivada depende do diâmetro e espessura do tubo.

O início da formação dos tubos é realizado através de um conjunto de rolos côncavos e convexos. Depois dessa operação o raio do tubo é estampado na borda da bobina através do pré-formador de bordas. Gradualmente, a bobina é então conformada a frio através de um conjunto de rolos, com o objetivo de reduzir o raio uniformemente até os rolos do *fin-pass*, que realizam a parte final da conformação preparando a bobina para a soldagem.

No *fin-pass* as bordas das bobinas são guiadas e isoladas por rolos guias até que alcancem a placa de solda. Através do processo ERW-HFC (*electric resistance welding – high frequency contact*) é realizada a soldagem das bordas na placa de solda.

O *heat-input*, a velocidade e a taxa de redução da solda utilizados garantem uma boa limpidez na linha de fusão, através da expulsão do metal fundido e das inclusões de óxidos formados durante a soldagem. A Figura 3 ilustra o processo de soldagem ERW-HFC.

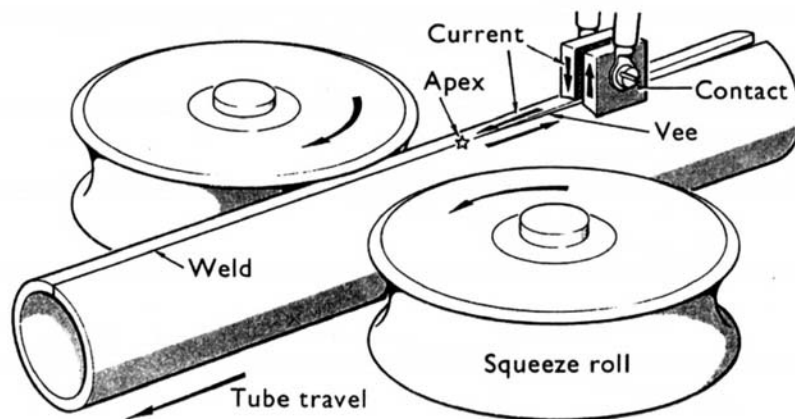


Figura 3. Soldagem de tubos através do processo ERW-HFC

O material excedente, originado durante a fusão e compressão das bordas durante a soldagem, é removido interna e externamente através de raspadores.

O tratamento térmico de normalização da região da solda é realizado a aproximadamente 900°C logo após a soldagem e com a mesma velocidade da linha de produção. A temperatura da região tratada termicamente é continuamente medida e gravada através de pirômetro óptico. O resfriamento é feito ao ar até aproximadamente 500°C e depois através de água até a temperatura ambiente.

Após o resfriamento, os tubos passam pelo SS (*Sizing and Straightening*), onde os tubos são calibrados a frio para a obtenção do diâmetro, ovalização e empeno especificados.

Após a calibração, os tubos passam pela inspeção por ultra-som para controle de processo objetivando a detecção de defeitos na região da solda e depois os tubos são cortados em comprimentos individuais. Amostras para amassamento são retiradas e também amostras para ensaios mecânicos especificados. Depois do biselamento é realizada a inspeção visual da extremidade e do corpo dos tubos.

Os tubos são então testados hidrostaticamente e inspecionados por ultra-som final para detecção de defeitos na região da solda. A inspeção é realizada sistematicamente para controlar a qualidade do cordão de solda e é realizada por inspetores qualificados. Os tubos aprovados passam pela inspeção visual final, marcação e depois são liberados para o pátio.

Para o tratamento térmico de têmpera e revenimento dos tubos, os mesmos são separados por corrida de aço, na planta de tratamento térmico da TenarisConfab. Um desenho esquemático da planta é apresentado na Figura 4.

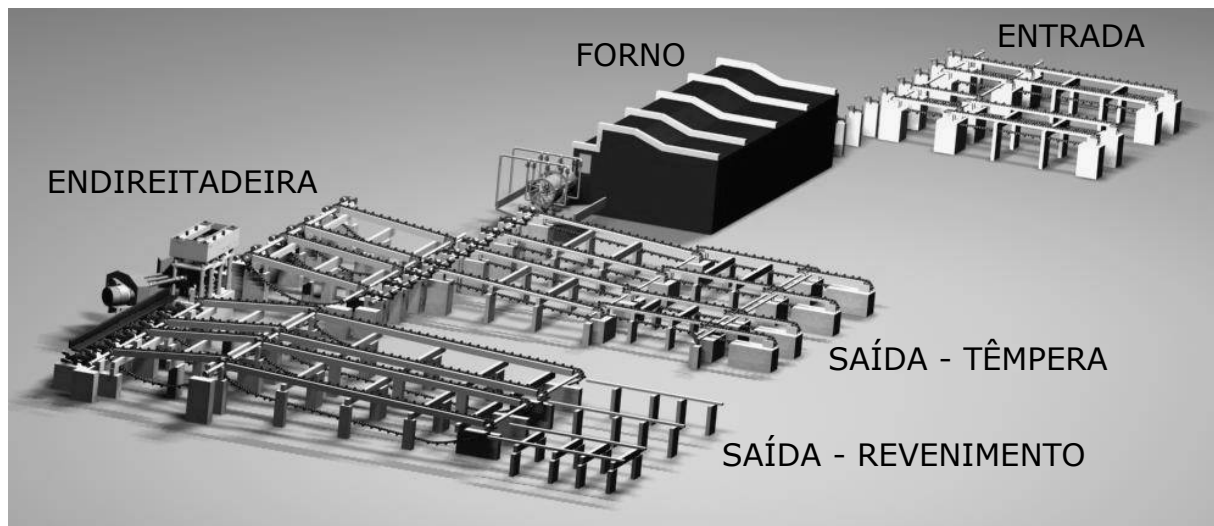


Figura 4. Desenho esquemático da planta de tratamento térmico

Antes de ingressarem no forno, todos os tubos são visualmente inspecionados para assegurar que estes estão livres de defeitos ou danos, e que estejam desempenados.

Para completar o ciclo de têmpera e revenimento, os tubos passam duas vezes pela planta de tratamento térmico. Na têmpera, os tubos entram no forno onde é feita a austenitização, passam pelo descamador e em seguida pelos cabeçotes de têmpera, saindo a temperaturas inferiores a 70°C. Todo o processo é automatizado e controlado conforme os parâmetros estabelecidos nas especificações de processo especial.

O revenimento é realizado com tempo, temperatura e velocidade controlados, de forma individual para cada tipo de produto objetivado. A temperatura pode variar de 400°C à 700°C de acordo com propriedades mecânicas finais desejadas do tubo.

O endireitamento é realizado através de um equipamento com 3 pares de rolos com capacidade de variação de ângulos e aperto. A temperatura de endireitamento também é controlada com o objetivo de reduzir as tensões residuais nos tubos. Os parâmetros utilizados no processo também são específicos para cada produto.

Após tratamento térmico, os tubos são novamente testados hidrostaticamente conforme API 5CT ⁽⁹⁾ e depois inspecionados pelo FLUT (*full length ultrasonic test*). O FLUT é um equipamento de ultra-som de corpo automático capaz de realizar a inspeção para detecção de defeitos longitudinais, transversais, medição de espessura e dupla laminação.

Após aprovação no FLUT, os tubos estão prontos para liberação como ponta lisa ou seguirem para o processo de roscamento.

2.3 Procedimentos Experimentais

Foram realizados ensaios mecânicos e químicos conforme a API 5CT para a aprovação dos produtos. Os testes químicos e mecânicos foram realizados nos laboratórios da TenarisConfab em Pindamonhangaba, SP. Dentre os ensaios mecânicos foram realizados testes de dureza, tração, charpy, análise metalográfica e para complementar foram realizadas análises da composição química do material antes de sofrer tratamento térmico e após tratamento.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Temperabilidade

A dureza foi medida por corrida (composição química) para obter a dureza (temperabilidade) mínima exigida pela API 5CT,⁽⁹⁾ conforme equação 2. O resultado mínimo exigido é de 34 HRC (50% de martensita).

$$\text{HRC}_{\min} = ((\%C) \times 52) + 21 \quad (2)$$

Foram retiradas amostras ao longo de todo diâmetro do tubo, ou seja, de cada ponta de tubo foram retiradas quatro amostras, e foram medidos os pontos de dureza em cada quadrante, como mostrado na Figura 6.

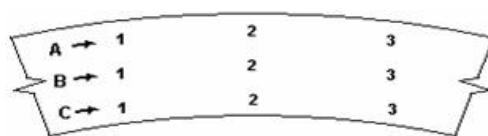


Figura 6. Esquema de identificação das perfurações de dureza no quadrante.

Os resultados apresentados na Tabela 2 indicam uma têmpera homogênea e uma transformação martensítica de 90%, o valor mínimo requerido pela API 5CT é de 50%. Esses resultados são obtidos através de um desenho de composição química otimizada e do ajuste dos cabeçotes de têmpera que atuam tangencialmente ao corpo do tubo, garantindo uma maior taxa de resfriamento. A composição baseada em um desenho B-Ti têm-se mostrado muito efetiva para a obtenção de uma microestrutura predominantemente martensítica.

Tabela 2. Resultados de temperabilidade dos tubos de 9.5/8" x 0,472" utilizando B-Ti.

LOCAL	LINHA "A"				LINHA "B"				LINHA "C"			
	1	2	3	MÉD	1	2	3	MÉD	1	2	3	MÉD
P1	46,0	45,0	46,0	45,7	47,0	47,0	47,0	47,0	47,0	45,0	46,0	46,0
	45,0	45,0	46,0	45,3	46,0	42,0	46,0	44,7	46,0	46,0	44,0	45,3
	47,0	47,0	47,0	47,0	48,0	48,0	48,0	48,0	45,0	48,0	47,0	46,7
	46,0	46,0	47,0	46,3	46,0	48,0	47,0	47,0	46,0	46,0	47,0	46,3
P2	46,0	43,0	46,0	45,0	46,0	46,0	46,0	46,0	46,0	46,0	46,0	46,0
	45,0	46,0	47,0	46,0	46,0	46,0	47,0	46,3	45,0	46,0	47,0	46,0
	45,0	47,0	45,0	45,7	46,0	45,0	47,0	46,0	45,0	46,0	45,0	45,3
	43,0	44,0	42,0	43,0	46,0	46,0	47,0	46,3	46,0	46,0	48,0	46,7

3.2 Resultados após Revenimento

Foram realizados ensaios de tração, de impacto Charpy, de dureza, e análise metalográfica.

Tabela 3. Resultados do ensaio de impacto Charpy dos tubos de 9.5/8" x 0,472" utilizando B-Ti.

Amostra	METAL DE BASE (J)				SOLDA (J)				% FD - METAL DE BASE			
	1	2	3	MED	1	2	3	MED	1	2	3	MED
1	80	78	74	77	48	46	76	57	100	100	100	100
2	62	72	70	68	56	68	54	59	65	63	63	64
3	72	76	76	74	64	59	70	64	60	63	71	65

Tabela 4. Resultados do ensaio de tração de tubos de 9.5/8" x 0,472" utilizando B-Ti.

Amostra	LE (Mpa)	LR (Mpa)	LE/LR	AI (%)
1	899	994	0,90	27,2
2	828	925	0,90	26,4
3	868	962	0,90	27,6
4	861	963	0,89	27,4
5	815	914	0,89	23,6
6	867	962	0,90	27,2
7	890	978	0,91	24,8
8	852	945	0,90	24,0
9	848	937	0,90	28,7

Tabela 5. Resultados do ensaio de dureza de tubos de 9.5/8" x 0,472" utilizando B-Ti.

LINHA "A"				LINHA "B"				LINHA "C"			
1	2	3	MÉD	1	2	3	MÉD	1	2	3	MÉD
28	28,0	29	28,3	29	28	30	29,7	29	28	29	28,7
30	32,0	31	30,0	31	32	32	31,7	31	31	33	31,7
29	31	30	30,0	31	32	31	31,7	30	31	32	31,0

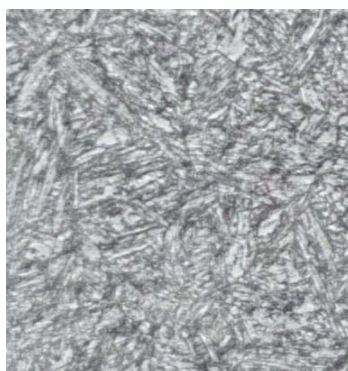
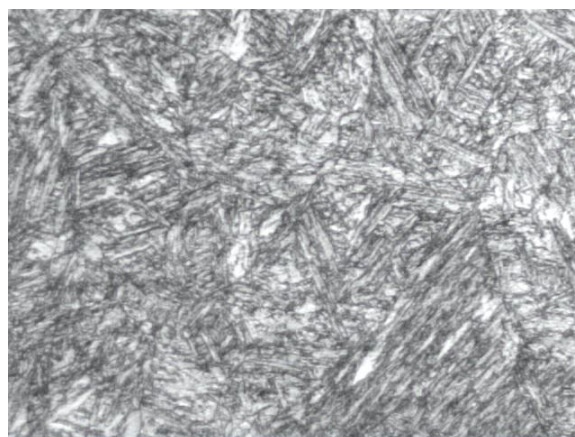


Figura 7. Micrografia com aumento de 500x. As micrografias foram tiradas do meio da parede do tubo, e mostram a presença de uma estrutura

com martensita revenida (tubo revenido), indicando a eficiência do tratamento térmico realizado.



5 CONCLUSÃO

Os tubos casing fabricados pela TenarisConfab para aplicações que necessitam de uniformidade de resistências mecânicas apresentaram valores acima dos especificados pela API 5CT.

O desenho do produto utilizando material B-Ti e um procedimento para controle de processo desenvolvido especificamente para este caso, mostrou-se eficaz, pois os resultados de temperabilidade, testes mecânicos, micrografia, controles dimensionais e geométricos dos tubos atingiram o especificado, resultando em valores de resistência mecânica superiores aos requisitos especificados.

REFERÊNCIAS

- 1 Specification for Line Pipe – API Specification 5L. Forty-Third Edition, march, 2004. Effective Date: October 4, 2004.
- 2 Y. Shen, K. A. Taylor – Boron Hardenability Effects in 0.2 Percent Carbon steels, 40th MWSP, ISS, 1998.
- 3 B. M. Kapadia, “Prediction of the Boron Hardenability Effect in Steel – A comprehensive Review”, Hardenability Concepts with Applications to Steel, D. V. Doane and J. S. Kirdaldy, eds., AIME-TMS, Warreandale, PA, 1978, pp. 448-482.
- 4 J.E Morral and T. B. Cameron, “Boron Hardenability Mechanisms”, Boron in Steel, S.K Banerji and J.E Morral, eds. AIME-TMS, Warrendale, PA. 1980, pp 19-32.
- 5 S. K. Banerji and J E. Morral, eds., Boron in Steel, AIME-TMS, Warrendable, PA, 1980.
- 6 T. M Williams, A. M. P. Seah. “Segregation to Interfaces”, Int. Metals Rev., vol. 222, 1977. pp 262-301.
- 7 F.Nakasato and M. Takahashi, “Effects of Boron, Titanium and Nitrogen on the Hardenability of Boron-Treated Steels for Heavy Machinery, “Metals Technology vol. 6, 1979, pp 102-105.
- 8 K. A Taylor, “Grain-Boundary Segregation and Pricipitation of Boron in 0.2 Percent Carbon Steels”, Metall. Transf., vol 23A, 1992, pp 107-119.
- 9 API 5CT 2005, ISO 11960:2004, Petroleum and natural gas industries - Steel pipes for use as casing or tubing for wells.