



SIMULAÇÃO DOS CICLOS TÉRMICOS DO PROCESSO DE CURVAMENTO POR INDUÇÃO EM UM TUBO DE AÇO API 5L X80¹

Antônio Marcelo de Meireles²
Jeremias Fortini³
Marcos Ponciano de Souza⁴
Luiz Brandão⁵

Resumo

Este trabalho teve como objetivo avaliar a influência dos parâmetros do processo de curvamento por indução, velocidade e temperatura, nas propriedades mecânicas de um tubo de aço da classe API 5L X80. O processo de curvamento por indução é um método de conformação mecânica a quente capaz de executar curvas de pequenos raios e grandes ângulos com grande qualidade dimensional. Foi utilizado para o estudo, um tubo de 34 polegadas de diâmetro e 19,05 mm de espessura. Para avaliar a evolução das propriedades mecânicas do aço do tubo, ciclos térmicos do processo de curvamento foram aplicados ao tubo reto simulando o processo, porém sem realizar o curvamento, desconsiderando assim, o efeito da deformação plástica no aço. Os ciclos térmicos empregados foram na temperatura de 980°C aplicando as velocidades de 0,3 mm/s, 0,9 mm/s e 1,4 mm/s. E para a velocidade de 0,9 mm/s, foram utilizadas ainda as temperaturas de 900°C e 1.080°C. Ensaios de tração, impacto Charpy e dureza HV10 foram realizados em cada parte do tubo submetida aos ciclos térmicos. Como resultado, verificou-se que o aço teve suas propriedades otimizadas na condição de temperatura a 980°C e velocidade de 0,9 mm/s. Nesta condição, os requisitos especificados pela norma API 5L foram atendidos.

Palavras-chave: Curvamento por indução; API 5L X80.

SIMULATION OF INDUCTION BENDING PROCESS THERMAL CYCLES IN AN API 5L X80 GRADE STEEL PIPE

Abstract

The aim of this work was to evaluate the influence of the induction bend process parameters, velocity and temperature, in the mechanical properties of a steel pipe API 5L X80 grade. The induction bending is a hot forming process that is able to perform small radius and large angles bends with high dimensional quality. For this study, it was used a 34" outside diameter pipe with 19.05 mm of wall thickness. To evaluate the mechanical properties of steel pipe, thermal cycles of the bending process were applied to the straight pipe in order to simulate the process without performs the bend, disregarding the plastic deformation effects in the steel. The thermal cycles were carried out at 980 degrees Celsius 0.3, 0.9 for 1.4 mm/s applied speeds and at 0.9 mm/s it was carried out at 900 and 1080 degrees Celsius. Tensile test, Charpy impact test and HV10 hardness test were performed in each part of the pipe subjected to heat cycles. As a result, it was found that the steel pipe reached the optimum mechanical properties at 980 degrees Celsius and 0.9 mm/s as bending speed. In this condition the requirements specified by API 5L standard were met.

Key words: Induction bending; API 5L X80.

¹ Contribuição técnica ao 65º Congresso Anual da ABM, 26 a 30 de julho de 2010, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

² Eng. Metalúrgico, M.Sc. PROTUBO. marcelo@protubo.com.br

³ Engenheiro de Materiais, AGGC. jefortini@gmail.com

⁴ Technological Coordinator, Tenaris Confab. mpsouza@confab.com.br

⁵ Eng. Metalúrgico, D.Sc. Professor Associado. IME. brandao@ime.eb.br

1 INTRODUÇÃO

Tubos de grandes diâmetros fabricados a partir chapas oriundas do processo de laminação controlada são comumente empregados para construção dos dutos para transporte de óleo e gás. Os aços utilizados são os de alta resistência e baixa liga (ARBL), uma vez que, requerem um custo relativamente baixo, boa resistência mecânica e soldabilidade. O Instituto Americano de Petróleo regulamenta por meio da norma API 5L 2007,⁽¹⁾ a fabricação destes aços e dos tubos para a construção de dutos.

Na construção de gasodutos para operar em alta pressão, busca-se utilizar tubos de aços de elevada resistência mecânica com espessuras de parede reduzidas. Isto resulta em redução dos custos com os projetos de construção dos dutos.

Em um duto terrestre, dependendo da topografia do terreno, é consistido de trechos retos e regiões de curvas para acompanhar o relevo e contornar os estorvos à sua construção. Os processos de curvamento de tubos empregados na construção de dutos são, basicamente, o a frio realizado em campo e o a quente com aquecimento por indução eletromagnética de alta frequência. O curvamento frio possui a versatilidade de ser realizado no próprio local da construção do duto, através de equipamentos hidráulicos, porém é limitado a realizar curvas de grandes raios e pequenos ângulos de curvatura. O processo a quente por indução é capaz de realizar curvamentos com raios de até três vezes o diâmetro do tubo (3D) e grandes ângulos para aplicações em dutos terrestres e submarinos.

No processo de curvamento por indução, uma das extremidades do tubo é empurrada por um carro impulsor que aplica uma força de impulsão de curvamento numa velocidade constante. A outra extremidade do tubo é fixada por um grampo em um braço giratório que aplica um momento fletor de modo a realizar uma deformação contínua sob um determinado raio de curvatura, como mostra a Figura 1. O curvamento ocorre no interior da bobina de indução, onde o tubo aquece rapidamente seguido pelo curvamento e, finalmente, resfriamento rápido pela superfície externa do tubo por jatos de água emitidos pela própria bobina de indução, que cessa assim, o aquecimento e conseqüentemente, a deformação plástica.

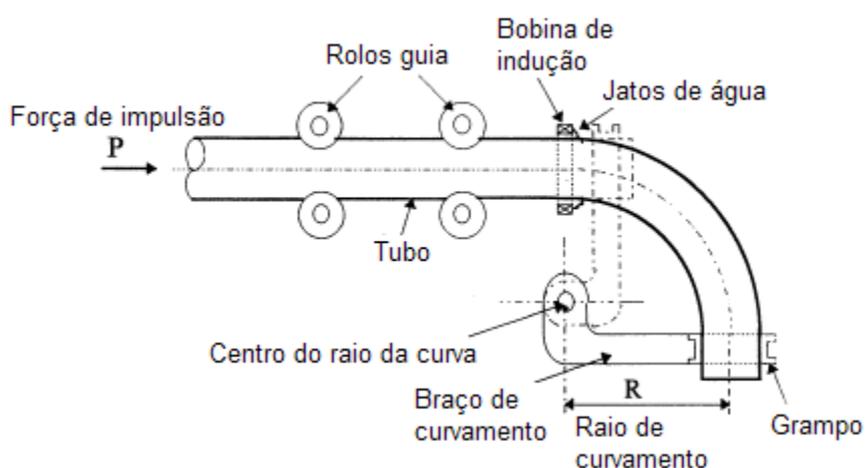


Figura 1. Curvamento pelo processo de aquecimento por indução de alta frequência.

Os principais parâmetros do processo de curvamento por indução são: temperatura de aquecimento do tubo, velocidade imposta pelo carro impulsor e a pressão/vazão da água ejetada pela bobina de indução. Apesar de todo o processo de

aquecimento, curvamento e resfriamento não ultrapassar de um minuto, pode provocar alterações microestruturais significativas no aço e, conseqüentemente, alterações nas propriedades mecânicas. Hashimoto et al.⁽²⁾ afirmam que uma temperatura suficientemente alta para a transformação austenítica permite ocorrer transformação bainítica durante a alta taxa de resfriamento.

Os aços API 5L X80 possuem uma microestrutura muito particular por serem fabricados sob condições de laminação controlada extremamente otimizada. Quando este material é submetido ao processo de curvamento, sua microestrutura é totalmente modificada e, conseqüentemente, suas propriedades mecânicas. O objetivo deste estudo foi aprofundar o conhecimento atual sobre a correlação dos parâmetros do processo de curvamento, temperatura e velocidade, com as propriedades mecânicas de tubos de alta resistência mecânica e estabelecer condições ótimas de fabricação de curvas a partir de tubos de graus de resistência elevada.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

Foi escolhido para este estudo, um tubo de aço da classe API 5L X80, de 34" de diâmetro, fabricado pelo processo UOE-SAWL na TENARIS CONFAB. O tubo foi obtido a partir de chapa fabricada pela USIMINAS, através do processo de laminação controlada. Sua composição química está descrita na Tabela 1.

Tabela 1. Composição química do tubo utilizado em percentual em peso

C	S	Al	Si	P	Ti	V	Cr
0,06	0,003	0,016	0,33	0,013	0,015	0,017	0,086
Mn	Nb	Ni	Mo	B	N	CE _{Pcm}	CE _{IIV}
1,68	0,033	0,019	0,318	0,0001	0,0063	0,18	0,43

O estudo consistiu em realizar simulações de ciclos térmicos do processo de curvamento por indução no tubo reto como recebido a fim de avaliar as influências dos parâmetros do processo, velocidade e temperatura, nas propriedades do aço sem a influência da deformação de curvamento, ou seja, sem realizar o curvamento. Para que cada um destes parâmetros fosse avaliado isoladamente, fez-se variar apenas um e os demais, incluindo a vazão da água de resfriamento, foram mantidos constantes.

As simulações dos ciclos térmicos aplicados ao tubo estão descritos na Tabela 2 e apresentados esquematicamente na Figura 2. As taxas de resfriamento entre 800 e 300°C foram de aproximadamente 12°C/s e 30°C/s nas superfícies interna e externa à parede do tubo, respectivamente. As medições das taxas foram realizadas por termopares soldados diretamente na superfície da parede do tubo somente na simulação com a temperatura de 980°C e velocidade d e 0,9 mm/s.

Tabela 2. Parâmetros de velocidades e temperaturas utilizadas nas simulações

Ciclos	Condições de velocidade e temperatura		Temperaturas reais obtidas	Pressão da água de resfriamento
Ciclo 1	0,9 mm/s	900°C	905±14°C	0,05 MPa
Ciclo 2		980°C	986±14°C	
Ciclo 3		1.080°C	1080±18°C	
Ciclo 4	0,3 mm/s	980°C	980±20°C	
Ciclo 5	1,4 mm/s		986±13°C	

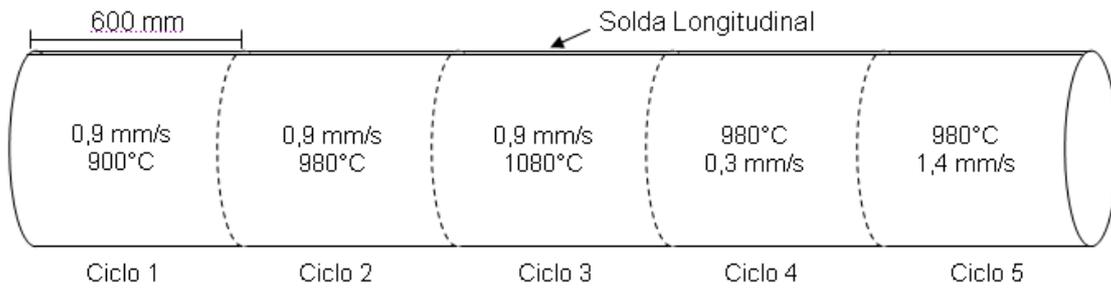


Figura 2. Ciclos térmicos aplicados ao tubo reto.

As simulações dos ciclos térmicos aplicados ao tubo foram realizadas na máquina de curvamento por indução do tipo HR-38BG da PROTUBO com capacidade de processar diâmetros de até 38”.

Os cupons, que são porções de amostras do material, foram cortados do tubo por maçarico utilizando-se resfriamento com água para evitar aquecimento dos mesmos. Em seguida, estes cupons foram aparados por serra a frio com líquido refrigerante para remoção da região termicamente afetada pelo corte e posteriormente, foi realizada a usinagem dos corpos de prova.

As caracterizações mecânicas consistiram em ensaios de tração e impacto a 0°C na direção transversal ao comprimento do tubo, conforme requerido pela norma do material, API 5L 2007. Adicionalmente, foram realizados ensaios de tração e impacto a -30°C na direção longitudinal e impacto a -30°C na transversal. Três corpos de prova para cada tipo de ensaio foram removidos de cada região simulada do tubo e preparados conforme a ASTM A370. A caracterização mecânica incluiu também o mapeamento da dureza HV10 conforme ASTM E92 realizada na seção transversal à parede do tubo conforme mostrado esquematicamente na Figura 3.

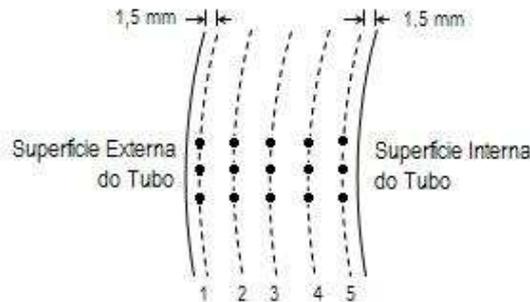


Figura 3. Mapeamento de dureza na seção transversal ao sentido longitudinal do tubo.

3 RESULTADOS

A Figura 4 mostra os resultados dos ensaios de tração realizados nas direções longitudinal e transversal ao tubo como recebido e após as simulações na temperatura de 980°C e nas velocidades de 0,3, 0,9 e 1,4 mm/s. O limite de resistência, assim como, o limite de escoamento na direção transversal para todos os ciclos aplicados ficaram acima do mínimo determinado pela norma API 5L.

O limite de escoamento na direção longitudinal, apesar de não ser um requisito da norma API 5L, apresentou queda nos valores quando comparados com o tubo mãe onde se empregou a velocidade de 0,3 mm/s. A Figura 4 apresenta os resultados

obtidos comparando-os com os limites mínimos e máximos especificados na API 5L para o sentido transversal, assim como os resultados dos ensaios realizados adicionalmente no sentido longitudinal.

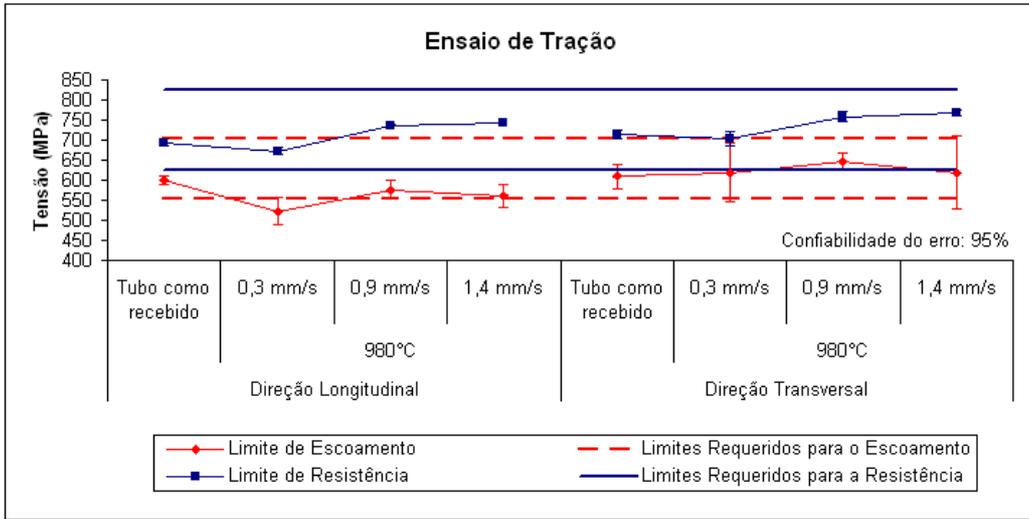


Figura 4. Ensaio de tração no tubo reto submetido à temperatura de 980°C e velocidades de 0,3 mm/s, 0,9 mm/s e 1,3 mm/s.

O gráfico com os resultados dos ensaios de tração no tubo reto submetidos às simulações nas temperaturas de 900°C, 980°C e 1.080 °C e na velocidade de 0,9 mm/s está mostrado na Figura 5. Para a direção transversal, conforme requerido pela API 5L, o limite de escoamento apresentou uma correlação muito forte com a temperatura empregada, chegando a atingir o limite máximo especificado na temperatura de 1.080°C. Os limites de resistência a apresentaram-se dentro da faixa especificada pela API 5L para todos os ciclos térmicos empregados. Observa-se também que, tanto o escoamento, quanto a resistência do aço apresentaram um ligeiro aumento com a temperatura utilizada. Apesar de não ser solicitado pela API 5L, foi realizado também ensaios de tração no sentido longitudinal onde se observou uma queda no limite de escoamento para a temperatura de 900°C e mudanças pouco significativas nas demais temperaturas.

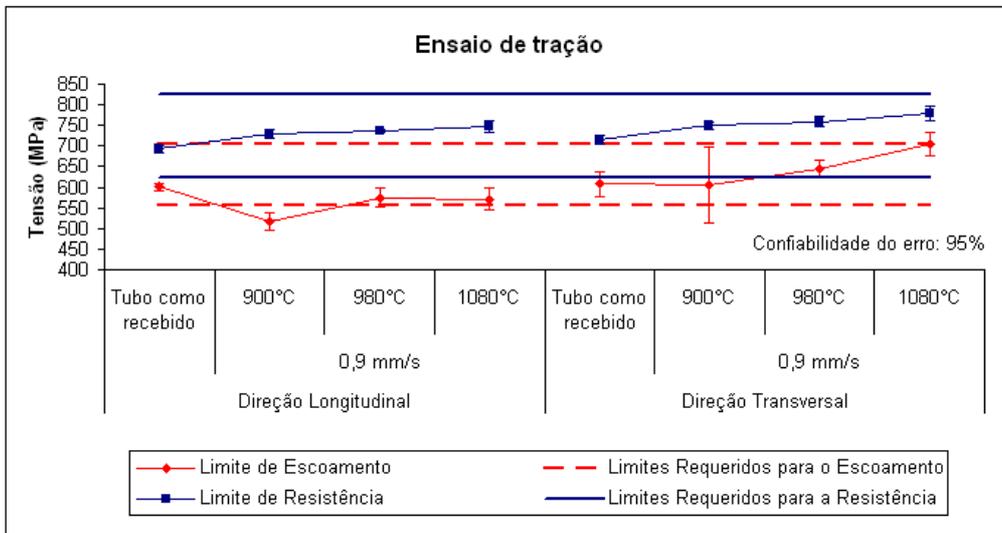


Figura 5. Ensaio de tração no tubo reto submetido às temperaturas de 900°C, 980°C e 1.080°C na velocidade de 0,9 mm/s.



Os diferentes ciclos térmicos empregados nas simulações tiveram grande influência na energia absorvida em impacto Charpy do material, como pode ser observado nos gráficos das Figuras 6 e 7. A energia absorvida foi avaliada nas temperaturas de 0°C, como exigido pela norma API 5L 2007 para dutos terrestres, e a -30°C como uma condição adicional. Todas as energias médias encontradas apresentaram-se superiores ao mínimo individual de 40J na temperatura de 0°C, como exigido pela norma para direção transversal assim como também na direção longitudinal para os testes realizados ao requerido pela API 5L para todos os ciclos térmicos empregados. Embora as médias de energias se apresentassem acima da mínima estabelecida, as margens de erro inferior ficaram abaixo nas regiões do tubo onde se utilizou, independentemente, velocidade de 0,3 mm/s e temperatura de 1.080°C. Foi observado que as energias absorvidas apresentaram um aumento expressivo em relação ao tubo mãe na condição recebida, principalmente, para a simulação na temperatura de 980°C.

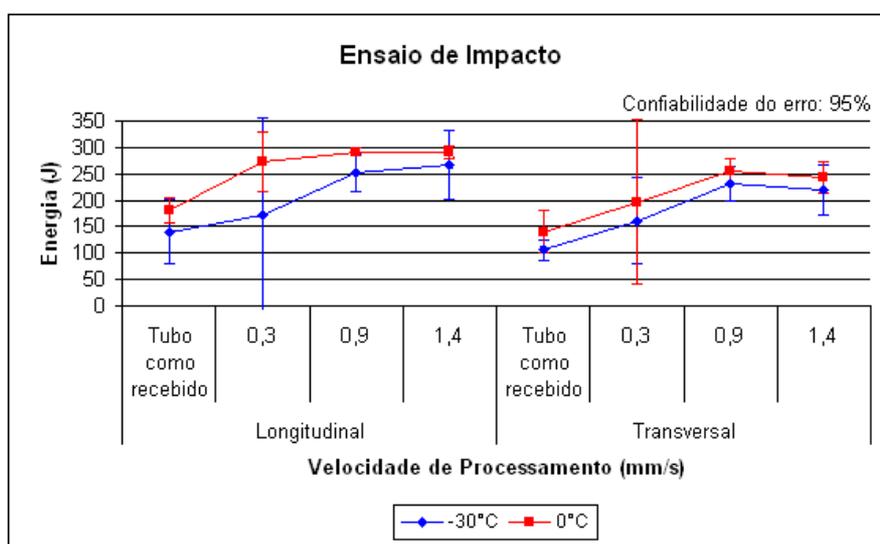


Figura 6. Ensaios de Impacto referentes às simulações na temperatura de 980°C.

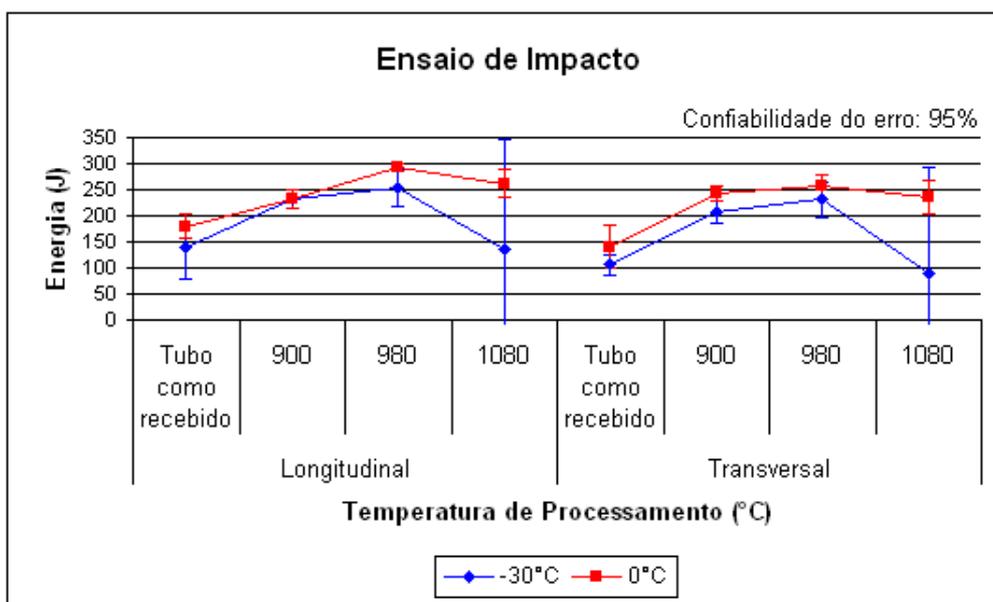


Figura 7. Ensaios de Impacto referentes às simulações na velocidade de 0,9 mm/s.



As Figuras 8 e 9 apresentam o perfil de dureza HV10 ao longo da espessura, nas posições indicadas da Figura 3. Observou-se que a dureza diminuiu da superfície externa da parede do tubo para a interna. A dureza medida na posição 1 do mapeamento da amostra simulada na velocidade de 1,4 mm/s e temperatura de 980° (Figura 8) foi 304 HV10 sendo, portanto, superior ao máximo especificado pelas normas de curvamento ISO 15590⁽³⁾ e ABNT NBR 15273,⁽⁴⁾ que é de 300 HV10.

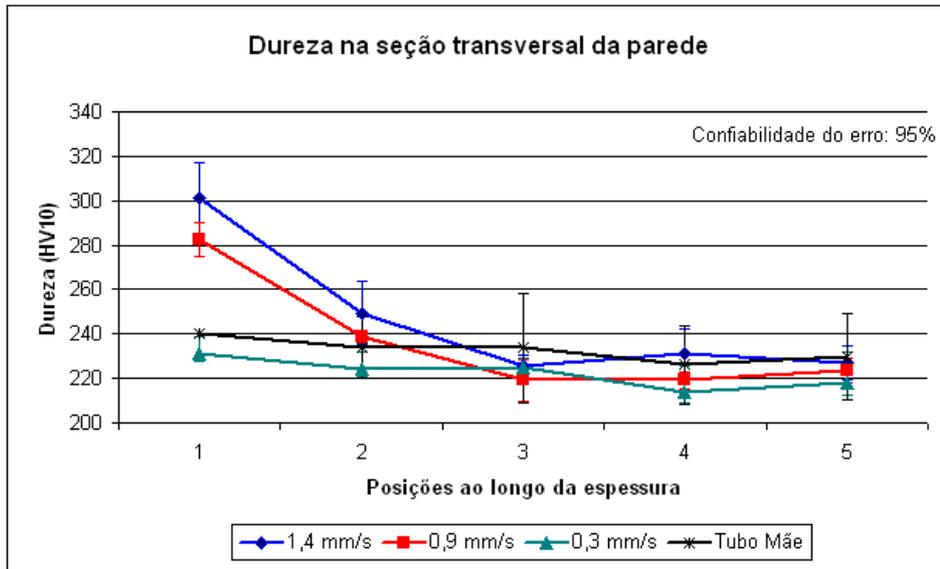


Figura 8. Dureza na seção da parede do tubo submetido às simulações na temperatura constante de 980°C.

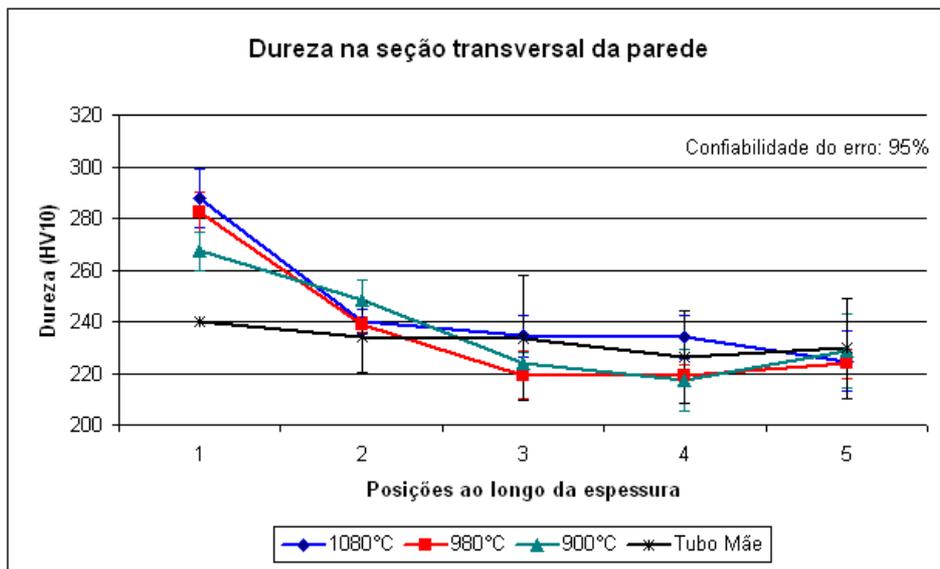


Figura 9. Dureza na seção da parede do tubo submetido às simulações na velocidade constante de 0,9 mm/s.

Notou-se também, que a dureza nas proximidades da superfície externa do tubo, posição 1, aumentou com a velocidade de avanço do tubo e com a temperatura utilizada. A partir do meio da espessura para a superfície interna não foram encontradas diferenças significativas entre os ciclos térmicos empregados.

4 DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

4.1 Influência da Velocidade

Observa-se na Figura 4 que o limite de resistência aumentou com a velocidade de processamento, enquanto o limite de escoamento apresentou um máximo para a velocidade intermediária (0,9 mm/s) dentre as empregadas. As justificativas para tais comportamentos podem estar no tempo de encharque a que o aço foi submetido, uma vez que para maiores velocidades menores são os tempos.

Notou-se também que ambos os limite de escoamento e de resistência na direção transversal apresentaram-se superiores à direção longitudinal para todas as velocidades investigadas. Batista⁽⁵⁾ teve resultados semelhantes numa caracterização de um tubo curvado e justificou que estas diferenças encontradas podem ser explicadas pela anisotropia plástica da chapa provocada pelo processo de laminação durante a sua fabricação.

Observa-se na Figura 6 que para todas as velocidades de processamento, houve um expressivo aumento na energia absorvida em impacto em relação ao tubo como recebido para ambas as temperaturas de -30 e 0°C. Batista⁽⁵⁾ realizou caracterização metalográfica em um tubo API 5L X80 curvado por indução e encontrou comportamento semelhante e justificou que o processo de curvamento gera uma microestrutura menos bandada e mais refinada, o que é benéfico para a tenacidade.

Notou-se também na Figura 8, que houve um gradiente de dureza HV10 na seção transversal à parede do tubo. Este comportamento é facilmente explicado pelo resfriamento com água realizado somente pelo lado externo do tubo. Fato que provocaria a formação de microestruturas de resfriamentos rápido somente nas proximidades da superfície externa da parede do tubo. O tempo em que o tubo foi submetido à temperatura do processo influenciou também na dureza. Observa-se que a dureza nas proximidades da superfície externa aumentou com a velocidade com que o tubo passa pela bobina de indução.

4.2 Influência Da Temperatura

Observou-se também uma correlação entre os limites de escoamento e de resistência do aço do tubo processado nas diferentes temperaturas e na velocidade de 0,9 mm/s (Figura 5). O tubo submetido às simulações teve seu limite de resistência maior que o encontrado para a condição como recebida. Este aumento foi gradual e contínuo com a temperatura. O limite de escoamento na direção transversal teve um comportamento similar, porém sua influência com a temperatura foi muito mais acentuada, chegando atingir 612 MPa na temperatura de 1.080°C. O limite de escoamento na direção longitudinal, apesar de não requerido pela norma API 5L, mostrou uma ligeira queda nos seus valores chegando ao mínimo na temperatura de 900°C. Porém, manteve a tendência de aumentar com a temperatura de processamento (Figura 5). De acordo com alguns experimentos com aços de alta resistência e baixa liga realizados por Martín et al.,⁽⁶⁾ a temperatura de transformação completa da ferrita/cementita para a austenita (A_{c3}) pode ocorrer acima de 900°C numa taxa de aquecimento de 10°C/s. Segundo Hashimoto et al.,⁽²⁾ as taxas de aquecimento por indução podem ocorrer na faixa de 10°C/S a 20°C/s (a transformação para a austenita pode não ter sido completa na simulação em que se

utilizou a temperatura de 900°C. Isso leva a redução da fração volumétrica das fases de resfriamento rápido, comprometendo assim, a resistência do aço.

Na simulação com a temperatura de 980°C, pode ter ocorrido a solubilização pronunciada dos carbonitretos de vanádio, quando comparado com um modelo termodinâmico desenvolvido por Hong et al.⁽⁷⁾ Os elementos de liga em solução sólida contribuem para estabilização da austenita aumentando a capacidade do aço de obter ferrita acicular no resfriamento, conforme afirmaram Ishikawa et al.⁽⁸⁾ e Zhao et al.⁽⁹⁾ Diante disto, sugere-se que na simulação com a temperatura de 1.080°C, a dissolução dos precipitados tenha sido demasiada, uma vez que o aço deste estudo possui baixo teor de nitrogênio (0,0063% em peso). Isso, portanto, deve ter contribuído para a formação de uma maior fração volumétrica da fase ferrita acicular em relação à ferrita poligonal, justificando assim, o elevado limite de escoamento do aço.

Enquanto a resistência do aço aumentou na simulação com a temperatura de 1.080°C, a energia absorvida em impacto Charpy na temperatura de -30°C, para ambas as direções longitudinal e transversal foi reduzida drasticamente (Figuras 6 e 7). Esta redução deve estar relacionada com o crescimento de grão austenítico promovido por uma considerável solubilização dos elementos microligantes, uma vez que na temperatura de 1080°C, esta solubilização pode ter sido muito acentuada, como foi discutido anteriormente. Baseando nestes resultados, sugere-se que o aço, a ser submetido ao processo de curvamento, contenha em sua composição com elevados percentuais de elementos microligantes que se solubilizam às temperaturas inferiores à de curvamento para estabilização da austenita e também elementos de ligas de altas temperaturas de solubilização como o Ti para coibir o crescimento de grão austenítico durante o curvamento.

A dureza também sofreu influência da temperatura de processamento. Pode-se observar na Figura 9 que houve uma tendência de aumento da dureza com a temperatura. Este fato pode ser justificado pelo maior percentual da fase ferrita acicular obtida pelo resfriamento rápido de uma matriz austenítica rica em elementos de liga dissociados.

Notou-se, portanto que, através dos ensaios mecânicos realizados, que os parâmetros do processo, velocidade e temperatura, influenciam fortemente nas propriedades mecânicas do aço. E dentre as simulações realizadas, a que otimizou as propriedades do aço investigado foi a realizada na velocidade de 0,9 mm/s e na temperatura de 980°C. Nesses parâmetros, a transformação de ferrita para austenita deve ter sido completa e sem excessiva solubilização dos precipitados que impediram o crescimento de grão austenítico.

5 CONCLUSÕES

O objetivo deste trabalho foi avaliar a influência dos parâmetros do processo de curvamento por indução, temperatura e velocidade, para a obtenção de parâmetros ideais de fabricação de uma curva a partir de um tubo de aço da classe API 5L X80. Das simulações prévias realizadas por ciclos térmicos do processo de curvamento aplicados no tubo reto como recebido, pode-se concluir que:

- I. Dentre as simulações realizadas, a que otimizou as propriedades do aço investigado foi a realizada na velocidade de 0,9 mm/s e na temperatura de 980°C.

- II. Os limites de escoamento e de resistência apresentaram uma redução mais acentuada quando se aplicou independentemente, baixa velocidade (0,3 mm/s) e baixa temperatura (900°C) de processamento;
- III. O limite de resistência do aço apresentou uma tendência a aumentar com o aumento de ambos os parâmetros investigados, velocidade e temperatura;
- IV. Para as diferentes velocidades e temperaturas utilizadas, a energia absorvida no ensaio de Charpy apresentou-se superior quando comparada com o tubo como recebido, exceto para a simulação em que o tubo foi processado a 1080°C e os ensaios realizados a -30°C;
- V. As durezas da seção transversal à parede do tubo apresentaram tendência em aumentar com ambos os parâmetros, velocidade e temperatura, sendo que, a influência da velocidade foi mais acentuada;

Agradecimentos

Os autores agradecem a Tenaris Confab pelo fornecimento do tubo e a Protubo pela realização do curvamento e pelo financiamento dos ensaios mecânicos.

REFERÊNCIAS

- 1 API 5L – American Institute Petroleum. Petroleum and natural gas industries – Steel pipe for pipeline transportation. Forty-fourth edition, 2007;
- 2 HASHIMOTO, T., KOMIZO, Y., SAWAMURA, T., NAKADE, H., NAKATSUKA, Y. High Strength Hot-bent Pipe for Arctic Use. Transactions ISIJ, Vol. 26, 1986;
- 3 ISO 15590-1:2001. Petroleum and natural gas industries - Induction bends, fittings and flanges for pipeline transportation systems - Part 1: Induction bends;
- 4 ABNT NBR 15273: 2005 - Indústrias de petróleo e gás natural — Curvas por indução para sistema de transporte por dutos;
- 5 BATISTA, G. Z. Curvamento por Indução de Tubo da Classe API 5L X80. Dissertação de mestrado apresentada ao Departamento de Ciência dos Materiais e Metalurgia da PUC-Rio. Dezembro, 2005;
- 6 MARTÍN, D., S., CASTILLO, P. E. J., ANDRÉS, C. G. In situ of austenite formation by dilatometry in a low carbon microalloyed steel. Scripta Materialia 58 (2008) 926-929;
- 7 HONG, S. G.; JUN, H. J.; KANG, K. B.; PARK, C. G. Evolution of precipitates in the Nb-Ti-V microalloyed HSLA steels during reheating. Scripta Materialia 48 (2003)1201-1206;
- 8 ISHIKAWA, N.; ENDO, S., KONDO, J., TAKAGISHI, M. Development of X80 Grade Induction Bend Pipe. 21st International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering, June 23-28, 2002, Oslo, Norway;
- 9 ZHAO, M. C.; Yang, K.; Xiao, F. R.; Shan, Y. Y. Continuous cooling transformation of undeformed and deformed low carbon pipeline steels. Materials Science and Engineering A355 (2003) 126-136;