

OTIMIZAÇÃO DE PARÂMETROS PARA O CURVAMENTO A QUENTE DE TUBOS X80¹

Gilmar Zacca Batista²
Rafael de Araujo Silva³
Ivani de S. Bott⁴
Paulo Rangel Rios⁵

Resumo

O objetivo deste estudo foi avaliar a influência nas propriedades mecânicas, dos ciclos térmicos aplicados nos processos de curvamento por indução e tratamento térmico de tubos X80. Neste trabalho buscou-se definir as melhores temperaturas de aquecimento e taxas de resfriamento durante o curvamento bem como os melhores parâmetros para o tratamento térmico. Para isso, o curvamento e o tratamento térmico foram realizados primeiramente em escala industrial e, em seguida, foram realizados tratamentos térmicos em laboratório a partir de pedaços do tubo. As amostras de tubo no estado original foram austenitizadas, resfriadas em diferentes meios e revenidas a 500 °C por 1 hora. As amostras de tubo como curvado foram revenidas em diferentes temperaturas. O aquecimento na faixa de 900 a 1000 °C seguido de resfriamento em água e revenido (500°C/1h) mostrou-se adequado para se obter elevados níveis de resistência mecânica sem prejuízo de alongamento e tenacidade. Com relação à temperatura de revenido, os melhores valores de limite de escoamento foram encontrados para as temperaturas de 600 e 650 °C. Dessa forma, o aumento na velocidade de resfriamento seguido de revenido entre 600 e 650 °C pode ser a melhor opção para o curvamento por indução de tubos API 5L X80.

Palavras-chave: API; X80; Curvamento; Indução; Tratamento térmico.

OPTIMIZATION OF X80 HOT BENDING PROCESS PARAMETERS

Abstract

The present work discusses the effect of hot bending and heat treatment thermal cycles on the mechanical properties of X80 pipe. This work aims to define the best temperature and cooling rate during pipe bending, as well as the best heat treatment parameters. Firstly, the pipe bending and the heat treatment were performed on an industrial scale in two pipes from different heats. After that, the heat treatment was performed at laboratory scale. The pipe specimens were heated between 900 °C and 1000 °C, cooled at different rates and then, tempered at 500 °C for 1 hour. The as-bent specimens were tempered at different temperatures, in order to define the most appropriate treatment to be applied after bending. After the test results analysis, the best parameters for pipe bending and heat treatment were defined. The heating between 900 °C and 1000 °C followed by water cooling and tempering (500°C/1h) was shown suitable to achieve high yield strength level. The best values of yield strength were achieved between 600 and 650 °C tempering temperature. Thus, the cooling rate increase during pipe bending followed by 600 to 650 °C tempering, could be the best option for the X80 induction bending process.

Key words: API; X80; Bending; Induction; Heat treatment.

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

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

³ Eng. Metalúrgico. DCMM – PUC-Rio. ras@rdc.puc-rio.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

Com a nacionalização das reservas do gás boliviano e para atender a crescente demanda no consumo de gás, a Petrobras acelerou a busca pela auto-suficiência na produção de gás natural. Hoje o país consome 58 milhões de metros cúbicos por dia. Em 2010, esta vazão pode atingir 100 milhões de metros cúbicos diários, representando 12 % da matriz energética brasileira. Para atender este mercado e viabilizar o escoamento da produção destes campos, a Petrobras deverá investir, nos próximos cinco anos, US\$ 6,5 bilhões na construção de novos gasodutos. Todo este investimento representa um aumento significativo nas atividades de construção e montagem de dutos no Brasil, acrescentando 4.160 km de dutos aos 5.570 km já existentes no país.^[1]

Na construção de um duto, os tubos precisam ser curvados a frio ou a quente para acompanhar o perfil do terreno. A técnica de curvamento a quente permite a obtenção de pequenos raios de curvamento, inviáveis de serem obtidos com o curvamento a frio tradicional. As curvas a quente permitem que o duto passe por terrenos sinuosos e garante um melhor aproveitamento do espaço disponível na faixa de dutos, principalmente quando se está construindo em uma faixa onde já existem dutos enterrados. Além disso, a aplicação de curvas a quente pode minimizar o descarte de solo e conseqüentemente o impacto da obra no ambiente.

Para se utilizar tubos curvados, é preciso garantir que a região curvada tenha qualidade compatível com os tubos que estão sendo empregados, caso contrário, podem se comportar como “elos frágeis”.

A qualificação de um procedimento de curvamento a quente é uma tarefa bastante complexa e que exige um elevado grau de conhecimento metalúrgico. Ao ser submetida ao ciclo térmico do processo de curvamento, a microestrutura original do tubo é completamente alterada, resultando em uma significativa variação nas propriedades mecânicas. Em muitos casos não é possível manter as propriedades da curva compatíveis com a do tubo original, sendo necessário a realização de um tratamento térmico no tubo curvado com o intuito de restaurar as propriedades mecânicas. Os parâmetros de curvamento a quente e o tipo de tratamento térmico a serem aplicados dependem do tipo de aço que está sendo curvado. Geralmente, quanto maior for o limite de escoamento do tubo, maior será a dificuldade de manter as propriedades mecânicas originais. Durante a etapa de fabricação, o aço passa por um processo de laminação a fim de se obter uma microestrutura refinada responsável pelos elevados valores de limite de escoamento e tenacidade que estes aços possuem. Esta microestrutura é totalmente modificada quando o tubo é submetido ao ciclo térmico de curvamento, eliminando todo o trabalho de laminação realizado anteriormente, com isso, torna-se necessário que os ciclos térmicos de curvamento e tratamento térmico sejam projetados para gerar microestruturas que possam compensar a perda de resistência ocorrida pela eliminação do trabalho realizado durante a laminação. Para definir um tratamento térmico adequado também é preciso levar em consideração a composição química do aço. O tubo X80 avaliado neste estudo possui adições de elementos de liga como V, Nb, Mo e Ti, por exemplo, que têm grande influência nos processos de curvamento e tratamento térmico.

Este trabalho mostra uma série de ciclos térmicos aplicados ao tubo API 5L X80 durante a após o curvamento a quente, com o intuito de produzir uma curva com propriedades compatíveis com o tubo reto original.

MATERIAL E MÉTODOS

Neste estudo foram utilizados dois tubos API 5L X80 de 20" de diâmetro e 0,75" de espessura fabricados pelo processo UOE e soldados com arco submerso. As chapas para fabricação dos tubos foram produzidas pelo processo de laminação controlada sem resfriamento acelerado. As Tabelas 1 e 2 mostram as composições químicas dos tubos.

Tabela 1- Composição química do tubo A.

Elementos (% em peso)								
C	Mn	Si	Nb	V	Ti	Mo	Cr	Cu
0,06	1,78	0,18	0,06	0,02	0,01	0,26	0,18	0,01

Al	P	S	Ni	Nb+V+Ti	Carbono Equivalente	
					IIW	Pcm
0,03	0,016	0,004	0,02	0,09	0,45	0,18

Tabela 2- Composição química do tubo B.

Elementos (% em peso)								
C	Mn	Si	Nb	V	Ti	Mo	Cr	Cu
0,05	1,74	0,21	0,069	0,022	0,014	0,177	0,147	0,008

B	Al	P	S	Ni	Nb+V+Ti	Carbono Equivalente	
						IIW	Pcm
0,0001	0,042	0,018	0,002	0,011	0,11	0,41	0,17

Os dois tubos foram curvados a quente pelo processo de indução por alta frequência. Este processo, na realidade, é uma têmpera onde o tubo é aquecido (austenitizado) ao passar por uma bobina, deformado plasticamente e logo em seguida resfriado com jatos de água.

O aquecimento é realizado somente na região curvada de modo que as extremidades retas não são afetadas pelo calor, permanecendo em seu estado original. Este processo pode ser melhor visualizado na **Figura 1**.

Kondo et al.^[2] comentam que a temperatura ideal de aquecimento para tubos com baixo C contendo Nb, geralmente está na faixa de 950°C a 1050°C. Neste estudo, a temperatura utilizada para o curvamento dos dois tubos foi de 1050°C.

Os tubos foram curvados com um raio de curvamento igual a cinco vezes o diâmetro nominal do tubo. Este valor foi escolhido por ser o valor mais crítico normalmente utilizado em dutos.

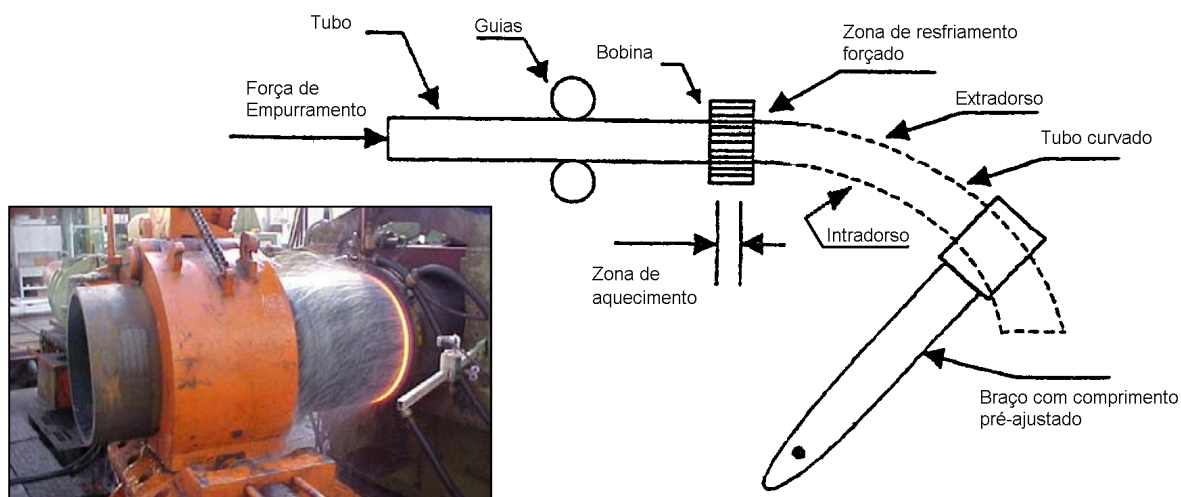


Figura 1- Processo de curvamento.

Após a etapa de curvamento, os tubos seguiram para a etapa de tratamento térmico, que foi realizada primeiramente em escala industrial e depois em laboratório, a partir de pedaços da parte curvada dos tubos e da extremidade reta.

Para avaliar o efeito do curvamento nas propriedades do tubo, foram realizados ensaios mecânicos de tração, dureza e impacto Charpy-V. Os ensaios mecânicos foram realizados de acordo com as normas API 5L^[3] e ASTM A 370.^[4] Para o ensaio de tração foram utilizados corpos de prova cilíndricos transversais e para o ensaio Charpy corpos de prova também transversais.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

A **Tabela 3** mostra os ciclos térmicos aplicados durante o curvamento e tratamento térmico dos tubos.

Tabela 3- Testes realizados em escala industrial.

Tubo	Processo	Região avaliada
A	Curvamento por indução Aquecimento a 1050 °C seguido de resfriamento por jatos de água	Região curvada e parte reta
A	Tratamento térmico Aquecimento a 500°C (1h) seguido de resfriamento ao ar calmo	Região curvada
B	Curvamento por indução Aquecimento a 1050 °C seguido de resfriamento por jatos de água	Região curvada e parte reta
B	Tratamento térmico Aquecimento a 500°C (1h) seguido de resfriamento ao ar calmo	Região curvada

Os ciclos térmicos aplicados durante o curvamento e tratamento térmico alteram completamente a microestrutura original do tubo. A **Figura 2** mostra a microestrutura original, a microestrutura após o curvamento e a microestrutura após curvamento e tratamento térmico de 500 °C por uma hora. Ao lado direito de cada microestrutura estão os valores de dureza Vickers.

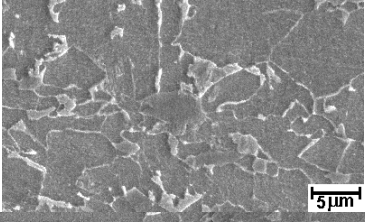
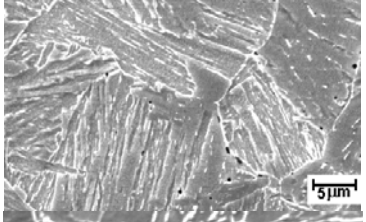
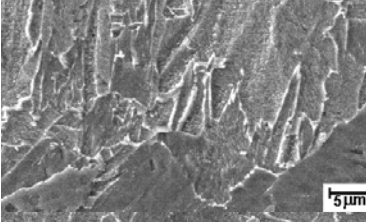
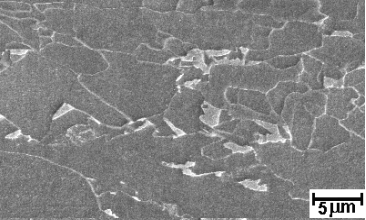
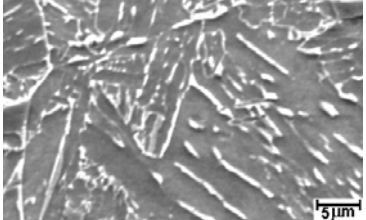
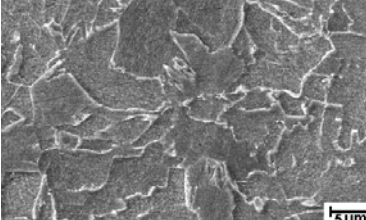
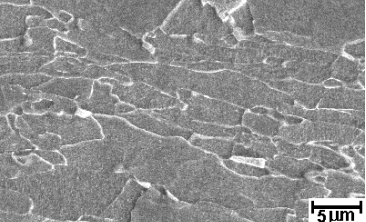
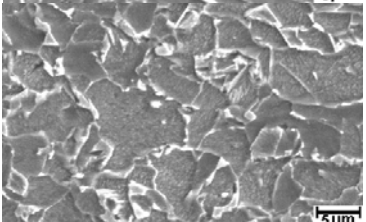
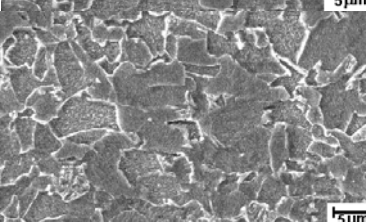
	Microestrutura	HV	Microestrutura	HV	Microestrutura	HV
E		289		354		294
C		277		274		262
I		290		270		234
	a) Parte reta.		b) Curva antes do Tratamento térmico.		c) Curva após tratamento térmico.	

Figura 2- Microestrutura do tubo A. Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV). Aumento 2000X. Ataque eletrolítico em duas etapas (solução de Ikawa).^[5,6]
E = Superfície externa, C = Centro da espessura, I = Superfície interna.

Como o resfriamento do tubo por jatos de água, durante a etapa de curvamento, é realizado somente pela parte externa do tubo, ocorre a formação de um gradiente microestrutural ao longo da espessura. A região externa resfria mais rapidamente e, por isso, apresenta uma morfologia lamelar ou de ripas finas (bainita e martensita) enquanto que a região interna do tubo apresenta ferrita poligonal (**Figura 2b**). A microestrutura original e após curvamento, apresenta uma quantidade significativa de microconstituinte AM (Austenita-Martensita). Após o tratamento térmico ocorre uma decomposição do AM (**Figura 2c**).

Os ensaios mecânicos foram realizados primeiramente no tubo A na condição de como curvado, para verificar o efeito do curvamento nas propriedades mecânicas do tubo. Em seguida, foi realizado um tratamento térmico em um anel de 650 mm de comprimento da região curvada do tubo A, resultando em propriedades mecânicas adequadas. O tratamento térmico do tubo B também foi realizado em um anel de 650 mm de comprimento, com os mesmos parâmetros utilizados no tubo A.

A **Figura 3** mostra a variação do limite de escoamento do aço em função dos ciclos térmicos aplicados. Após o curvamento, tanto o tubo A quanto o tubo B apresentaram queda de limite de escoamento, ficando abaixo do valor mínimo requerido para o X80. Com o tratamento térmico de 500 °C por uma hora ocorre um aumento significativo para os dois tubos, sendo que para o tubo B, o limite de escoamento ainda ficou abaixo do mínimo especificado por norma. Isto mostra que a influência do curvamento por indução nas propriedades mecânicas é fortemente dependente da composição química do tubo. Tubos com maiores valores de carbono equivalente resultam em maior limite de escoamento após curvamento e tratamento térmico.

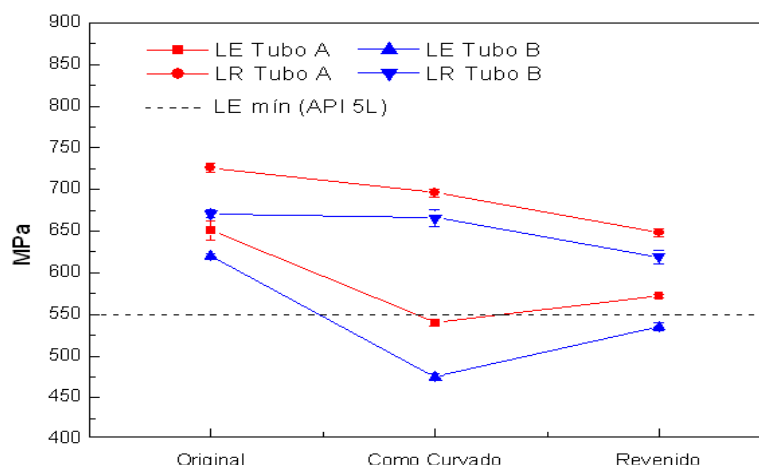


Figura 3- Limite de escoamento e resistência dos tubos A e B, no estado original, após curvamento e após tratamento térmico de revenido.

Como os resultados para o tubo B não foram satisfatórios, uma série de tratamentos térmicos foram realizados em laboratório, a partir de pequenos pedaços do tubo, com a finalidade de otimizar os parâmetros de curvamento. Nestes tratamentos, o material foi austenitizado, seguido de resfriamento em diferentes meios e posteriormente revenido a 500 °C por 1h. O objetivo foi avaliar o efeito da variação da taxa de resfriamento e da temperatura de austenitização nas propriedades mecânicas. Os parâmetros utilizados nestes testes são mostrados na **Tabela 4**.

Tabela 4- Simulação dos ciclos térmicos de curvamento e tratamento térmico.

Tubo	Simulação do curvamento	Revenido
B	Austenitização a 1000 °C por 30 minutos seguido de resfriamento em ar calmo .	500 °C por 1 hora
	Austenitização a 1000 °C por 30 minutos seguido de resfriamento em ar forçado .	
	Austenitização a 1000 °C por 30 minutos seguido de resfriamento em óleo .	
	Austenitização a 1000 °C por 30 minutos seguido de resfriamento em água .	
	Austenitização a 950 °C por 30 minutos seguido de resfriamento em água .	
	Austenitização a 900 °C por 30 minutos seguido de resfriamento em água .	

Deve-se levar em consideração as diferenças existentes entre uma simulação realizada em laboratório e o processo real de curvamento. O aquecimento realizado no forno de laboratório não simula perfeitamente o ciclo térmico do curvamento por indução já que é muito mais lento. Além disso, nos testes realizados em laboratório não existe a contribuição do processo de deformação plástica do tubo, como ocorre em uma situação de curvamento real. O objetivo destas simulações é chegar a uma microestrutura que apresente boas propriedades e que possa ser obtida com o curvamento por indução.

A **Figura 4** apresenta as microestruturas resultantes dos processos de austenitização, têmpera e revenido e a **Figura 5** mostra a variação do limite de escoamento em função dos tratamentos térmicos realizados.

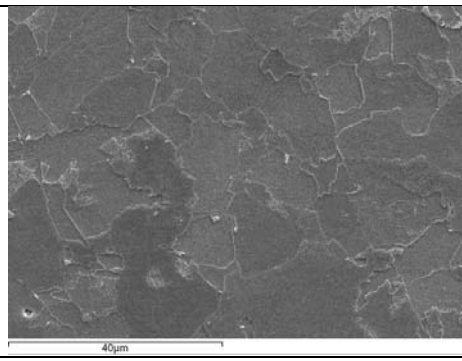
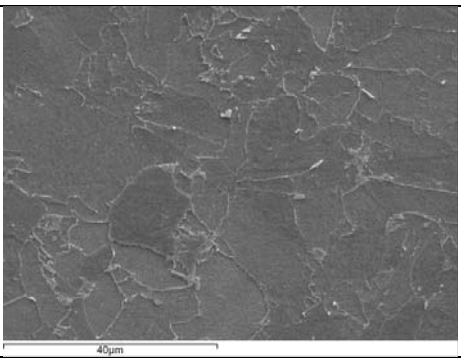
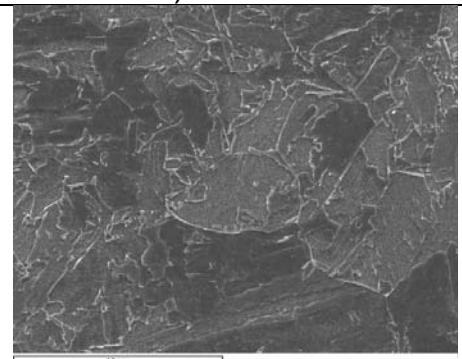
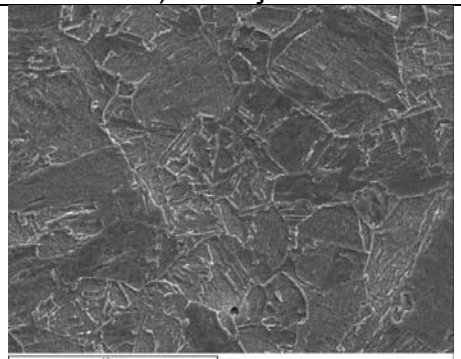
Microestrutura	HV	Microestrutura	HV
	193		202
a) ar calmo		b) ar forçado	
	219		257
c) óleo		d) água	

Figura 4 - Microestruturas do tubo B após tratamentos térmicos. MEV. Aumento 1000X. Ataque eletrolítico em duas etapas (solução de Ikawa).^[5,6]

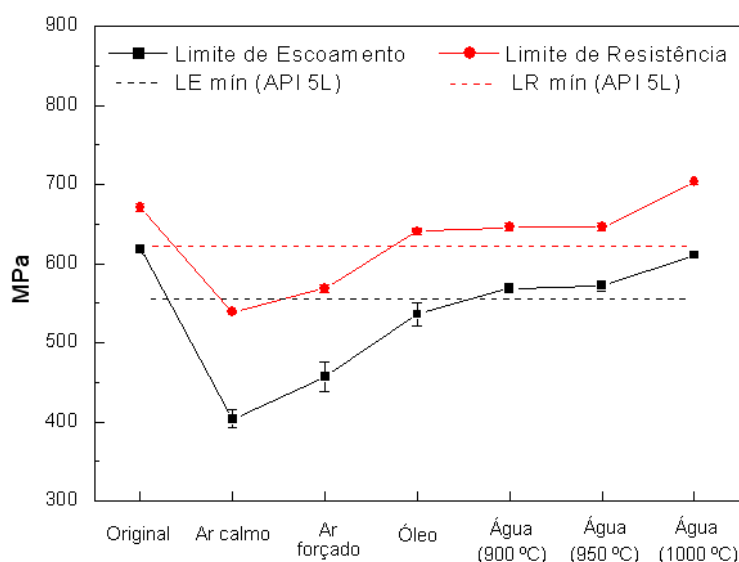


Figura 5 - Influência dos tratamentos térmicos nos limites de escoamento e resistência (tubo B).

O resfriamento em água seguido de revenido resultou em valores de limite de escoamento e alongamento (**Figura 6a**) superiores ao mínimo especificado por norma.

A variação do tamanho de grão austenítico com a temperatura de austenitização pode ser vista na **Figura 6b**. Quanto maior a temperatura de austenitização, maior o tamanho de grão austenítico, resultando em uma maior temperabilidade e consequentemente favorecendo a formação de microestruturas bainíticas e martensíticas. Estas microestruturas, quando revenidas (**Figura 4d**), resultam em um elevado limite de escoamento sem prejudicar o alongamento.

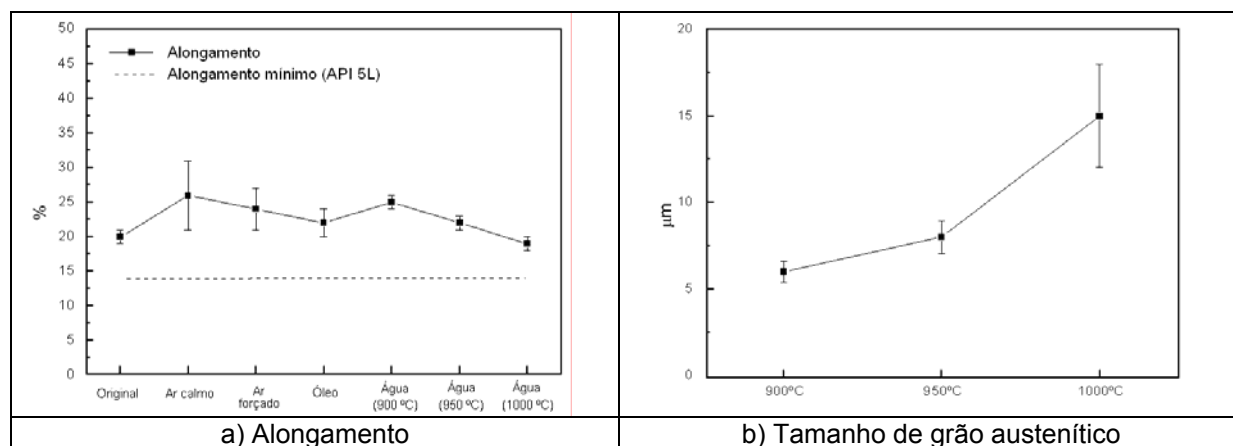


Figura 6- Resultados de alongamento e tamanho de grão austenítico (Tubo B).

A microestrutura obtida a 1000 °C é semelhante à microestrutura da região externa da curva onde incide o jato de água no processo industrial (**Figura 4d** e **Figura 2**) e o tamanho de grão austenítico, obtido com austenitização a 1000 °C (15 μm), também é bem próximo daquele observado na região externa da curva (13 μm). Isto mostra que, com o curvamento por indução, é possível obter um limite de escoamento compatível com aquele do tubo original, API 5L X80. Desde que no processo industrial a velocidade de resfriamento seja aumentada, conforme demonstrado nos testes realizados em laboratório, onde uma microestrutura equivalente àquela do processo industrial foi obtida.

Para verificar se ocorre fragilização em função dos tratamentos térmicos aplicados, foi realizada uma série de ensaios Charpy (**Figura 7**). Os resultados mostram elevados valores de energia absorvida, indicando que não ocorreu fragilização. Além disso, estes valores são superiores ao valor original (parte reta sem tratamento térmico) e muito superiores ao valor de 68J a 0 °C especificado pela API 5L.

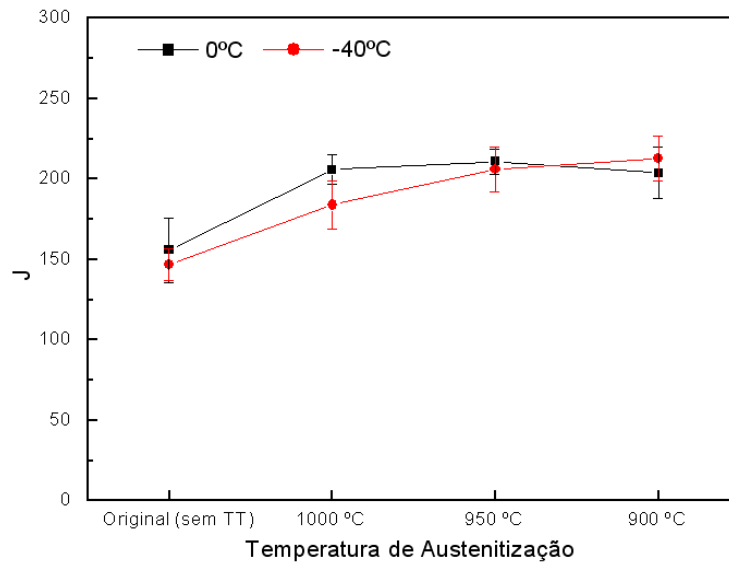


Figura 7 - Valores de energia absorvida em função da temperatura de austenitização (tubo B). Resultados obtidos após o revenido.

Posteriormente, o tratamento térmico de revenido a 500° por 1 hora foi aplicado na extremidade reta da curva (Tabela 5). Em uma situação real, esta região não é afetada pelo ciclo térmico de curvamento, sendo afetada somente pelo ciclo térmico de revenido.

Tabela 5 - Tratamento térmico da parte reta realizado em laboratório.

Tubo	Tratamento térmico	Região avaliada
A	Aquecimento a 500°C por uma hora seguido de resfriamento no forno .	Parte reta
A	Aquecimento a 500°C por uma hora seguido de resfriamento ao ar forçado .	Parte reta

A **Figura 8** mostra os resultados do ensaio de tração dos tratamentos térmicos realizados na parte reta, onde se utilizou duas velocidades de resfriamento. Pode ser observado que tanto para o resfriamento mais lento (realizado no forno) quanto para o resfriamento mais rápido (realizado com ar forçado), o limite de escoamento se manteve acima do valor mínimo especificado.

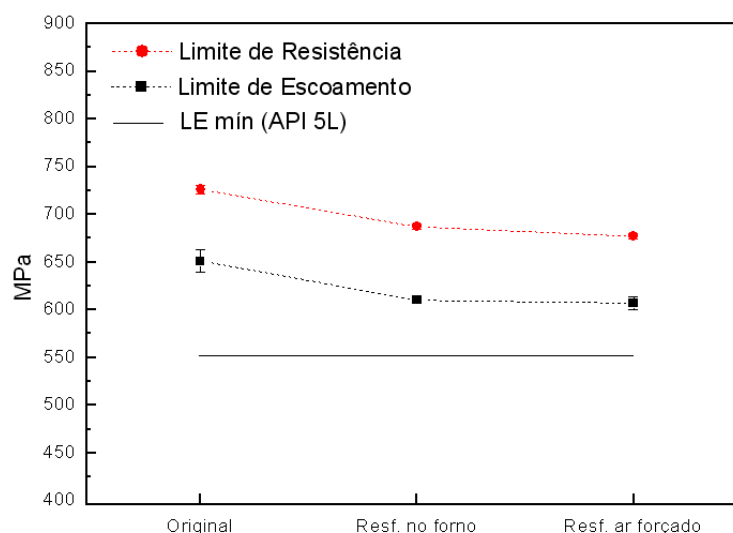


Figura 8 - Limites de escoamento e resistência da parte reta revenida.

Os tratamentos térmicos pós-curvamento apresentados até aqui foram todos realizados a 500°C por 1h, entretanto, este parâmetro pode não ser o mais adequado para elevar o limite de escoamento do aço. Para avaliar qual seria a melhor temperatura de revenido, foi realizada uma série de testes com diferentes temperaturas de revenido. Para estes testes, foram utilizadas partes da região curvada em fábrica do tubo B, após curvamento e sem tratamento térmico. Estes tratamentos estão descritos na **Tabela 6**.

Tabela 6- Tratamentos térmicos realizados em laboratório.

Tubo	Processo	Região avaliada
B	Aquecimento a 400°C por uma hora seguido de resfriamento ao ar calmo.	Curva
B	Aquecimento a 550°C por uma hora seguido de resfriamento ao ar calmo.	Curva
B	Aquecimento a 600°C por uma hora seguido de resfriamento ao ar calmo.	Curva
B	Aquecimento a 650°C por uma hora seguido de resfriamento ao ar calmo.	Curva
B	Aquecimento a 700°C por uma hora seguido de resfriamento ao ar calmo.	Curva

Os maiores valores de limite de escoamento foram atingidos após tratamento térmico nas temperaturas de 600 °C e 650 °C (Figura 9). A **Figura 10a** mostra que existe um pico nos valores de dureza nesta faixa de temperatura. O aumento nos valores de dureza e resistência estão relacionados com o fenômeno do endurecimento secundário devido à presença de elementos de liga. Alguns elementos de liga, como por exemplo, Cr, Mo, W, V, Nb e Ti são fortes formadores de carbonetos.

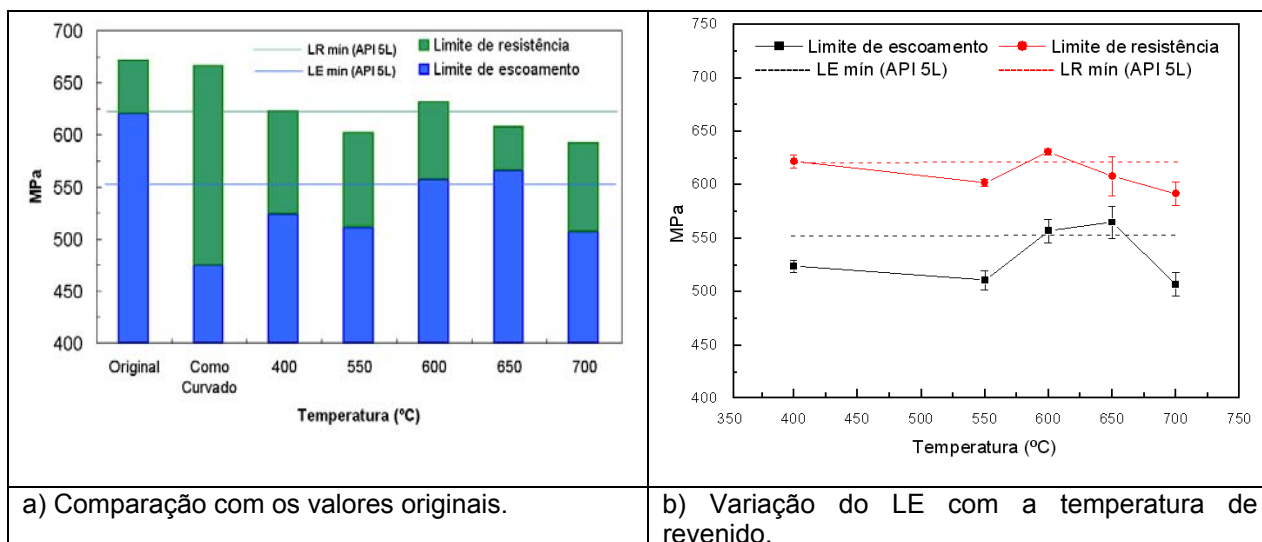


Figura 9 - Resultados dos tratamentos térmicos nos limites de escoamento e resistência.

A **Figura 10b** mostra os valores de energia absorvida em função do tratamento térmico realizado. Para todas as temperaturas de revenido, os valores de energia absorvida estão bem acima do mínimo de 68J a 0°C estabelecido por norma.

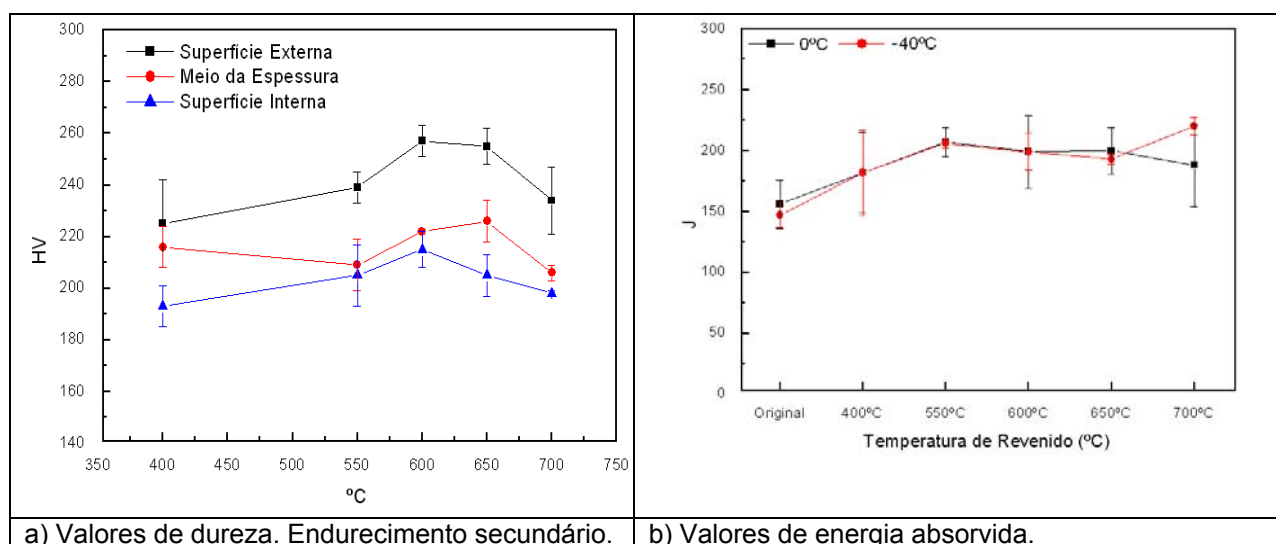


Figura 10 - Resultados de dureza e energia absorvida.

Os carbonetos presentes no aço deste estudo foram solubilizados na fase austenítica devido à elevada temperatura atingida durante o processo de curvamento. Com o resfriamento rápido, com água, não houve tempo para que ocorresse a precipitação, permitindo que os elementos de liga permanecessem em solução sólida. Neste caso, a formação dos carbonetos só voltaria a ocorrer durante a etapa de revenimento.

Segundo Honeycombe,^[7] para a maioria dos elementos formadores de carbonetos (Cr, Mo, W, V, Nb e Ti), a formação ocorre quando se atinge temperaturas de revenido entre 500 e 600 °C. A temperaturas mais baixas, os elementos de liga não difundem suficientemente rápido para permitir a nucleação de carbonetos. A formação de carbonetos entre 500 e 600 °C é acompanhada por um aumento de resistência, geralmente acima daquela que é obtida com o material na condição de como temperado (**Figura 9a**). Este fenômeno é conhecido como

endurecimento secundário, e ocorre quando é formada uma nova e fina dispersão de carbonetos, a qual ao atingir um valor crítico de temperatura, a resistência do aço atinge um valor máximo. À medida que a dispersão de carbonetos engrossa lentamente a partir deste valor, a resistência diminui (**Figura 9b** e **Figura 10a**).

No revenido de aços contendo V, o pico de endurecimento ocorre em temperaturas na faixa de 550 a 650 °C. A 700 °C os carbonetos engrossam rapidamente e começam a esferoidizar. Apesar disto, a fina dispersão de carbonetos de V pode ser mantida até temperaturas próximas de 700 °C.^[7]

Alguns elementos fortemente formadores de carbonetos como Nb, V e Ti (todos estes presentes no aço deste estudo), tem efeitos no revenido que não são proporcionais à sua concentração. Em concentrações de 0,1% ou inferiores, desde que a temperatura de revenido seja suficientemente alta (550 a 650 °C), formam uma dispersão de carbonetos muito fina. Esta dispersão pode provocar um grande aumento do endurecimento secundário, como aquele observado nos dados de dureza entre 600 e 650 °C (**Figura 10a**), o que evidencia a importância destes elementos fortemente formadores de carbonetos na obtenção de elevados níveis de resistência.^[7]

CONCLUSÕES

De acordo com os resultados obtidos, a temperatura de austenitização mais indicada para o curvamento dos tubos está entre 900 e 1000 °C. O resfriamento em água aplicado uniformemente em toda a peça, resultou em uma microestrutura homogênea ao longo da espessura e com elevados valores de limite de escoamento. Esta microestrutura (resultante de altas taxas de resfriamento) é fácil de ser obtida em testes de laboratório e difícil de ser conseguida no processo de curvamento real com resfriamento externo. Para tentar reproduzir esta microestrutura e obter melhores resultados de limite de escoamento para o aço deste estudo, API 5L X80, é necessário aumentar a velocidade de resfriamento no processo industrial. Isto pode ser conseguido através da aplicação de resfriamento simultâneo externo e interno no tubo.

O tratamento térmico de 500 °C por uma hora, tradicionalmente realizado após o curvamento, provoca um aumento no limite de escoamento da parte curvada e não influencia negativamente as propriedades mecânicas da parte reta. Entretanto, a temperatura que resulta em maiores valores de limite de escoamento está entre 600 e 650 °C. Nesta faixa de temperatura o fenômeno do endurecimento secundário atinge o valor máximo de resistência.

Uma boa solução para otimizar o processo de curvamento de tubos API 5L X80 pode ser a aplicação do resfriamento com água de forma mais homogênea ao longo da espessura, seguido de revenido entre 600 e 650 °C por uma hora.

Agradecimentos

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

REFERÊNCIAS

- 1 Revista Petrobras. A Nova Era do Gás Natural. Ano 12, Nº 118. P. 10-15. Rio de Janeiro. Outubro de 2006.
- 2 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.
- 3 Specification for Line Pipe, API Specification 5L. American Petroleum Institute, March. 2004.
- 4 Standard Test Methods and Definitions for Mechanical Testing of Steel Products. ASTM A 370. American Society for Testing and Materials. 2003.
- 5 IKAWA, H.; OSHIGE, H.; TANOUE, T. Effect of Martensite-Austenite Constituent on HAZ Toughness of a High Strength Steel. IIW. DOC IX – 1156-80.
- 6 BISS, V.; CRYDERMAN, L. Metallurgical Transactions, 2. 2267-76. August, 1971.
- 7 Honeycombe, R.W.K. Steels, Microstructure and Properties. London. 1981.