

EVOLUÇÃO MICROESTRUTURAL DE TUBO DE AÇO API 5L X80 SUBMETIDO A CURVAMENTO COM AQUECIMENTO POR INDUÇÃO¹

Gilmar Zacca Batista²
Luís Felipe Guimarães de Souza³
Ivani de S. Bott⁴
Paulo Rangel Rios⁵

Resumo

Tubos utilizados na construção de dutos de longa distância para transporte de óleo e gás muitas vezes necessitam de curvamento a quente quando o raio de curvamento é inferior a determinado valor. Este trabalho tem por objetivo verificar o efeito do ciclo térmico provocado pelo curvamento a quente por indução, na microestrutura e nas propriedades mecânicas em tubo API 5L X80 fabricado a partir de chapas produzidas pelo processo de laminação controlada, bem como avaliar o efeito do tratamento térmico aplicado no tubo após curvamento. O tubo curvado foi avaliado na parte reta (não afetada pelo processo de curvamento) no intradorso, extradorso e linha neutra da curva, além das regiões das zonas de transição (entre a parte reta e a região curvada). Foram realizados ensaios de microdureza, tração e Charpy-V nas temperaturas de 0, -20, -40, -60 e -80 °C para levantamento da curva de transição. Após o curvamento, observou-se uma grande variação microestrutural entre a parte reta e as regiões curvadas, resultando em uma curva com limite de escoamento inferior ao requerido por norma e uma redução significativa na temperatura de transição, indicando um aumento de tenacidade. O resfriamento com água realizado somente pelo lado externo do tubo, durante o curvamento, levou a formação de diferentes microestruturas ao longo da espessura. Todas as regiões estudadas foram caracterizadas por microscopia ótica e microscopia eletrônica de varredura (MEV). Após o curvamento, foi realizado um tratamento térmico, o qual resultou no aumento do limite de escoamento para valores acima do requerido por norma.

Palavras-chave: API 5L X80; Curvamento por indução; Aços de alta resistência; Tratamento térmico.

MICROSTRUCTURAL EVOLUTION OF API 5L X80 STEEL PIPE AFTER INDUCTION HOT BENDING

Abstract

Pipes used in the construction of long-distance oil and gas pipelines often have to undergo hot-bending when the required bend radius is very small. The present work discusses the effect of the thermal cycling applied during the induction-heated bending process on the microstructure and the mechanical properties of an API 5L X80 steel pipe fabricated from plates produced by controlled rolling, as well as the effects of post-bending heat treatments applied to the pipes. The curved pipe was evaluated at several positions; the straight section (not affected by the bending process), the internal radius, the external radius and the line of neutral curvature, as well as the transition zones (between the straight and the curved regions). Microhardness measurements were made and tensile tests undertaken. Also, Charpy V-notch impact tests were performed at 0, -20, -40, -60 and -80°C to determine transition temperature curves. After bending, significant differences were observed between the microstructures of the straight and curved sections, and consequently a reduction in yield stress, to a value below that required by the industry norm. A significant reduction in impact transition temperature was also observed, indicating a toughness improvement. Water cooling, applied only to the external radius of the tube during bending, provoked further microstructural modification across the wall-thickness. All regions investigated were characterised by optical and scanning electron microscopy. The post-bending heat treatment resulted in an increase in yield strength, to values above the minimum required by the norm.

Key words: High strength steel; API 5L X80; Induction hot bending; Heat treatment.

¹ Contribuição técnica apresentada na 61º Congresso Anual da ABM, de 24 a 27 de julho de 2006, Rio de Janeiro – RJ

² Eng. Metalúrgico. Engenharia de Dutos – PETROBRAS. g.zacca@petrobras.com.br

³ Eng. Metalúrgico, D.Sc. Professor Adjunto. DEPMC – CEFET-RJ. lfelipe@cefet-rj.br

⁴ Ph. D. Professora Associada. DCMM – PUC-Rio. bott@dcmm.puc-rio.br

⁵ Ph. D. Professor Titular. EEIMVR – UFF. prrios@metal.eeimvr.uff.br

INTRODUÇÃO

A produção de petróleo e gás no Brasil e o consumo de derivados estão crescendo cada vez mais. Segundo o Plano Estratégico da Petrobras,⁽¹⁾ a perspectiva de crescimento do mercado de gás natural é de 14% ao ano até 2010. Para atender esta demanda, torna-se necessário que os novos gasodutos tenham maiores diâmetros e operem a pressões mais elevadas, resultando em um aumento na espessura dos tubos ou na aplicação de aços com maior resistência. Aumentar a resistência do aço mantendo constante 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 com altas pressões.

No Brasil, a fabricação de aços de alta resistência para tubos grau X80, conforme especificação API 5L, utiliza o processo tradicional de laminação controlada, diferentemente da técnica de resfriamento acelerado que é utilizada em outros países. Muito embora o desenvolvimento do X80 no Brasil tenha sido realizado com sucesso, a sua aplicação tem sido limitada a risers em plataformas de perfuração. De modo a estender a aplicação deste aço para dutos terrestres, se faz necessário avaliar o comportamento do tubo nas operações de construção e montagem do duto, mais especificamente nos processos de curvamento e soldagem circunferencial.

Na construção de um duto, dependendo do perfil do terreno, cerca de 30% a 40% dos tubos são curvados. A preferência é pelo curvamento a frio, uma vez que este pode ser realizado no campo. Porém, quando o raio de curvamento é muito pequeno, torna-se necessário que o tubo seja curvado a quente, através do processo de indução por alta frequência. Este processo prevê um aquecimento localizado e resfriamento rápido da seção do tubo que está sendo curvada, o qual pode provocar alterações microestruturais significativas no aço e, conseqüentemente, alterações nas propriedades mecânicas.

Groeneveld⁽²⁾ comenta que as propriedades mecânicas, resultantes do processo de laminação controlada, podem ser eliminadas como resultado do aquecimento provocado pelo curvamento por indução e Kondo et al (3) sugerem que o tubo para o curvamento deve possuir carbono equivalente mais alto para aumentar a temperabilidade e minimizar a queda de resistência.

A norma DNV-OS-F101⁽⁴⁾ observa que curvas fabricadas a partir de tubos feitos para trecho reto, podem não apresentar a temperabilidade necessária para atingir as propriedades mecânicas requeridas após o curvamento por indução, principalmente se o tubo tiver sido fabricado por laminação controlada.

Williams⁽⁵⁾ afirma que não é possível assumir que todos os tubos de uma determinada corrida irão responder da mesma forma ao ciclo térmico e Kondo et al.⁽³⁾ comentam ainda que a composição química do aço do tubo deve ser adequada ao processo e parâmetros de fabricação de curvas.

O aço deste estudo (X80) foi desenvolvido para ser utilizado no trecho reto, de forma que a composição química e a rota de fabricação utilizada não foram elaboradas com o objetivo de atender ao curvamento por indução. Esta situação é muito comum nas obras de dutos no Brasil, uma vez que a compra dos tubos é efetuada antes que se tenha o perfil detalhado do terreno.

Neste estudo busca-se avaliar a influência resultante do processo de curvamento a quente por indução e tratamento térmico na microestrutura e nas propriedades mecânicas do tubo API 5L X80 fabricado no Brasil.

MATERIAL E MÉTODOS

Para este estudo foi utilizado um tubo API 5L X80 com 20 polegadas de diâmetro e 19 mm de espessura, fabricado pelo processo UOE*. A chapa para a confecção do tubo foi fabricada através do processo de laminação controlada sem utilizar a técnica do resfriamento acelerado.

A Tabela 1 mostra a composição química com os valores de carbono equivalente.

Tabela 1. Composição Química.

Elementos (% em peso)											
C	Mn	Si	Nb	V	Ti	Mo	Cr	Cu	Ceq (IIW)	Ceq (Pcm)	Nb+V+Ti
0,05	1,76	0,17	0,066	0,025	0,016	0,20	0,15	0,02	0,42	0,17	0,11
Elementos (em ppm)											
P	S	Sn	As	B	Ca	Ni	N	Al			
160	20	20	20	3	30	200	57	350			

No processo de curvamento a quente (Figura 1), uma das extremidades do tubo é empurrada e a outra é fixada por um braço giratório que guia o tubo até a completa conformação da curva. O braço giratório é regulado com o raio de curvatura que se deseja obter e força o tubo a mudar continuamente a direção enquanto é lentamente movimentado, passando por uma bobina de indução por alta frequência que cria um campo magnético altamente concentrado e induz um potencial elétrico no tubo criando um fluxo de corrente. A resistência do tubo ao fluxo provoca um aquecimento rápido e localizado que é seguido por um resfriamento com jatos de água pela parte externa do tubo.⁽⁶⁾

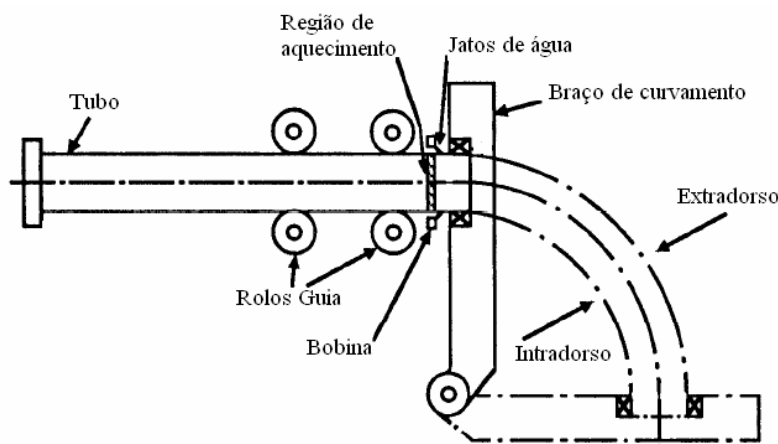


Figura 1. Desenho esquemático do processo de curvamento.⁽³⁾

A temperatura de curvamento ficou em torno de 1050°C. O tubo foi curvado com um raio de curvamento de 2,54 m e um ângulo de 70°.

A Figura 2 mostra a execução do curvamento. Note que, imediatamente após passar pela bobina, o tubo é resfriado com jatos de água.

* Neste processo a chapa é dobrada em formato de “U” e em seguida é conformada em “O”. A etapa seguinte é o ponteamto das faces do “O” e a soldagem final por arco submerso. Em seguida, o tubo é submetido a uma expansão (“E”) para ajustes dimensionais.



Figura 2. Curvamento por indução do X80.

Para avaliar o efeito do curvamento nas propriedades do tubo, foram realizados ensaios mecânicos de tração, microdureza (com carga de 100gf) e impacto Charpy-V. Os ensaios mecânicos foram realizados de acordo com as normas API 5L⁽⁷⁾ e ASTM A 370.⁽⁸⁾ Para o ensaio de tração foram utilizados corpos de prova cilíndricos transversais e para o ensaio Charpy corpos de prova também transversais.

As regiões do tubo curvado avaliadas são mostradas na **Figura 3**, onde:

- | | |
|---------------------------------------|-------------------------------------|
| 1- Zona de transição do extradorso. | 5- Linha neutra na curva. |
| 2- Extradorso. | 6- Zona de transição do intradorso. |
| 3- Linha neutra na zona de transição. | 7- Parte reta. |
| 4- Intradorso. | |

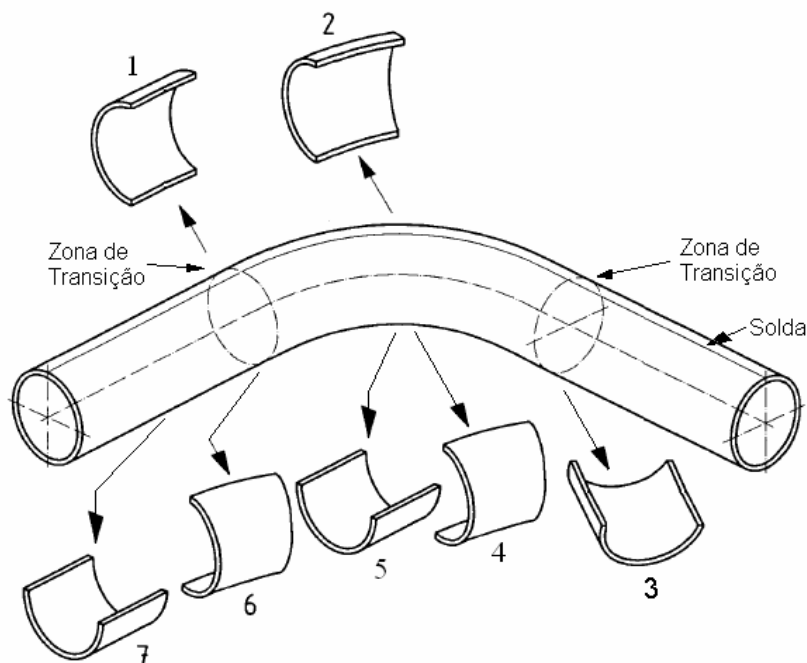


Figura 3. Regiões do tubo curvado estudadas.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Avaliação Microestrutural

Durante o curvamento, o tubo é aquecido por 1 a 2 minutos a temperaturas em torno 1000°C. O curto tempo de exposição nesta temperatura é suficiente para que ocorra austenitização. O resfriamento que ocorre em seguida, em função dos jatos de água, pode levar a formação de uma gama diferente de microconstituintes como ferrita, perlita, bainita, martensita ou combinações destes produtos de transformação, de acordo com a composição química do aço e da taxa de resfriamento imposta neste procedimento. Além disso, Williams⁽⁵⁾ explica que diferentes pontos ao longo da circunferência do tubo, passam pela bobina com diferentes velocidades, dependendo de sua distância ao eixo de curvamento, de modo que algumas regiões da curva estarão submetidas à temperatura de curvamento por um tempo maior que outras.

A **Figura 4** mostra a micrografia da parte reta (original) e a **Figura 5** mostra as micrografias da parte reta e da curva (intradorso, extradorso e linha neutra), para as superfícies interna (I), no centro da espessura (C) e externa (E), que ficou em contato direto com o jato de água. Ao lado direito das Figuras estão os valores de microdureza Vickers (HV).

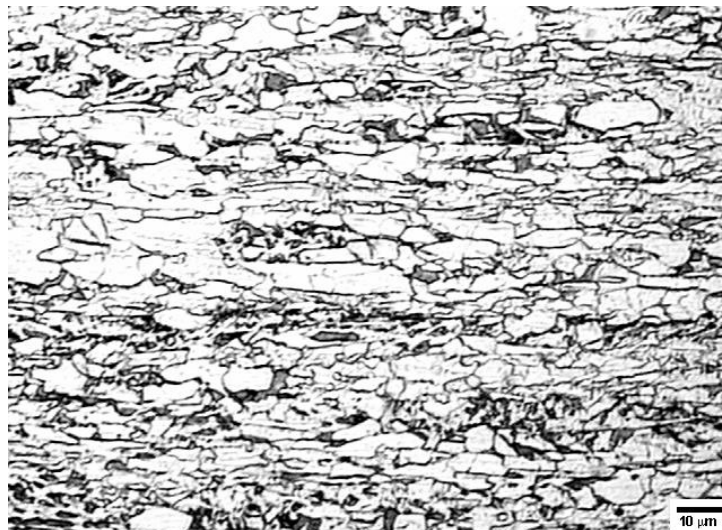


Figura 4. Microestrutura original do tubo reto. Microscopia ótica. Aumento 500X. Ataque: Nital 2%.

A microestrutura original do tubo é composta por grãos finos de ferrita poligonal com pequena quantidade de perlita (**Figura 4**) e, com a microscopia eletrônica de varredura e um ataque apropriado (**Figura 5a**), também é possível observar uma dispersão de martensita com austenita retida (AM) na matriz ferrítica. Com a têmpera aplicada durante o curvamento, a microestrutura de todas as regiões da curva foi alterada (**Figura 5 b, c, d**).

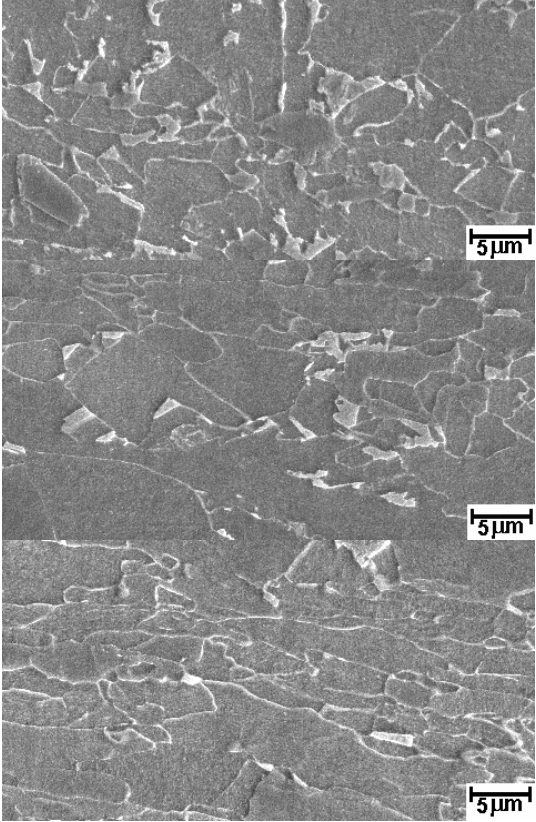
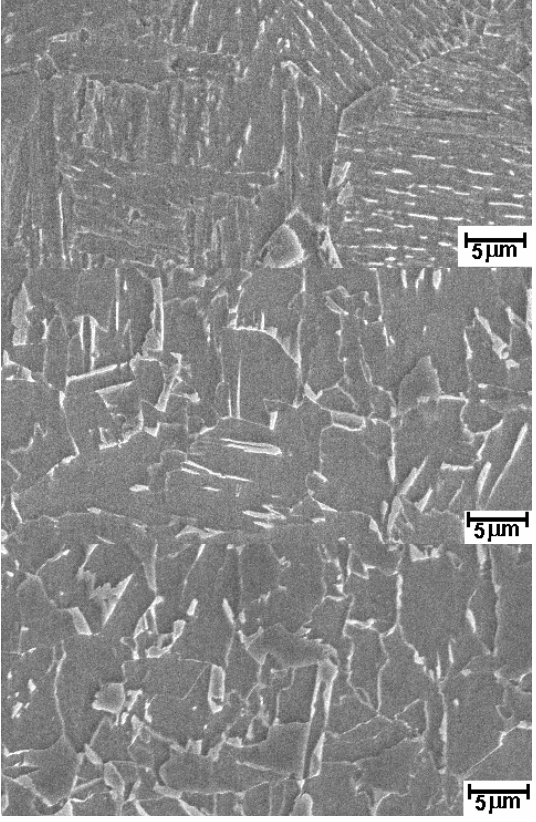
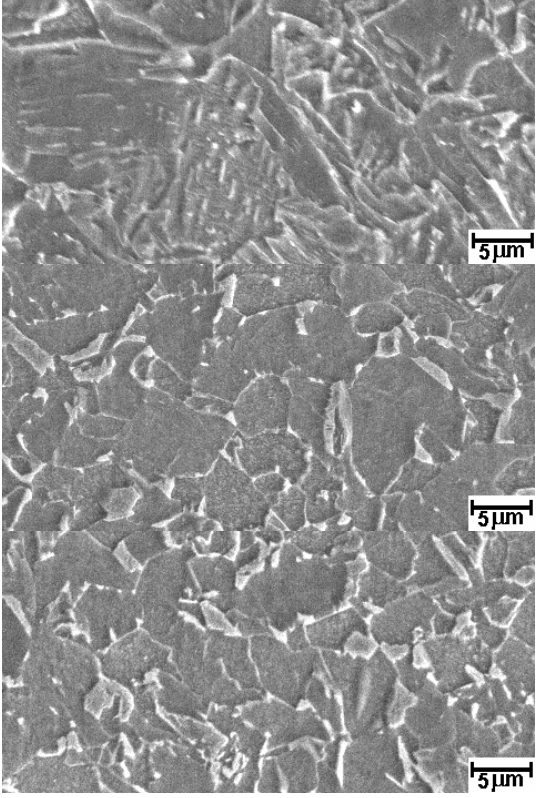
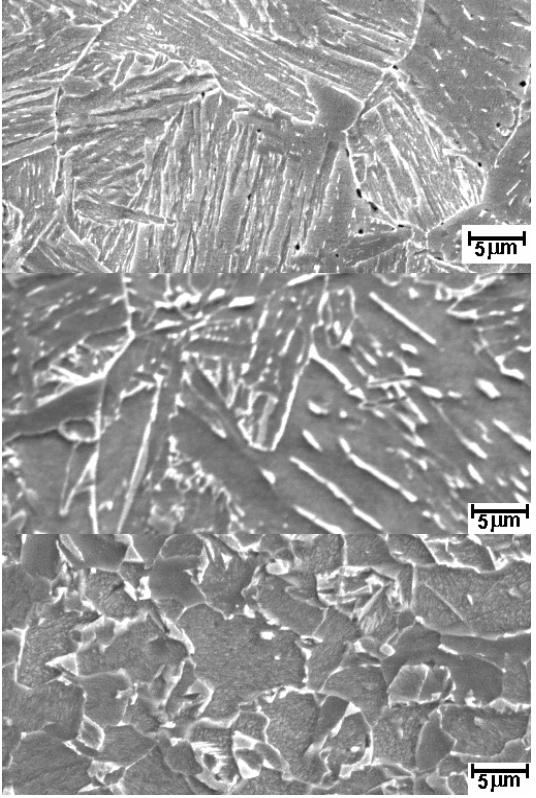
S	Micrografia	HV	Micrografia	HV
E C I		289		337
		277		265
		290		267
E C I		286		354
		270		274
		264		270
	a) Original (tubo reto).		b) Linha neutra (oposta a solda).	
	c) Extradorso		d) Intradorso	

Figura 5. Microestruturas do tubo reto e curvado. Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV). Aumento 2000X. Ataque AM.^(9,10)

Uma significativa variação microestrutural pode ser observada ao longo da espessura. As regiões em contato direto com a superfície externa tendem a apresentar uma microestrutura final mais acicular, devido a maior velocidade de resfriamento provocada pelo contato direto com o jato de água, resultando em maiores valores de dureza. O intradorso apresentou um maior crescimento do grão austenítico quando comparado com as demais regiões da curva, indicando que esta região foi mantida por um tempo maior na temperatura de aquecimento.

As microestruturas das zonas de transição (Figura 6) são bem parecidas com a do material original (Figura 4). Entretanto, devido aos processos de iniciação e interrupção do curvamento, uma maior heterogeneidade de tamanho de grão pode ser observada.


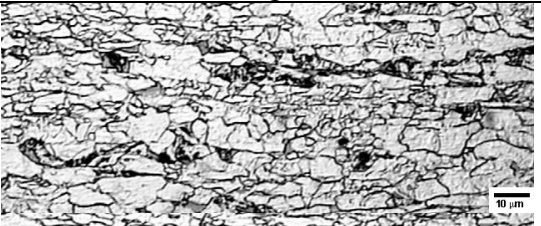


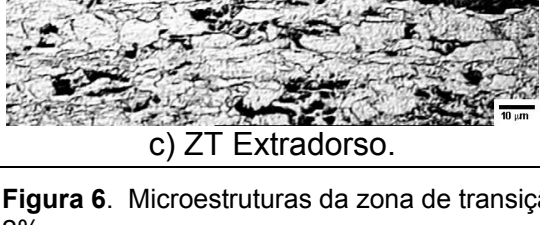
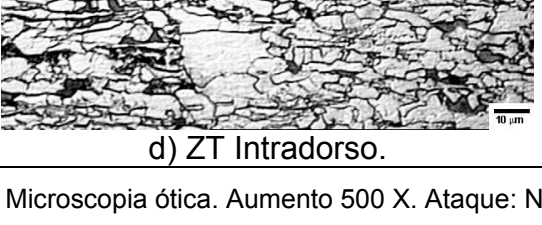
S	Micrografia	HV	Micrografia	HV
E		288		282
C		291		253
I		309		277
	c) ZT Extradorso.		d) ZT Intradorso.	

Figura 6. Microestruturas da zona de transição (ZT). Microscopia ótica. Aumento 500 X. Ataque: Nital 2%.

Avaliação das Propriedades Mecânicas

Em um tubo curvado, normalmente existe uma significativa diferença de propriedades mecânicas entre a parte reta e a região curvada, bem como entre diferentes posições ao longo da circunferência da curva.

A Figura 7 faz uma comparação entre as curvas de transição da parte reta não afetada pelo calor (original) com as diferentes regiões da curva.

Para um patamar de 100J de energia absorvida, a temperatura de transição do tubo, em seu estado original, é cerca de 30 °C superior a temperatura de transição do intradorso e cerca de 40 °C superior a temperatura de transição do extradorso.

Outro fator que pode ser observado é que as zonas de transição apresentam valores bem próximos do tubo original com maior temperatura de transição e menores valores de energia absorvida que a região curvada. Isto está associado a heterogeneidade de tamanho de grão (Figura 6) existente nesta região.

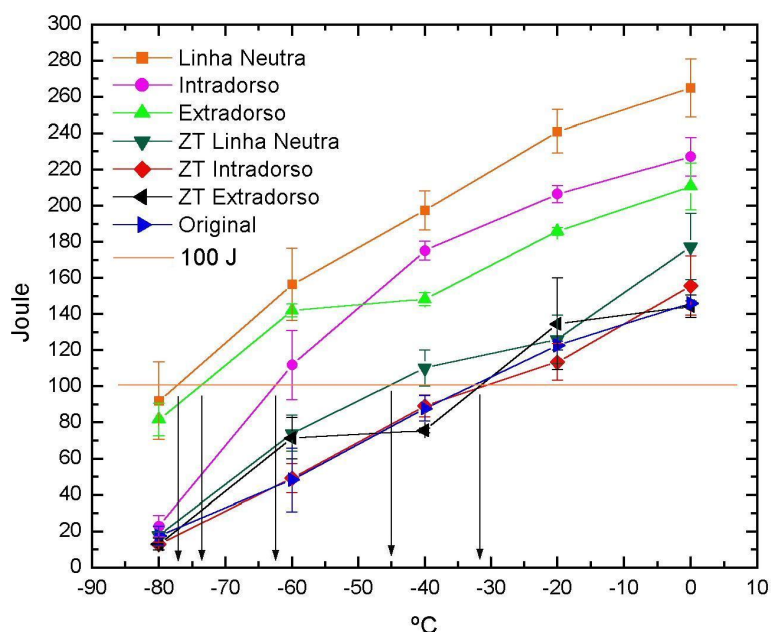


Figura 7. Comparação da temperatura de transição do tubo original com as diferentes regiões da curva.

De uma maneira geral, a Figura 7 mostra que existe um ganho de tenacidade decorrente do processo de curvamento. Um dos fatores que contribuem para esta melhora na tenacidade é a presença de elementos de liga, como o Nb, V e Ti,^(3,11) que formam precipitados e minimizam o crescimento de grão durante o aquecimento.

Kondo et al.,⁽³⁾ afirmam que mesmo em aços com Nb, pode ocorrer o crescimento do grão austenítico, porém, é muito menor que nos aços sem Nb. Este crescimento de grão ocorre porque os finos precipitados de Nb (C, N) são dissolvidos durante o aquecimento. Os precipitados de Ti e V possuem um comportamento semelhante ao do Nb, porém, com diferentes temperaturas de dissolução. O TiN, por exemplo, é estável a altas temperaturas sendo bastante eficaz na prevenção do crescimento do grão austenítico.^(11,12)

Além disso, as micrografias da Figura 5, mostram que o curvamento provocou a formação de grãos ferríticos de menor tamanho, além de reduzir o nível de encruamento do aço, o que é benéfico para a tenacidade.⁽¹²⁾

Apesar da elevada tenacidade, os aços com baixo teor de carbono e adições de Nb apresentam baixa temperabilidade (baixo carbono equivalente), por isso, torna-se necessário adicionar outros elementos de liga para se obter a resistência necessária.⁽³⁾ A Figura 8 mostra os resultados do ensaio de tração realizado na curva, parte reta e zona de transição.

O limite de escoamento sofreu uma redução acentuada na região curvada (intradorso, extradorso e linha neutra), ficando também abaixo do mínimo especificado por norma. Uma das explicações para a redução do limite de escoamento da região curvada pode ser o baixo valor do carbono equivalente.

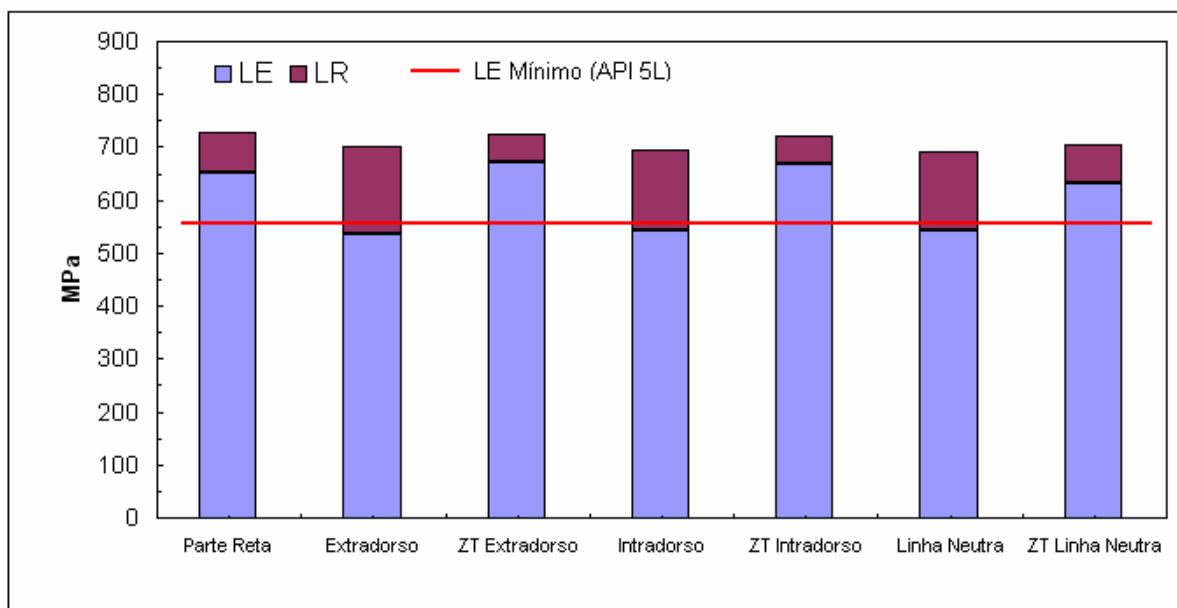


Figura 8. Limite de Escoamento (LE) e Limite de Resistência (LR).

Para tubos utilizados em trecho reto, o carbono equivalente precisa ser baixo para garantir uma boa soldabilidade, por outro lado, não garante uma elevada resistência quando submetido a processos de têmpera. Por este motivo o tubo que será curvado deve ser fabricado com um valor de carbono equivalente adequado para o curvamento. Behrens et al.⁽¹³⁾ determinaram um valor de 0,48% de carbono equivalente para tubos API 5L X80, fabricados a partir de chapas processadas com resfriamento acelerado, submetidos ao processo de curvamento. O carbono equivalente do X80 avaliado neste estudo é de apenas 0,42%, o que não garante a temperabilidade necessária para manter as propriedades após o processo de têmpera provocado pelo curvamento por indução.

Kondo et al.⁽³⁾ comentam que um aumento na velocidade de resfriamento, através da aplicação do resfriamento por fora e por dentro do tubo, pode ser eficiente para permitir a utilização de tubos com menor carbono equivalente. Outra alternativa para elevar o limite de escoamento é fazer um tratamento térmico no tubo curvado.

Tratamento Térmico

Devido a redução nas propriedades de tração após o curvamento do tubo, foi realizado um tratamento térmico de revenido (aquecimento a 500°C, 1 hora de encharque e resfriamento ao ar) para aumentar o limite de escoamento (Figura 9).

O tratamento térmico aplicado não recupera totalmente o limite de escoamento do X80, entretanto, permite que o tubo curvado atenda integralmente todos os requisitos de tração especificados pela norma API 5L. O aumento do limite de escoamento está relacionado com o fenômeno do endurecimento por precipitação, uma vez que este material possui uma quantidade considerável de elementos de liga. Estes elementos são solubilizados durante o aquecimento, permanecendo em solução sólida devido a alta taxa de resfriamento provocada pelos jatos de água. Com o aquecimento provocado pelo revenido, ocorreu a precipitação destes elementos, provocando o aumento do limite de escoamento.

A **Figura 10** mostra os valores de microdureza Vickers e as micrografias do intradorso e do extradorso após o tratamento térmico, onde é possível perceber que a quantidade do microconstituente AM é bem inferior que a do material original e como curvado.

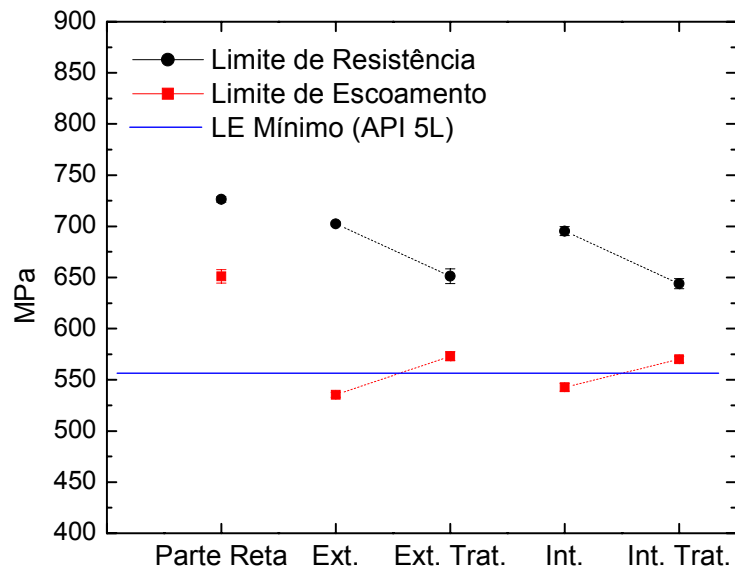


Figura 9. Variação dos limites de resistência e escoamento após curvamento e tratamento térmico. Ext – Extradorso, Int - Intradorso , Trat – Tratado.

S	Micrografia	HV	Micrografia	HV
E		269		294
C		246		262
I		231		234
	c) Extradorso.		d) Intradorso.	

Figura 10. Micrografias das regiões do extradorso e intradorso após tratamento térmico. MEV. Aumento 2000X. Ataque AM. ^(9,10)

Após o tratamento térmico, semelhante ao que ocorre na condição de como curvado, ainda é possível perceber uma diferença microestrutural significativa ao longo da espessura. O mesmo ocorre para os valores de dureza, embora estes sejam bem inferiores aos do tubo antes do tratamento (Figura 11).

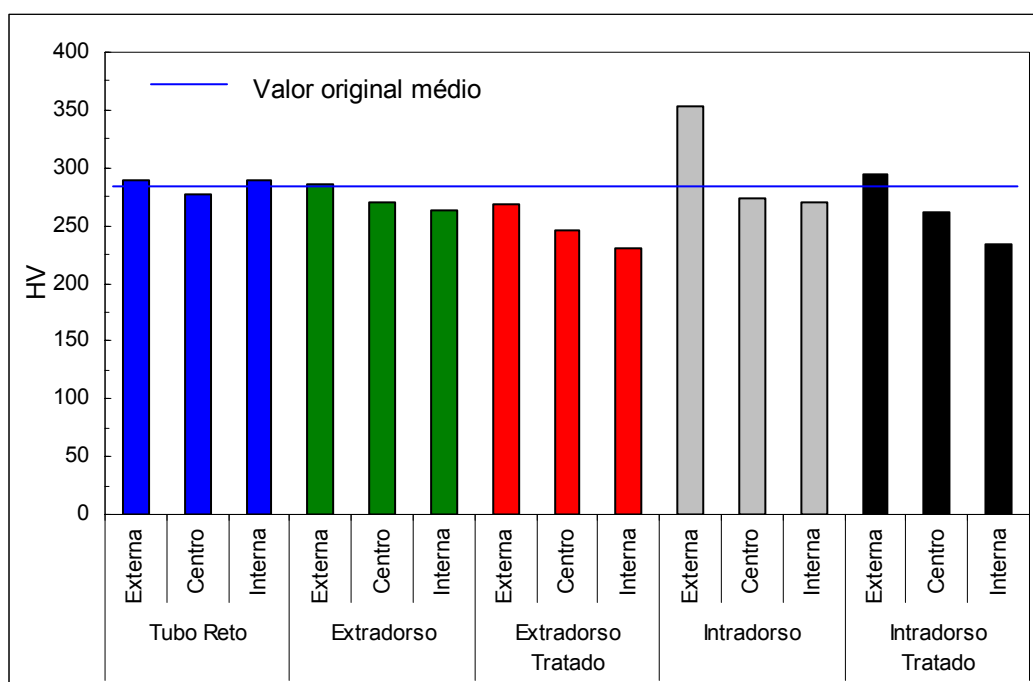


Figura 11. Resultados do ensaio de microdureza Vickers.

CONCLUSÕES

O resfriamento com água pelo lado externo do tubo provoca um gradiente microestrutural ao longo da espessura. Como consequência, a dureza varia de aproximadamente 260 HV, na superfície interna, a 350 HV na externa. Estes valores de dureza estão dentro dos limites normalmente estabelecidos pelas especificações de tubos.

Após o curvamento, observou-se uma redução significativa na temperatura de transição da região curvada, indicando que o ciclo térmico do curvamento provoca uma melhora na tenacidade do material. Esta melhora está relacionada com a formação de grãos ferríticos de menor tamanho e com a redução do nível de encruamento do aço. Além disso, este aço possui elementos de liga como V, Nb e Ti que formam precipitados e retardam o crescimento do grão austenítico durante o aquecimento.

O processo de curvamento provoca uma redução no limite de escoamento da região curvada (extradorso, intradorso e linha neutra) para valores inferiores ao mínimo exigido por norma. Um dos motivos para esta redução é que a elevada resistência, resultante do processo de laminação controlada, é completamente alterada quando submetida ao ciclo térmico aplicado no curvamento, associado ao baixo valor de carbono equivalente que não permite atingir a temperabilidade necessária para manter as propriedades originais.

As zonas de transição apresentaram microestruturas e propriedades mecânicas semelhantes ao material original. Porém, uma maior heterogeneidade de tamanho de grão pode ser observada.

Um aumento significativo no limite de escoamento para as regiões do intradorso e extradorso foi conseguido através da aplicação do tratamento térmico de revenido, ficando acima do limite mínimo estabelecido por norma. Adicionalmente, ocorre uma redução nos valores de dureza e limite de resistência, ficando este ainda dentro do limite especificado pela API 5L.

O aumento do limite de escoamento após o tratamento térmico pode ser atribuído ao fenômeno do endurecimento por precipitação. O efeito dos precipitados no limite de escoamento depende do tamanho das partículas e de sua distribuição na matriz, que por sua vez são função dos parâmetros do tratamento térmico de revenido. De modo a otimizar o revenido é preciso realizar testes com diferentes parâmetros de tratamento e verificar o efeito deste nas propriedades e microestrutura do X80.

Agradecimentos

Os autores agradecem a Petrobras e CNPq pelo financiamento, à Confab e Protubo pelo fornecimento do tubo, execução do teste de curvamento e suporte técnico oferecido.

REFERÊNCIAS

- 1 Petrobras. Plano Estratégico da Petrobras 2015. Disponível em: <<http://www.petrobras.com.br>>. Acesso em: 06 de dezembro de 2005.
- 2 GROENEVELD, T. P. Evaluation of Modern X70 & X80 Line Pipe Steels. Report nº 201, to PRCI from Batelle. April, 1992.
- 3 KONDO, J. et al. The State of The Art of High Strength Induction Bent Pipe. NKK Corporation. Eighth Symposium on Line Pipe Research. PRCI. September, 1993.
- 4 Submarine Pipeline Systems. Offshore Standard DNV-OS-F101. Det Norske Veritas. January, 2000.
- 5 WILLIAMS, D. N. Investigation of the Properties of Induction Hot Bends. Batelle Columbus Division. Seventh Symposium on Line Pipe Research. PRCI. October, 1986.
- 6 BATISTA, G. Z. et al. Curvamento a Quente de Tubos API 5L X80. Rio Pipeline Conference & Exposition 2005. Outubro de 2005.
- 7 Specification for Line Pipe, API Specification 5L. American Petroleum Institute, March. 2004.
- 8 Standard Test Methods and Definitions for Mechanical Testing of Steel Products. ASTM A 370. American Society for Testing and Materials. 2003.
- 9 IKAWA, H.; OSHIGE, H.; TANOUE, T. Effect of Martensite-Austenite Constituent on HAZ Toughness of a High Strength Steel. IIW. DOC IX – 1156-80.
- 10 BISS, V.; CRYDERMAN, L. Metallurgical Transactions, 2. 2267-76. August, 1971.
- 11 HULKA, K. Metallurgical Concept and Full-Scale Testing of High Toughness, H2S Resistant 0.03%C-0.10%Nb Steel. Niobium Technical Report. CBMM.
- 12 SAGE, A. M. Physical Metallurgy of High-Strength, Low-Alloy Line-Pipe and Pipe-Fitting Steels. The Metals Society, Vol. 10, p. 224-233, June 1983. London.
- 13 BEHRENS, D.; HILLENBRAND, H. G. and SPETH, W. Inductive Bends in Grade GRS 550TM/V (X80). Europipe. 1994.