

CURVAMENTO A FRIO DE TUBOS API 5L X80 DE 34" DE DIÂMETRO¹

Ronaldo Cristiano da Silva²
Fábio Moreira²
Gilmar Zacca Batista³
Eduardo Hippert Junior³
Marcelo Carlos Fritz⁴

Resumo

Um dos fatores que demanda especial atenção na construção de um duto é o processo de curvamento a frio, uma vez que cerca de 30 a 40% dos tubos passam por este processo. Este estudo buscou avaliar os parâmetros operacionais do curvamento a frio de tubos X80, de modo a viabilizar seu emprego na construção de novos dutos terrestres. Foram curvados três tubos de 34" de diâmetro e 0,750" de espessura, o curvamento foi realizado através de um equipamento hidráulico com a aplicação de golpes igualmente espaçados, onde foram registrados os ângulos correspondentes às deformações elásticas e plásticas, com o intuito de avaliar o efeito mola do tubo e foi realizada inspeção dimensional. Amostras das regiões do extradorso, intradorso, solda e parte reta do tubo foram submetidas a ensaios mecânicos e metalográficos. Foi possível obter uma curva com ângulo de 19° e raio de 27D sem apresentar nenhuma evidência de rugas, amassamento, ovalização ou qualquer outro tipo de dano mecânico. Após análise, todos os critérios estabelecidos pelas normas de projeto foram atendidos, os ensaios mecânicos realizados permitiram comparar as propriedades mecânicas do tubo original e após a deformação. Os resultados deste estudo fornecem subsídios para futuras aplicações do tubo X80 em dutos terrestres.

Palavras-chave: Curvamento a frio; API 5L X80; Tubos SAW.

COLD BENDING OF 34" API 5L X80 DIAMETER PIPES

Abstract

A key factor that demands special attention in the pipeline construction is the cold bending process, since 30 to 40% of the pipes use this process in the field. This study aimed to evaluate the X80 cold bending operational parameters, in order to make viable the use of this process in the installation of future onshore pipelines. Three 34"OD x 0,750" pipes were bended. The bending was conducted using a hydraulic equipment with application of equally spaced punches, recording the correspondent angles related to the elastic and plastic deformations in order to assess the spring-back effect and performing dimensional inspection. Samples from pipe and the weld were subjected to mechanical and metallographic tests. It was possible to obtain a 19° curve and 27D radius without presenting any evidence of wrinkles, out of roundness or any type of mechanical damage. After analysis, all criteria established from project specifications were complied, the mechanical tests performed allowed comparing pipe mechanical properties of straight and bended regions. The results of this study provide technical know how for future X80 onshore pipelines applications.

Key words: Cold Bending; API 5L X80; SAW Pipes.

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 Equipamentos – Petrobras*

⁴ *Gerente da Engenharia do Produto – TenarisConfab*

1 INTRODUÇÃO

Em função do crescente aumento do transporte de petróleo e gás sob condições severas de trabalho, as especificações dos tubos para gasodutos e oleodutos têm se tornado cada vez mais exigentes. A tendência mundial para a utilização de tubos com grandes diâmetros, maiores níveis de resistência mecânica e carbono equivalente mais baixo, visando facilitar a soldabilidade, têm sido os principais requisitos dos clientes em todo o mundo, segundo Cotta, Souza e Bott.⁽¹⁾ Acompanhando estas tendências, Hiroshi⁽²⁾ cita que o emprego de aços de alta resistência mecânica traz economia significativa ao empreendimento.

Aumentar a resistência do aço mantendo constantes o diâmetro e a pressão do duto significa evitar o uso de espessuras muito elevadas. Os benefícios vão desde a economia de aço, reduzindo o peso (e dessa forma os custos na compra dos tubos e na construção e montagem do duto), até a viabilização de projetos onde a aplicação de um aço com menor resistência resultaria em chapas com espessuras muito altas impossibilitando até mesmo a fabricação dos tubos.

Nos últimos anos está sendo verificada uma crescente procura em todo o mundo por aços API de graus mais elevados. A produção de aços API X70 tornou-se rotina nas principais usinas siderúrgicas e o grau X80 já está sendo aplicado em diversos projetos de grande porte. A demanda do mercado mundial para o grau X80 tem aumentado progressivamente e inicia atualmente no mercado nacional.

No Brasil, a fabricação de aços de alta resistência para tubos de grau X80 pelo processo UOE utiliza o processo de laminação controlada (TMCR). O desenvolvimento deste tubo é uma etapa já superada, uma vez que os tubos apresentam propriedades mecânicas, bem como os valores de Ceq e Pcm atendem aos requisitos especificados pelo "American Petroleum Institute, API 5L, 2004".⁽³⁾

Embora o desenvolvimento do X80 no Brasil tenha sido realizado com sucesso, faz-se necessário uma consolidação através sua aplicação em um projeto de duto terrestre. Para isso, é de grande importância avaliar o comportamento deste tubo nas operações de construção e montagem do duto no campo, mais especificamente nos processos de curvamento e soldagem circunferencial.

Na construção de um duto um dos fatores que demanda especial atenção é o processo de curvamento, uma vez que dependendo do perfil do terreno cerca de 30 a 40% dos tubos necessitam ser curvados. A preferência é pelo curvamento a frio, uma vez que este pode ser realizado no campo.

Este estudo buscou avaliar os parâmetros operacionais do curvamento a frio de tubos X80, de modo a viabilizar seu emprego na construção de novos dutos terrestres. Foram curvados três tubos de 34" (864 mm) de diâmetro e 0,750" (19.1 mm) de espessura. O curvamento foi realizado através de um equipamento hidráulico com a aplicação de golpes igualmente espaçados, onde foram registrados os ângulos correspondentes às deformações elásticas e plásticas (para avaliar o efeito mola do tubo) e realizada inspeção dimensional após o curvamento. Amostras das regiões do extradorso, intradorso, cordão de solda e parte reta do tubo foram submetidas a ensaios mecânicos e metalográficos. Os ensaios mecânicos realizados permitiram comparar as propriedades mecânicas do tubo original e após a deformação. Os resultados deste estudo fornecem subsídios para futuras aplicações do tubo X80 em dutos terrestres.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 Fabricação dos Tubos

Com o recebimento das chapas a serem processadas e após a realização da inspeção, as mesmas passam pelo processo de fresamento das bordas laterias, onde o chanfro para soldagem é preparado. A pré-formação das bordas facilita a formação posterior na prensa "O" e é realizada por meio de prensa hidráulica equipada com ferramentais especialmente projetados. A prensagem das chapas é realizada em duas etapas. A prensagem das chapas em "U" é feita por equipamento hidráulico constituído de um punção raiado e rolos laterais interligadas por um sistema de tesouras. A operação de prensagem é realizada colocando-se a chapa sobre a "mesa", que a apoia em suas laterais, e descendo-se o punção raiado bem no centro da chapa, formando-se assim um raio no centro da chapa, que passa a ter uma forma de "U". A prensagem em "O" é feita por prensa hidráulica composta de matrizes superiores e inferiores, com raios preestabelecidos. A matriz inferior é fixa e a superior é movida por meio de cilindros hidráulicos. O selamento é realizado através de uma máquina de solda automática e operação de soldagem contínua pelo processo GMAW.

A soldagem interna externa dos tubos é realizada por arco submerso (SAW), empregando-se a técnica tandem. Nesse sistema, cada arame é alimentado por uma fonte de potência independente, porém, todos os eletrodos atuam em uma única poça de fusão. Os cordões de solda são inspecionados interna e externamente. É realizada uma inspeção volumétrica por ultra-som e fluoroscopia para realizar o controle de processo.

A expansão a frio dos tubos é feita por um equipamento automático e tem por objetivo calibrar o tubo nas dimensões estabelecidas por norma. Após a expansão dos tubos é realizado teste hidrostático e inspeção final que inclui, ultra-som, radiografia e visual.

A Figura 1 mostra um desenho esquemático do processo de fabricação e suas etapas.

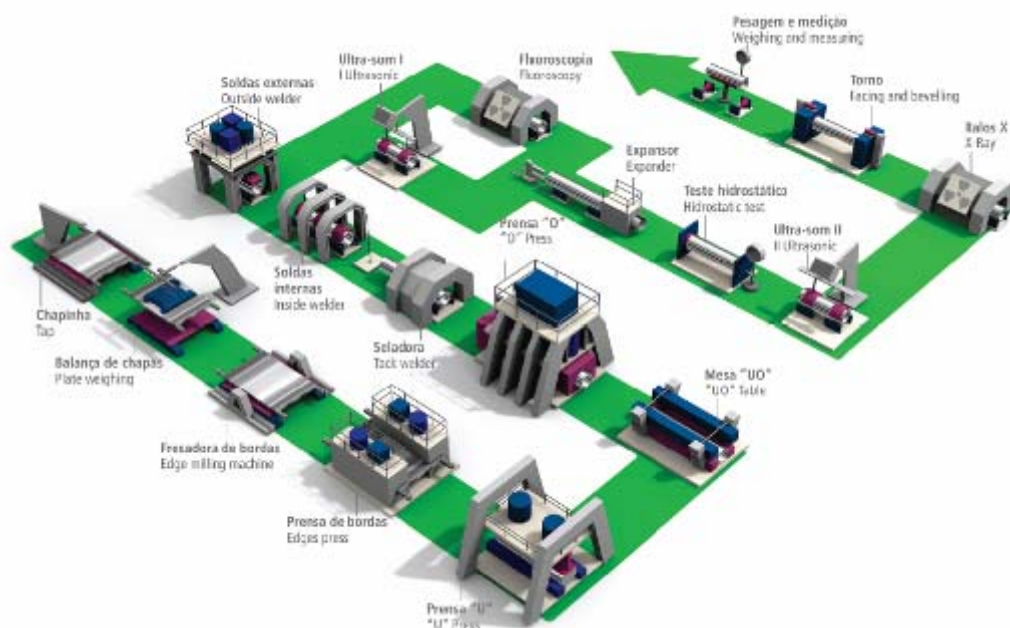


Figura 1. Fluxograma de fabricação de tubos soldados por arco submerso na TenarisConfab

Após a fabricação dos tubos, amostras para aprovação do produto foram retiradas e os resultados apresentados cumpriram plenamente com os requisitos especificados para o Projeto Mexilhão Onshore e pela API 5L.

2.2 Curvamento a Frio

Para a realização do curvamento a frio, três tubos foram enviados para a CRC-Evans Pipeline Inc. nos Estados Unidos, pois esta fábrica possui uma facilidade instalada específica (pórtico) para a realização de testes de curvamento a frio de tubos, conforme pode ser visto na Figura 2.



Figura 2. Facilidade para a realização de testes de curvamento.

2.3 Procedimentos Experimentais

Antes do curvamento a frio dos tubos, foi realizada uma inspeção visual para checar a integridade dos mesmos. Para avaliar a influência do trabalho a frio na variação de espessura do tubo, foram realizadas medições de espessura antes e após o curvamento a frio. Neste procedimento, 10 pontos em uma região a 90° da solda foram medidos, sendo o espaçamento entre cada ponto igual 10" (254 mm). Após o curvamento, novas medições de espessura foram realizadas na região intradorso e extradorso.

O curvamento foi realizado em três tubos API 5L X80 de 34" de diâmetro e 0,750" de espessura. Um equipamento Centurion, modelo PB 22-36 foi utilizado na realização dos testes (Figura 2). Em função das características construtivas e operacionais da curvadeira, o comprimento da seção de trecho reto nas extremidades do tubo que não pode ser submetida ao curvamento é de aproximadamente 17 pés (5182 mm), conforme mostra a Figura 2.

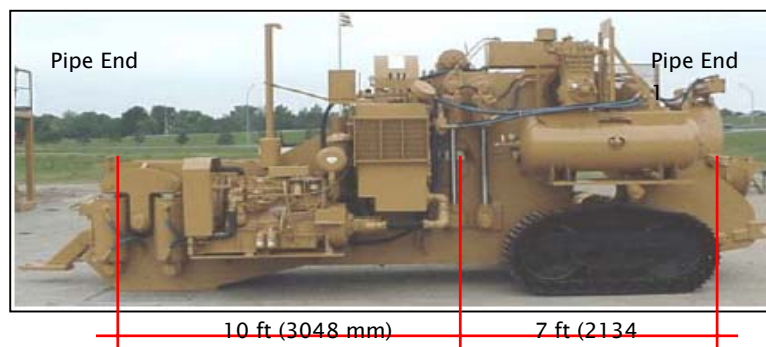


Figura 2. Esquemático do comprimento total do tubo não curvado devido a restrição do equipamento.

Os tubos foram inseridos na máquina com o cordão de solda localizado na linha neutra a 90°, conforme mostra a Figura 3. Foram feitas marcas de referência ao longo do comprimento do tubo com um espaçamento de 10" entre cada uma delas. Estas marcas foram utilizadas para controlar o avanço do tubo na máquina, objetivando homogeneizar e controlar a deformação ao longo do comprimento do tubo, a Figura 4 mostra em detalhe.



Figura 3 e 4. Cordão de solda à 90° (esquerda) e marcações feitas ao longo do tubo (direita).

Durante o curvamento foi utilizado um mandril que se expande no interior do tubo, tocando a superfície interna e evitando a ocorrência de ovalização (Figura 5). A região do equipamento onde ocorre a deformação plástica chama-se sela (Figura 6). A sela utilizada nestes testes possui um raio de curvamento de 20D e diâmetro de 34"+10mm, de forma a acomodar o revestimento no caso de tubos revestidos.



Figura 5 - Mandril empregado durante o curvamento.



Figura 6 – Sela da curvadeira, onde ocorre a deformação do tubo.

Para medir o ângulo a cada golpe foi medido e controlado o deslocamento do cilindro hidráulico (Figura 7) e foi utilizado um aparelho digital chamado TruBend (Figura 8). Este aparelho é composto por dois sensores, que ficam posicionados um em cada extremidade do tubo, e um mostrador digital que exibe para o operador o ângulo obtido com o golpe. Este aparelho apresenta um ganho de produtividade, uma vez que não é necessário interromper o curvamento para fazer as medições nas duas extremidades, como é feito com o clinômetro tradicionalmente utilizado.



Figura 7. Medição do avanço do cilindro e acompanhamento do ângulo.



Figura 8 - TruBend.

A máquina de curvamento consiste de uma estrutura rígida, um ferramental superior curvo chamado sela ou “*die*”, e um “*pin up shoe*”, conforme mostra a Figura 9. O tubo é inserido por cima do berço ou “*stiffback*” entre a sela e a estrutura de suporte até transpassar o “*pin up shoe*” na outra extremidade. Através do levantamento do “*stiffback*” com cilindros hidráulicos e fixando a outra extremidade do tubo com o “*pin up shoe*”, o tubo é curvado contra a sela. A sela e a estrutura de suporte possuem o contorno da superfície externa do tubo, assim durante o curvamento evitam-se distorções, enrugamento, achatamento ou o colapso dos tubos.

2.4 Critérios para o Curvamento dos Tubos

O procedimento para qualificação do curvamento foi baseado na norma Petrobras N-464 Rev. H,⁽⁴⁾ norma ABNT NBR 12712⁽⁵⁾ e no código de projeto ASME B31.8.⁽⁶⁾ O objetivo inicial foi obter o menor raio de curvamento definido em norma, que

representa o maior nível de deformação plástica imposta ao material do tubo. O curvamento foi realizado através da aplicação de deslocamentos verticais igualmente espaçados ao longo do comprimento dos tubos.

Os critérios estabelecidos e levados em consideração para este trabalho foram:

- A diferença entre o maior e o menor diâmetro externo medido deverá ser menor que 2,5% do diâmetro nominal;
- Amassamento e danos mecânicos não serão permitidos;
- Todos os tubos curvados deverão ser inspecionados internamente por um calibre para garantir que os requerimentos de ovalização estão dentro do especificado;
- Inspeção visual deverá ser realizada em toda a superfície do tubo para verificar a existência de possíveis danos;
- O curvamento deverá ser distribuído uniformemente;
- Em cada extremidade do tubo deverá ser deixado uma região reta;
- Não é admissível que as soldas longitudinais dos tubos sejam coincidentes com a geratriz que sofrer maior tensão de tração ou compressão, assim deverá estar localizada na região neutra com uma tolerância de + 30°.

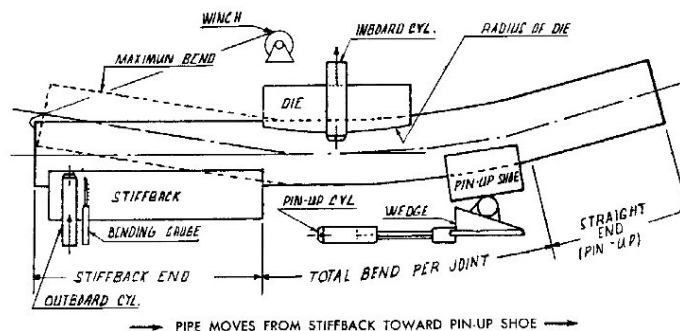


Figura 9. Desenho esquemático do processo de curvamento.

As normas ASME B31.8 e NBR-12712 determinam como raio de curvamento mínimo o valor de 30D (30 vezes o diâmetro externo do tubo). A partir deste valor, foi calculado o ângulo total previsto para a curva, conforme descrito abaixo:

$$\alpha = \frac{L \times 180}{\pi \times R} \quad \alpha = \frac{8000 \times 180}{\pi \times 25908} \quad \alpha = 17,69^\circ = 17^\circ 41'$$

Onde,

α = Ângulo máximo teórico;

L = Comprimento teórico do tubo a ser curvado = Comprimento total do tubo menos a parte reta de cada extremidade (para este cálculo aproximado foi considerado o valor de 2 m de trecho reto em cada extremidade);

R = Raio mínimo de curvamento.

De acordo com o ASME B31.8, item 841.231 (c), a curva a frio pode ter um raio de curvamento inferior a 30D, desde que a curva esteja livre de rugas, trincas, amassamento, ou qualquer evidência de dano mecânico e que a espessura após o curvamento não seja menor que o mínimo permitido pelo projeto.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Após a realização dos testes de curvamento a frio, o tubo 1 apresentou um ângulo de curvamento total de ~ 10°. O tubo 2 apresentou um ângulo de curvamento total de ~ 16°, e o tubo 3 apresentou um ângulo de curvamento total de ~ 19°.

Um dos fatores mais importantes na qualificação de um processo de curvamento é o ângulo aplicado a cada golpe. De acordo com as informações obtidas com o fabricante da máquina, os valores de ângulo aplicados por golpe no tubo 3 são valores limite para a máquina utilizada. Este limite está relacionado com o assentamento do tubo na sela durante a aplicação do golpe. O valor do ângulo aplicado por golpe no tubo 3 corresponde a um levantamento da haste hidráulica de 298 mm. Se valores acima destes forem utilizados, pode ocorrer enrugamento do tubo. Neste estudo, o valor médio de grau por golpe para os tubos 2 e 3 foi de 0,7° e o valor máximo foi de 0,9°.

3.1 Medição de Espessura

Para um acompanhamento da variação de espessura dos locais curvados (10 pontos), utilizou-se um medidor de espessura por ultra-som de pulso-eco Krautkramer modelo D-Meter. Pode-se verificar que os resultados encontrados antes e após o curvamento não apresentaram variação significativa (Tabela 1).

Tabela 1. Valores médios do mapeamento de espessura após curvamento.

	Tubo 1		Tubo 2		Tubo 3	
	Δ Intradorso	Δ Extradorso	Δ Intradorso	Δ Extradorso	Δ Intradorso	Δ Extradorso
Média (mm)	+0,1	-0,2	+0,1	-0,3	+0,0	-0,4
Desvio (mm)	±0,1	±0,1	±0,1	±0,1	±0,0	±0,1

3.2 Medição Dimensional

Para avaliar se ocorreu ovalização nos tubos após o curvamento foi confeccionada uma placa calibradora de acordo com o critério abaixo e distância entre as placas de 1,5D.

$$DP = (0,98 \times D) - 2 \times t \times (1+K) \quad \text{onde,}$$

D e t são o diâmetro externo e a espessura de parede do tubo, respectivamente, K é a tolerância de espessura (20%) e DP o diâmetro externo da placa.

A Figura 10 apresenta a placa calibradora utilizada e mostra uma das passagens da placa. A placa fornece um critério passa/não-passa garantindo que o processo de curvamento não provocou ovalização do tubo acima dos limites determinados pela norma Petrobras N-464.



Figura 10. Placa calibradora (foto à esquerda) e passagem da placa calibradora (foto à direita).

Todos os três tubos foram aprovados com relação aos requisitos de ovalização após inspeção utilizando a placa calibradora. Os tubos também foram inspecionados quanto à enrugamentos e nenhuma evidência de enrugamento ou dano mecânico foi encontrada, atendendo assim ao critério da norma ASME B 31.8.

A Tabela 2 apresenta os demais resultados da avaliação dimensional dos tubos. O trecho reto inicial é a porção inicial do tubo apoiada na curvadeira que não é curvada. O trecho final é a porção do tubo que fica apoiada na sela, mas com comprimento menor que o necessário para sofrer a ação do atuador hidráulico.

O raio de curvamento foi determinado através da expressão abaixo considerando o ângulo final obtido (α); o comprimento do trecho curvado (L) e o raio do curvamento (R):

$$R = \frac{L \times 180}{\pi \times \alpha}$$

Após o curvamento foram feitas medidas do diâmetro para determinar a ovalização tanto na extremidade menor quanto na extremidade de maior trecho reto. A ovalização foi calculada pela expressão $100 \times [(D1-D2)/DN]$, onde D1 é o maior diâmetro medido; D2 é o menor diâmetro medido e DN é o diâmetro nominal do tubo. Todos os valores medidos nas duas extremidades dos tubos, antes e após o curvamento, ficaram abaixo de 1%

Tabela 2 - Resultados da avaliação dimensional.

Tubo	1	2	3
Ângulo da curva	10 °	16 °	19 °
Trecho reto inicial	2,13 m *	1,98 m	1,28 m
Trecho reto final	3,05 m*	2,99 m	3,02 m
Raio de curvamento	44 D	27 D	27 D

* Este trecho reto não foi medido. Para os cálculos de raio de curvamento foram considerados os valores usuais fornecidos pela CRC-Evans.

3.3 Propriedades Mecânicas

Para avaliar a influência da deformação plástica resultante do curvamento nas propriedades mecânicas do tubo, foram realizados ensaios mecânicos de tração e Charpy nos três tubos curvados. Os ensaios foram realizados no extradorso, intradorso e linha neutra (solda) da região curvada e, para comparar com as

propriedades originais, os mesmos ensaios também foram realizados na parte reta, (posições BE, BI, FF, F90 e F180) como mostra a Figura 11.

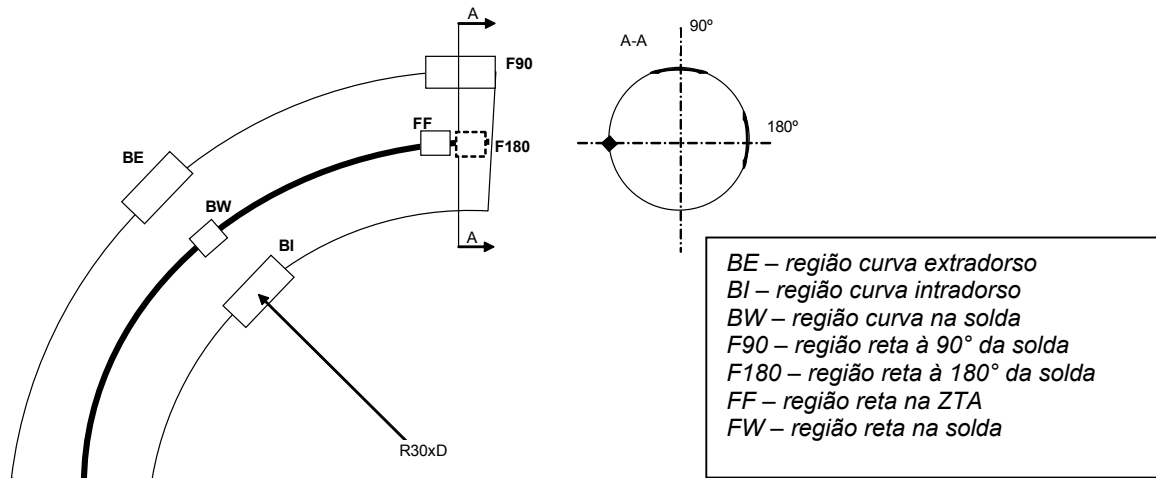


Figura 11. Desenho esquemático da retirada de corpos de prova.

O ensaio Charpy foi realizado na temperatura de 0°C utilizando corpos de prova integrais (10x10x55mm). A Figura 12 mostra os resultados para os três tubos.

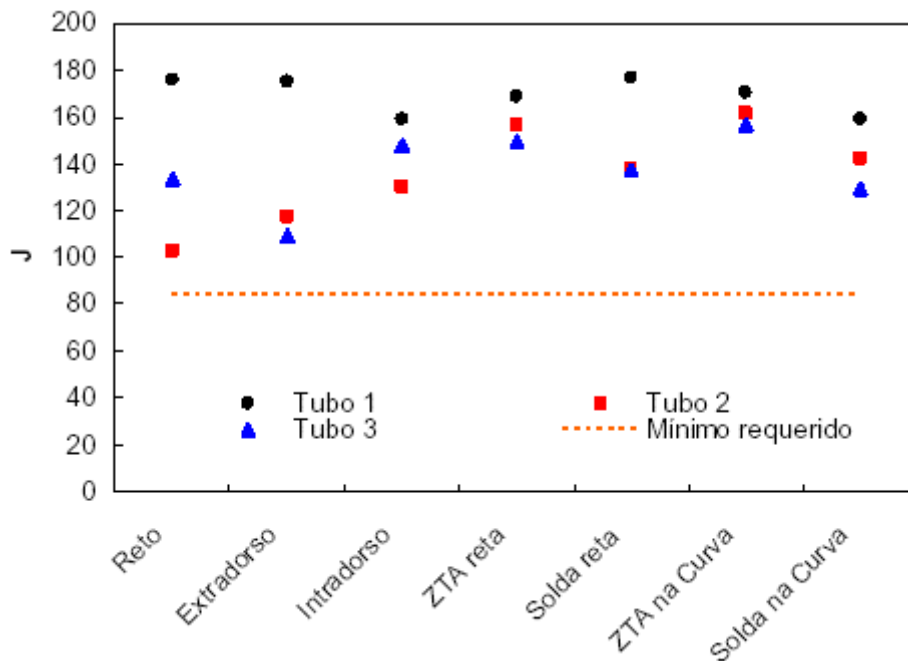


Figura 12 - Resultados do ensaio Charpy.

O ensaio de tração foi realizado em corpos de prova cilíndricos conforme API 5L. A Figura 13 mostra os resultados do ensaio.

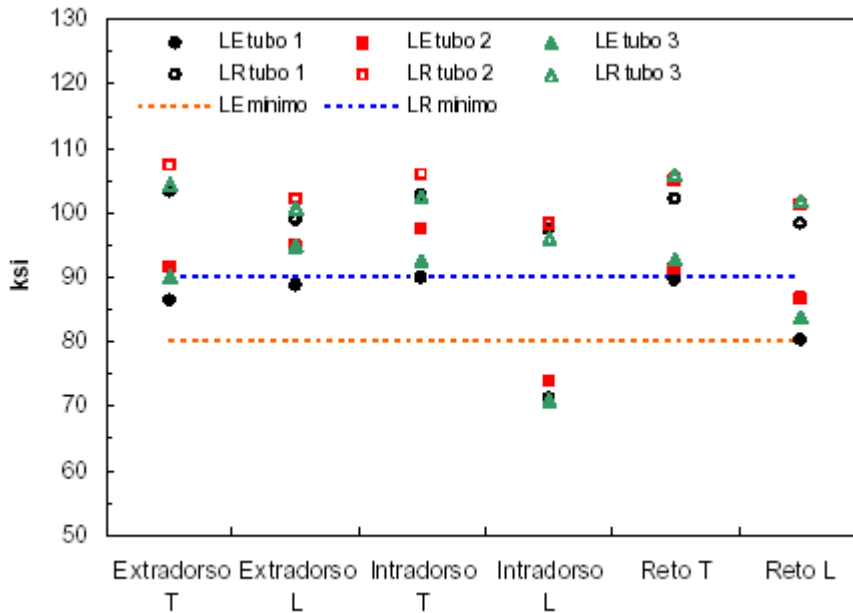


Figura 13 - Resultados do ensaio de tração.

O raio de curvamento atingido já atende o limite da norma ASME B 31.8 e o ângulo obtido atende as condições de construção de dutos, não havendo necessidade de aumentar o ângulo, visto que isto poderia resultar em enrugamento do tubo.

O ensaio Charpy realizado indica que não há queda significativa de tenacidade. Todos os valores obtidos estão acima de 84J na temperatura de 0°C, que é o valor requerido para que o material tenha resistência à propagação de fratura dúctil. O ensaio de tração mostra uma queda no limite de escoamento para os corpos de prova removidos no sentido longitudinal da parte interna da curva (intradorso). A identificação dos motivos da queda no limite de escoamento não foi objeto deste estudo. Entretanto, isto pode ter ocorrido devido ao efeito Bauschinger, que acontece quando o material é deformado no sentido oposto ao que foi deformado anteriormente. Esta região sofre deformação plástica por tração no momento de fabricação do tubo (expansão) e deformação plástica por compressão no momento do curvamento, o que pode explicar a ocorrência desse efeito. Deve-se mencionar que as normas de projeto e construção de dutos não especificam requisitos para ensaios mecânicos em tubos curvados a frio.

5 CONCLUSÃO

Com o processo de curvamento a frio, foi possível obter uma curva com ângulo de 19° e raio de 27D (27 vezes o diâmetro do tubo) sem apresentar rugas, amassamento, ovalização ou qualquer outro tipo de dano mecânico. Com estes resultados, todos os critérios estabelecidos pelas normas de projeto foram atendidos. Os resultados deste estudo fornecem subsídios para futuras aplicações do tubo X80 de fabricação nacional em dutos terrestres.

Além das características do material, o processo de curvamento a frio também depende das características geométricas do tubo, como por exemplo, diâmetro, espessura e relação D/t (Diâmetro/espessura). Tubos X80 com dimensões diferentes das apresentadas neste estudo podem apresentar comportamentos diferentes para os mesmos ângulos e distâncias entre golpes utilizados neste teste.

A queda no limite de escoamento observada na direção longitudinal na parte interna da curva um fenômeno que parece não depender do grau do aço, já tendo sido observado frequentemente no curvamento a frio de tubos X70.

REFERÊNCIAS

- 1 COTTA, A. C., SOUZA L. G., BOTT, I. S. Análises de fratura em soldagem circunferencial de tubos de aços da classe API X80. 59oCongresso Anual da ABM.
- 2 HIROSHI, T. High strength X80 and X100 line pipe steels. International Convention "Pipe Lines: The energy link". Townsville, Queensland, Australia, mar., 1996.
- 3 SPECIFICATION FOR LINE PIPE – API SPECIFICATION 5L. Forth-third Edition, mar, 2004. Effective date: Oct, 2004.
- 4 N-464 – Construção, Montagem e Condicionamento de Duto Terrestre, Procedimento, Rev H, Dez 2004.
- 5 NBR-12712 - Projeto de Sistemas de Transmissão e Distribuição de Gás Combustível, 2002.
- 6 ASME ANSI B31.8 - Gas Transmission & Distribution Piping Systems, 2007.