

DESENVOLVIMENTO E CARACTERIZAÇÃO DE TUBOS ALTO COLAPSO TRATADOS TERMICAMENTE LIGADOS AO BORO PARA APLICAÇÃO EM POÇOS DE PETRÓLEO¹

Ronaldo Cristiano da Silva²
Luís Cláudio Campos Chad³
Marcelo Carlos Fritz⁴

Resumo

A resistência ao colapso de um tubo está relacionada à sua capacidade de resistir à deformação quando submetido à pressão externa. A exploração de petróleo e gás em poços profundos tem exigido a aplicação de tubos com alta resistência ao colapso. O objetivo deste trabalho é apresentar um conjunto de técnicas utilizadas na fabricação de Tubos Alto Colapso tratados termicamente e ligados ao Boro, discutindo os aspectos mecânicos e metalúrgicos do projeto do aço, conformação, tratamento térmico e procedimentos de ensaios, onde a resistência ao colapso é obtida através de um rigoroso controle de processo, focado na uniformidade das propriedades mecânicas e as tolerâncias dimensionais. Os tubos fabricados pela TenarisConfab, através do processo de soldagem ERW e posterior tratamento térmico, obtiveram resultados excelentes devido a sua geometria e uniformidade de propriedades mecânicas, superando muito os limites exigidos pela *American Petroleum Institute*, podendo assim serem utilizados em poços profundos submetidos à elevadas pressões externas.

Palavras-chave: Tubos; Alta colapso; Tratamento térmico; ERW.

DEVELOPMENT AND CHARACTERIZATION OF HIGH COLLAPSE BORON ALLOYED HEAT TREATED PIPES FOR OIL WELLS

Abstract

The pipe collapse resistance is related to its capacity to resist to the deformation when submitted to external pressure. The exploration of oil and gas in deep wells has demanded the application of pipes with high collapse resistance. The objective of this paper is to present a set of techniques used in the manufacturing of heat treated High Collapse Boron alloyed pipes and discuss the mechanical and metallurgical aspects of the steel design, conformation, heat treatment and tests procedures, in such a way that the collapse resistance is achieved through a rigorous process control, focused in mechanical properties uniformity and dimensional tolerances. The pipes manufactured by TenarisConfab, through the ERW welding process plus heat treatment, had achieved excellent results due to its geometry and uniformity of mechanical properties, surpassing the limits demanded by *American Petroleum Institute*, thus being able to be applied in deep wells submitted to high external pressures.

Key words: Pipes; High collapse; Heat treatment; ERW.

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

² Engenheiro de Produto – TenarisConfab.

³ Coordenador da Engenharia do Produto – TenarisConfab.

⁴ Gerente do Departamento de Engenharia do Produto – TenarisConfab

1 INTRODUÇÃO

Em muitas aplicações no segmento de Óleo & Gás a resistência de produtos tubulares à pressão de colapso externa é de grande importância técnica e econômica; por exemplo, a falha por colapso de um tubo casing dentro de um poço de petróleo geralmente implica em grandes perdas econômicas para a operadora do poço de petróleo e pode causar acidentes ambientais sérios. Neste sentido, a indústria petrolífera tem aumentado a demanda de produtos *casing* alto colapso, cujo desempenho superior ao especificado nas normas API é garantido pelos fabricantes. Para uma produção confiável de tubos Alto Colapso, um rigoroso procedimento para controle de processo deve ser estabelecido. O procedimento é baseado num conhecimento detalhado de uma série de fatores efetivos que podem aumentar ou diminuir a resistência ao colapso de produtos tubulares, por exemplo, a geometria do tubo, a variação da espessura, as tensões residuais circunferenciais, etc.

Em 1963, o *American Petroleum Institute (API)* iniciou um processo de relacionar e padronizar a pressão de resistência ao colapso de tubos casing API através de quatro equações empíricas.⁽¹⁾ Essas equações foram adotadas e incluídas na API Bulletin 5C3 nos anos 60.

Por *design*, as relações de colapso estabelecidas pela API são conservadoras. O Colapso Elástico de tubos depende somente da relação Diâmetro/Espessura (D/t), teoricamente derivado da estabilidade elástica com a adição de coeficientes modificados estatisticamente.⁽²⁻⁴⁾

A equação que determina o Colapso Plástico descreve o comportamento acima do Colapso Elástico. Por sua vez, o colapso plástico descreve o comportamento através da relação D/t e do limite de escoamento do material. Nenhum outro parâmetro, como ovalização e excentricidade, são levados em consideração, embora sejam demonstradas a influência destes na resistência ao colapso.

Processos modernos de fabricação de tubos podem produzir tubos casing com uma resistência mínima ao colapso acima dos valores estipulados pela API. O foco deve ser na real capacidade de determinado produto, e como desenhar e controlar os requisitos mínimos de propriedades mecânicas e dimensionais através do processo de fabricação do tubo, com o objetivo de garantir a confiabilidade do produto.⁽²⁻⁴⁾

Existem muitos fatores que possuem grau de influência na pressão externa que produz o colapso dos tubos, dentre esses:⁽⁵⁻¹¹⁾

- A relação (diâmetro externo/espessura - relação D/t);
- O limite de escoamento do tubo;
- O encruamento do tubo;
- A geometria do tubo (excentricidade, ovalização e variação da espessura);
- Tensão residual circunferencial no tubo;
- Imperfeições localizadas no corpo do tubo.

Para os fabricantes dos tubos é muito importante quantificar o efeito das variáveis acima quando do estabelecimento das especificações para esses produtos e quando do desenho dos processos para cumprir com essas especificações. Enquanto existe um consenso sobre o efeito da relação D/t e do LE na pressão de colapso, como expressado, por exemplo, nas equações da API (Bull. 5C3, 1994), o efeito de outros fatores ainda estão em estudo por outros pesquisadores.⁽¹²⁾

Com o objetivo de garantir confiabilidade aos produtos Alto Colapso fabricados através do processo ERW-HFC e posterior tratamento térmico de Têmpera e Revenimento, a TenarisConfab desenvolveu um desenho de tubo (matéria-prima e processo de fabricação dos tubos) que garantem valores de resistência à pressões

externas superiores aos limites demandados pelos clientes para este tipo de produto.

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 visa a obtenção de uma microestrutura ferrita-perlita na bobina laminada a quente, combinada a baixos níveis de segregação e inclusões não-metálicas. Apesar de ser um aço destinado a tratamento térmico de têmpera e revenimento, o desenho da composição química exibe valores relativamente baixos de carbono equivalente, possibilitando boa soldabilidade durante a fabricação do tubo.

O aço deve apresentar baixos níveis de C e P adequados à formulação de aços B-Ti. O aço deve ser desoxidado através da adição de Al e Si. Durante o refino secundário, deve ser 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 deve ser realizado com adição de Ca-Si. A morfologia globularizada das inclusões é desejável para se obter um melhor desempenho nos ensaios da solda ERW e nos testes de ductilidade e tenacidade requeridos para o tubo. 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 máx.	1.40 máx.	0.30 máx.	0.020 máx.	0.008 máx.	0.040 máx.	0.0090 máx.	0.0035 máx.	0.52 máx.

Nota: (1) cálculo do Ceq conforme equação 1 abaixo: (API 5L, 2004) ⁽¹³⁾

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

Durante a laminação de acabamento o controle da espessura deve ser realizado automaticamente, minimizando a dispersão dos valores de espessura ao longo do comprimento da tira.

A composição química proposta, baseada no desenho B-Ti, tem como objetivo a obtenção de uma microestrutura predominantemente martensítica. 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, pois é fundamental a presença de Boro livre para segregar nos contornos de grão. 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 $Ti/N > 3,5$ a fim de garantir efetividade do Boro.

Para otimizar a segregação do Boro é necessário também um controle da temperatura de austenitização durante o tratamento térmico do tubo, pois o efeito do Boro pode ser maximizado ou bastante diminuído em função desta temperatura.

2.2 Fabricação do Tubo

Os tubos Alto Colapso desenvolvidos pela TenarisConfab passam por um rigoroso controle de processo tanto na planta ERW como na planta de Tratamento Térmico. Para garantir a confiabilidade exigida pelo produto são controlados a 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.

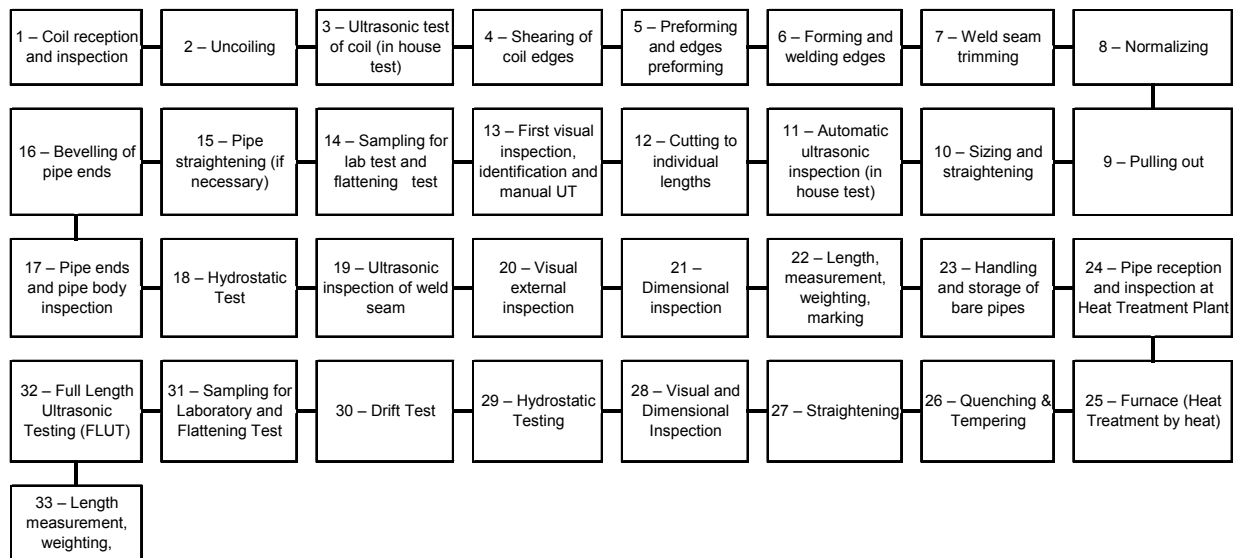


Figura 1. Fluxograma de fabricação de tubos Alto Colapso na planta da TenarisConfab

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

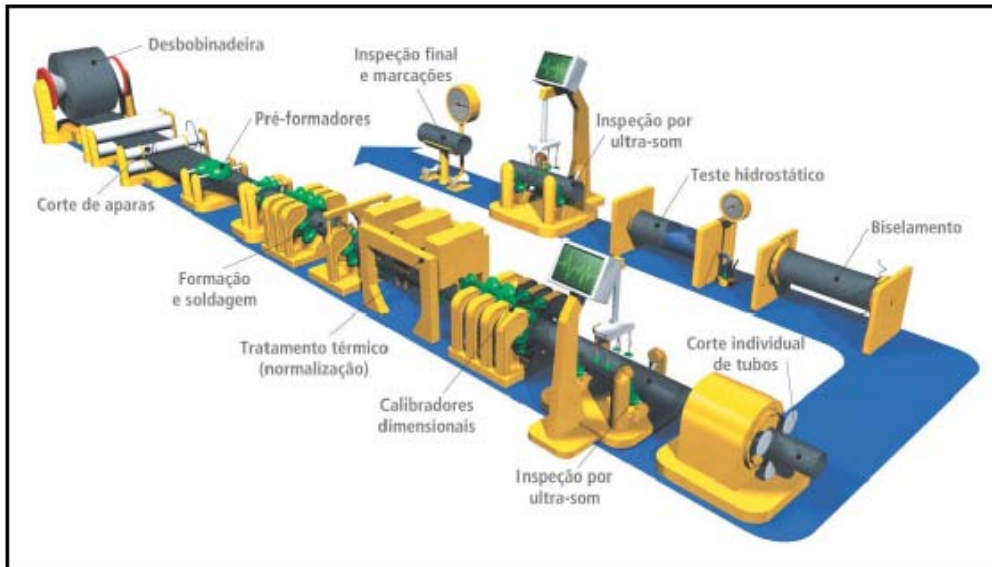


Figura 2. Desenho esquemático da linha de fabricação de tubos ERW.

As bobinas são manuseadas e estocadas de forma que não sejam causados defeitos superficiais. Antes do processamento são feitas amostragens 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. 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 realizado a soldagem das bordas na placa de solda.

O *heat-input*, a velocidade e a taxa de redução da solda (“recalque”) 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.

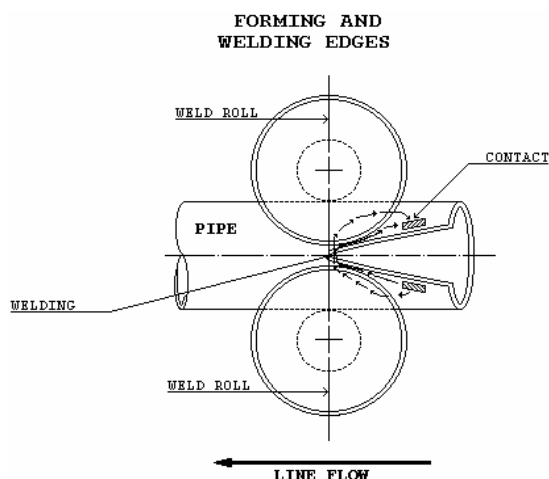


Figura 3. Soldagem de tubos através do processo ERW-HFC

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 pelo US de processo para detecção de defeitos na região da solda e depois são cortados individualmente. São também realizados ensaios de amassamento e são retiradas amostras dos tubos para testes mecânicos. Depois do biselamento é realizada a inspeção da extremidade e do corpo dos tubos.

Os tubos são então testados hidrosticamente e inspecionados pelo US 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 e marcação, e depois são liberados para o pátio.

Os tubos são temperados e revenidos, separados por corrida de aço, na planta de tratamento térmico da TenarisConfab. Um desenho esquemático da planta é apresentado na Figura 4.

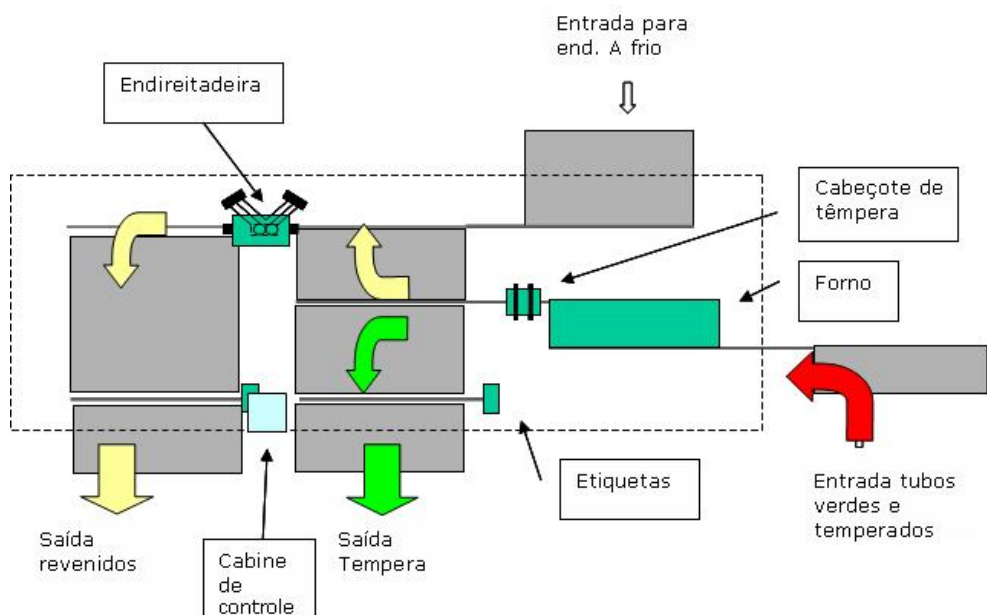


Figura 4. Desenho esquemático da planta de tratamento térmico

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

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.

O endireitamento é realizado através de um equipamento com 3 pares de rolos com capacidade de variação de ângulos, *bending*, 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 ⁽¹⁴⁾ 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

Os testes de colapso foram realizados no CINI (Centro de Investigación Industrial – Tenaris). Na Figura 5 é descrito o equipamento de teste de pressão de colapso.

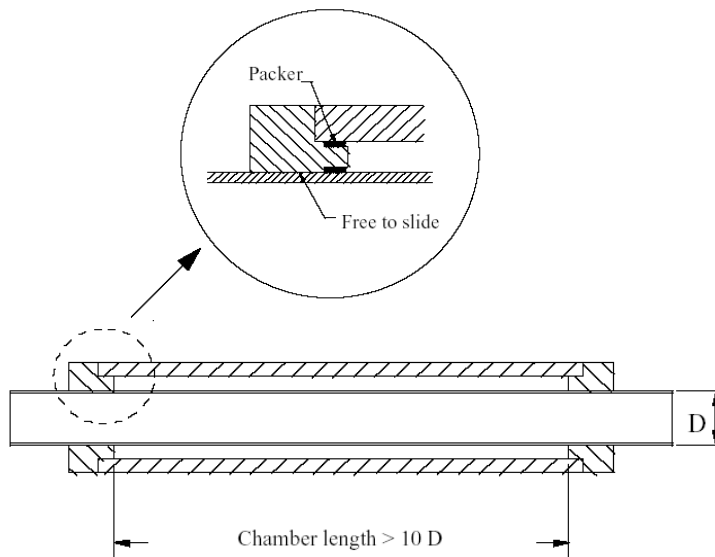


Figura 5. Câmara de Colapso do CINI-Tenaris

É importante destacar que o set-up experimental não impõe nenhuma restrição axial nos tubos; para todos os casos as amostras sempre possuem relação $L/D > 10$; o colapso das amostras é detectado por uma queda na pressão da água utilizada para pressurizar externamente as amostras.

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, conforme equação 2.

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

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.

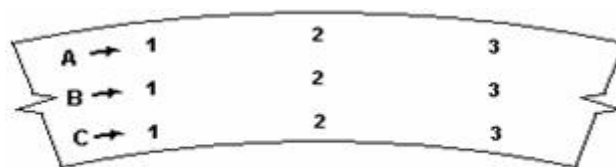


Figura 6. Esquema de identificação das perfurações de dureza no quadrante.

Os resultados apresentados na Tabela 2 indicam uma têmpera homogênea e uma transformação martensítica acima de 90%. 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. O resultado mínimo exigido é de 34 HRC (50% de martensita).

Local	LINHA "A"				LINHA "B"				LINHA "C"			
	1	2	3	MÉDIA	1	2	3	MÉDIA	1	2	3	MÉDIA
P1	48,8	49,3	49,6	49,2	49,0	50,2	48,4	49,2	48,5	48,6	49,2	48,8
	48,5	50,1	49,9	49,5	47,0	49,1	48,4	48,2	47,7	47,7	48,1	47,8
	49,1	49,9	49,7	49,6	47,7	48,3	47,9	48,0	48,9	48,4	48,4	48,6
	48,7	49,1	48,8	48,9	48,3	49,3	48,9	48,8	48,2	49,1	48,6	48,6
P2	48,7	47,6	47,4	47,7	47,7	48,5	46,8	47,7	47,9	46,8	47,6	47,4
	49,3	49,8	49,4	49,5	48,9	48,1	47,7	48,2	48,6	48,3	49,0	48,6
	48,6	48,9	49,1	48,9	49,0	48,4	47,4	48,3	47,9	47,1	47,6	47,5
	47,8	46,3	48,0	47,4	44,7	48,8	46,7	46,7	43,0	45,5	44,0	44,2

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	62	60	58	60	61	66	58	62	68	67	62	66
2	67	66	67	67	66	60	63	63	63	66	74	68
3	64	61	58	61	58	76	64	66	63	76	71	70

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

Amostra	Ponta do Tubo	LE (Mpa)	LR (Mpa)	LE/LR	AI (%)	Pressão Colapso (psi)
1	P1	854	960	0,89	28,1	8340
	P2	880	983	0,90	26,4	
2	P1	796	897	0,89	29,3	7980
	P2	795	899	0,88	27,0	
3	P1	839	945	0,89	28,0	7860
	P2	859	955	0,90	28,1	
4	P1	810	910	0,89	26,4	7830
	P2	830	934	0,89	28,0	
5	P1	880	976	0,90	25,8	8160
	P2	855	956	0,89	30,3	
6	P1	835	945	0,88	28,7	7720
	P2	850	954	0,89	27,8	

Tabela 5. Comparativo dos resultados de colapso dos tubos de 9.5/8" x 0,472" da TenarisConfab em relação ao especificado pela API 5C3.

Dimensional do Tubo			TenarisConfab	API 5C3
Diâmetro	Espessura	Grau	Média (psi)	Especificado (psi)
9.5/8"	0,472"	P110	7982	5300

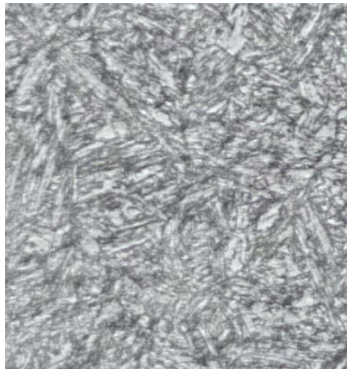
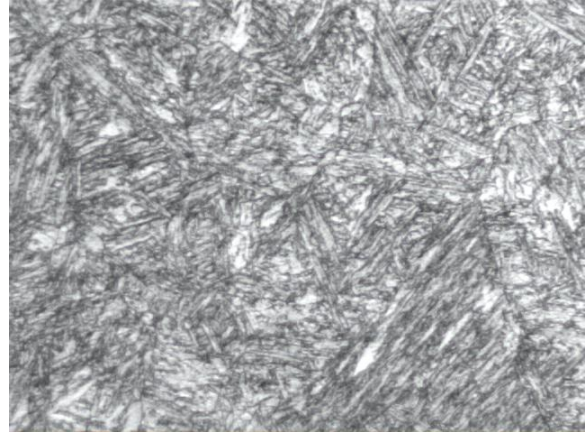


Figura 7. Micrografia com aumento de 500x. As micrografias foram tiradas do meio da parede do tubo, e mostram a presença de uma estrutura com martensita



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

5 CONCLUSÃO

Os tubos casing fabricados pela TenarisConfab para aplicações que necessitam alta resistência ao colapso apresentam resultados acima dos valores especificados pela API 5C3, podendo assim atender os mais restritos requisitos de resistência ao colapso, com confiabilidade.

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 ao colapso superiores aos requisitos especificados.

REFERÊNCIAS

- 1 Bull. 5C3, Bulletin on Formulas and Calculations for Casing, Tubing, Drill Pipe and Line Pipe Properties, sixth edition, API (1994).
- 2 Gustavo L. Turcon, Héctor Quintanilla, Andrea P. Assanelli, Rita G. Toscano and Eduardo N. Dvorkin – On DST design and production of high collapse casing, 40th MWSP CONF. PROC., 1SS, 1998
- 3 Brush D.O. and Almroth, B.O., Buckling of Bars, Plates and Shells, Mc. Graw Hill, 1975
- 4 Timoshenko S.P. and Gere J.M., Theory of Elastic Stability, Mc. Graw Hill, 1961
- 5 Assanelli, A.P., Toscano, R.G. and Dvorkin, E.N.: “Analysis of the collapse of steel tubes under external pressure”, Computational Mechanics, new trends and applications, E. Oñate and S. Idelshon, Eds., CIMNE, Barcelona, 1988.
- 6 Clinedinst, W.O.: “Analysis of collapse test data and development of new collapse formulas”, Report to the API Task Group on Performance Properties 1977.
- 7 Heise, O. and Esztergar, E.P., “Elastoplastic collapse under external pressure”, ASME, J. Eng. for Industry, 92, 735, 1970.
- 8 Tamita, Y and Shindo, A: “On the bifurcation and post bifurcation behavior of thick circular elastic-plastic pipes under lateral pressure”, Comput. Methods Appl. Mech. Eng., 35, 207, 1982.
- 9 Mimura, H., Tamano, T. and Mimaki, T.: “Finite element analysis of collapse strength of casing”, Nippon Steel Technical Report, 34, 62, 1987.
- 10 Krug, G: “Testing of casing under extreme loads”, Institut of Petroleum Engineering, Technische Universität Clausthal, 1983.

- 11 Fowler, J.R., Klementich, E.F. and Chappel, J.F.: "Analysis and testing of factors affecting collapse performance of casing", ASME, J.Energy Res. Tech., 105, 574, 1983.
- 12 Andrea P. Assanelli, Rita G. Toscano, Daniel H. Johnson and Eduardo N. Dvorkin – Experimental/Numerical analysis of the collapse behavior of steel pipes. Engineering Computations Journal, Volume 17, Issue 4, Page 459 – 486, Jun 2000.
- 13 Specification for Line Pipe – API Specification 5L. Forty-Third Edition, march, 2004. Effective Date: October 4, 2004.
- 14 API 5CT 2005, ISO 11960:2004, Petroleum and natural gas industries - Steel pipes for use as casing or tubing for wells.