



PROPRIEDADES MECÂNICAS DO CORDÃO DE SOLDA DE TUBOS DE AÇO API 5L X80 CURVADO A QUENTE¹

Jeremias Fortini²

Antônio Marcelo de Meireles³

Marcos Ponciano de Souza⁴

Luiz Brandão⁵

Resumo

O objetivo do projeto é aprofundar o conhecimento atual da influência das variáveis do processo de curvamento por indução: temperatura, velocidade e raio de curvamento sobre as propriedades mecânicas do cordão de solda longitudinal de tubos Grau X80 produzido pelo processo UOE-SAWL de acordo norma API. Para esta análise foram realizados diversos ensaios mecânicos destrutivos e não destrutivos. Em uma primeira etapa, foi realizada a avaliação do ciclo térmico sobre as propriedades do aço a ser estudado. Diferentes regiões do tubo passaram pela bobina de indução, com diferentes temperaturas e velocidades, sendo submetidas ao aquecimento e resfriamento previstos no procedimento normal de curvamento, tornando possível verificar a influência isolada do ciclo térmico, sem a ocorrência da deformação plástica. Foram investigados a influência da temperatura e da velocidade do processo sobre as propriedades mecânicas do aço, tais resultados estão diretamente ligados ao diâmetro, espessura e principalmente à composição química do tubo. Posteriormente, a partir da análise dos resultados obtidos na primeira fase, uma condição de temperatura e velocidade foi selecionada para realização de um curvamento com um determinado raio de curvatura. A partir daí, foram avaliadas as propriedades de diferentes regiões da área curvada do tubo. Os resultados destas análises indicaram a necessidade de tratamento térmico após o curvamento. Foram realizados tratamentos térmicos de revenido em diversas temperaturas. A melhor condição de tratamento foi escolhida por meio da análise dos resultados dos ensaios mecânicos do material tratado.

Palavras-chave: Curvamento por indução; API 5L X80; Dutos para petróleo e gás; Cordão de solda.

MECHANICAL PROPERTIES OF FILLET WELD OF AN API 5L X80 GRADE STEEL PIPE BENDED BY HOT INDUCTION PROCESS

Abstract

The goal of this work is to deepen the current knowledge on the influence of the bending induction process variables such as: temperature, velocity and bending radius on the mechanical properties of the longitudinal fillet weld cord of the steel tube API 5L X80 fabricated by UOE-SAWL process. In order to proceed this analysis, several destructive and non destructive mechanical tests were performed. At first, the thermal cycle on the property of the steel was evaluated. Different regions of tube passed through the induction coil, with different temperatures and velocities, simulating heating and cooling cycles which are normally used on bending process, what makes possible the verification of the thermal cycle influence without plastic deformation. The influence of the temperature and the velocity of the process on the mechanical properties of the welding zone were investigated. These results are directly correlated to the diameter, thickness and chemical composition of the tube steel. Afterwards, based on the results of that simulation, one condition of temperature and velocity was selected to accomplish a bending with a certain curvature radius. From this point, the mechanical properties of different regions of the bended area of the tube were evaluated. The results of this analysis indicated that an additional heat treatment is necessary after bending. Temper heat treatments were executed for several temperatures. The best condition of treatment was chosen throughout the result analysis of the mechanical tests of the heat treated material.

Key words: Induction bending; API 5L X80; Pipe line lteel; Fillet weld.

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

² Engenheiro de Materiais. AGGC. jefortini@gmail.com

³ Eng. Metalúrgico, M.Sc. PROTUBO. marcelo@protubo.com.br

⁴ Coordenador de Tecnologia, TenarisConfab. mpsouza@confab.com.br

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



1 INTRODUÇÃO

A produção e a procura por petróleo e seus derivados têm aumentado significativamente nos últimos anos. O transporte destes materiais é geralmente realizado pelo sistema de dutos. Devido ao aumento da demanda, novas malhas de distribuição estão sendo construídas, de maneira que torne possível o abastecimento com baixo custo operacional de um maior número de consumidores.

A produção de tubos para abastecer este sistema, limita-se a tubos retos. Os tubos curvados são obtidos a partir de tubos retos que passam por algum processo de curvamento, podendo ser por conformação a quente ou a frio.

Segundo Batista,⁽¹⁾ na construção de um sistema de dutos, dependendo do perfil do terreno, cerca de 30% a 40% dos tubos podem ser curvados. A preferência é pelo curvamento a frio, uma vez que este pode ser realizado no campo. Silva et al.⁽²⁾ obtiveram uma curva de 19° e raio 27D (raio de 27 vezes o diâmetro), utilizando de um equipamento hidráulico, em tubos da classe API 5L X80.

Quando o raio de curvamento é muito pequeno, torna-se necessário que o tubo seja curvado a quente, por meio do processo de aquecimento por indução eletromagnética de alta frequência. Este processo prevê um aquecimento localizado e resfriamento rápido da seção do tubo que está sendo curvada, e embora não demore mais de um minuto, o processo pode provocar alterações microestruturais significativas no aço e, conseqüentemente, alterações nas suas propriedades mecânicas. O processo ainda inclui, quando necessário, a realização de tratamento térmico posterior ao curvamento a fim de ajustar as propriedades do tubo aos requisitos da norma. Por meio deste processo, é possível obter curvas com raio de até três vezes o diâmetro (3D). Para que o material atenda as propriedades requeridas pela sua especificação sem tratamento térmico posterior, é necessário que se aperfeiçoe os parâmetros de curvamento.

Os aços ARBL (Alta Resistência e Baixa Liga) têm sido utilizados com sucesso em aplicações que requerem um custo relativamente baixo, boa resistência mecânica e tenacidade. O Instituto Americano de Petróleo (API) tem regulamentado a fabricação dos aços e tubos para a produção de dutos, por meio da norma API 5L 2007⁽³⁾ (especificação para dutos). Os diferentes graus de resistência, especificados pela norma API 5L, podem encontrados nos aços ARBL. Eles apresentam (em sua estrutura original mais simples) microestrutura típica de ferrita-perlita. Sua composição química é similar a de um aço baixo-carbono, mas com micro-adições de Nb, Ti ou V.

Segundo Honeycombe,⁽⁴⁾ os elementos de liga Nb, V e Ti são adicionados ao aço com o objetivo de evitar o crescimento de grão nas altas temperaturas na laminação controlada e retardar a recristalização da austenita nos estágios finais do processo. Isto possibilita que a transformação austenita-ferrita ocorra a partir de uma austenita severamente encruada. O produto final deste processo é um aço com uma granulação ferrítica fina e, conseqüentemente, elevada resistência mecânica e tenacidade.

O processo "UOE-SAWL" é o mais utilizado na fabricação de tubos de grandes diâmetros a partir de chapa. A sigla "UOE-SAWL" representa as etapas do processo. A primeira etapa deste processo consiste na conformação a frio da chapa no formato de "U" e em seguida o "U" é conformado em "O". Em seguida, realiza-se o ponteamento das faces do "O" para que não ocorram alterações de diâmetro durante o processo de soldagem. Após o ponteamento, é executada a soldagem pelo processo de arco submerso (SAWL – *Submerged Arc Welding*), sendo o primeiro

passa interno e o segundo externo. Ensaios não destrutivos são realizados para garantir a ausência de defeitos na junta soldada. Após a soldagem, o tubo é submetido a uma expansão (“E”), que tem a finalidade de ajustar o seu diâmetro às tolerâncias especificadas pela norma API 5L. Finalmente, a inspeção dimensional e a pesagem do tubo são realizadas.

O processo de soldagem utilizado na fabricação do tubo em estudo, como mencionado, é realizado por arco submerso, utilizando-se, entretanto, a técnica de arcos múltiplos (*tandem-arc*).

Marques⁽⁵⁾ diz que neste processo, a coalescência entre os metais é obtida pelo aquecimento e fusão destes por um arco elétrico estabelecido entre um eletrodo metálico nu e a peça de trabalho. O arco ocorre sob uma camada de um material granular fusível, chamado “fluxo”, que é colocado sobre a região de solda, formando parte da escória e protegendo-o da contaminação atmosférica.

Paranhos⁽⁶⁾ diz que na técnica *tandem-arc*, dois ou mais arames são alimentados para uma mesma poça de fusão, sendo que cada eletrodo forma um arco elétrico controlado separadamente por cabeçote e fonte de energia independente. Cada eletrodo é regulado de forma independente, com o objetivo de produzir um efeito sobre o preenchimento do cordão de solda. O primeiro arco controla a penetração, o segundo tem um menor controle sobre a penetração, mas é fundamental para o controle do perfil do cordão de solda. O terceiro arco controla o perfil e o acabamento do cordão de solda.

No processo de curvamento por indução, uma das extremidades do tubo é empurrada por um carro impulsor a uma determinada velocidade e a outra é fixada por um grampo em um braço giratório que guia o tubo de modo a realizar uma deformação contínua, como mostra as Figuras 1 e 2. O curvamento se procede no interior da bobina de indução de alta frequência, onde o tubo aquece rapidamente seguido pelo curvamento e finalmente, o resfriamento rápido pelos jatos de água, emitidos da própria bobina de indução, que cessa assim, a deformação. O tempo de exposição do material ao calor pode variar em torno de 30 segundos a 60 segundos dependendo da velocidade de curvamento, ou seja, a velocidade com que o tubo passa pela bobina.

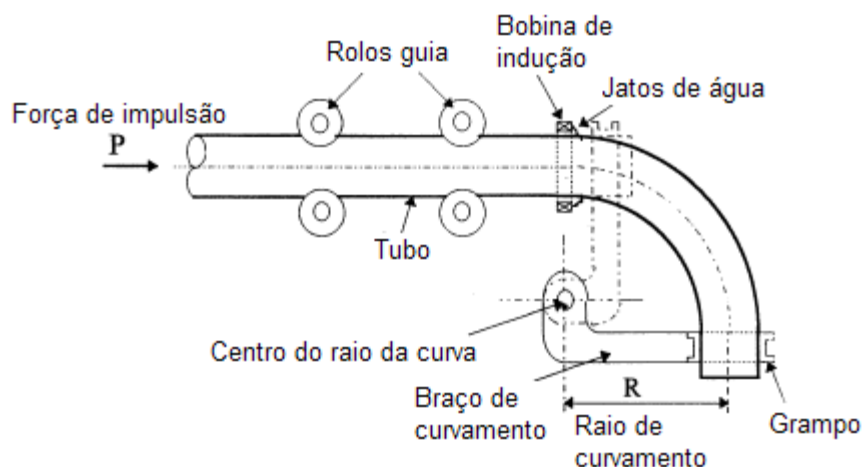


Figura 1. Reapresentação esquemática do curvamento por indução de alta frequência.



Figura 2. Curvamento por indução realizado na Protubo.

As variáveis que definem as propriedades finais do tubo curvado pelo processo de aquecimento por indução são: diâmetro, espessura, raio, velocidade de curvamento, temperatura de curvamento, resfriamento, composição química e processo de fabricação do tubo.

2 MATERIAL E MÉTODOS

Para este estudo foi utilizado um tubo API 5L X80 fabricado pelo processo UOE-SAWL, pela Tenaris Confab. A chapa para a confecção do tubo foi fabricada utilizando-se o processo de laminação controlada sem utilizar a técnica do resfriamento acelerado. Foi utilizado um tubo de 34" (863,6 mm) de diâmetro e 0,75" (19,05 mm) de espessura com 12 metros de comprimento.

A Tabela 1 mostra a composição química da chapa utilizada para a fabricação do tubo e os valores de carbono equivalente. A Tabela 2 mostra a composição química e carbono equivalente da solda.

Tabela 1. Composição química do tubo

Elementos de liga em peso (%)								
C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	Al
0,06	0,23	1,83	0,015	0,001	0,122	0,208	0,011	0,035
Cu	B	N	Nb	Ti	V	CE (Pcm)		CE (IIW)
0,011	0,0001	0,0063	0,061	0,017	0,022	0,18		0,44

Tabela 2. Composição química da solda

Elementos de liga em peso (%)								
C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	Al
0,06	0,33	1,68	0,13	0,003	0,08	0,318	0,019	0,016
Cu	B	N	Nb	Ti	V	CE (Pcm)		CE (IIW)
0,024	0,0001	-	0,033	0,015	0,017	0,18		0,43

Primeiramente foi realizada a avaliação do ciclo térmico do processo sobre as propriedades mecânicas do aço e do cordão de solda. Para isto, parte do tubo passou pela bobina de aquecimento da máquina de curvamento simulando o processo. Neste caso, a influência do ciclo térmico foi avaliada sem a ocorrência concomitante de deformação plástica, ou seja, sem a realização do curvamento. O tubo passou pela bobina de indução, sofrendo o aquecimento e resfriamento conforme procedimento normal de curvamento, porém sem ser curvado. Então, apenas foi investigada a influência da temperatura e velocidade do processo sobre

as propriedades mecânicas do aço do tubo e do cordão de solda, foco deste trabalho.

Para análise da influência da temperatura nas propriedades foram realizados três diferentes testes: 900°C, 980°C e 1.080°C, mantendo a velocidade constante em todos os casos em 0,9 mm/s e sem realizar o curvamento. Posteriormente, foram realizados mais dois testes variando as velocidades em 0,3 mm/s e 1,4 mm/s e mantendo a temperatura constante em 980°C. Em todos os casos o resfriamento foi com água à temperatura ambiente somente pelo lado externo ao tubo com pressão de 0,05 MPa.

Posteriormente, a partir da análise dos resultados obtidos na primeira fase, uma condição de temperatura e velocidade foi selecionada para realização do curvamento, onde foi utilizado o raio de curvamento de 5D. A partir daí, foram avaliadas as propriedades mecânicas das diferentes regiões da área curvada do tubo.

O aquecimento foi aplicado somente na região curvada, criando duas zonas de transição: uma ao ligar a bobina (início do processo) e outra ao desligar (fim do processo). As extremidades retas permaneceram em seu estado original (Figura 3).

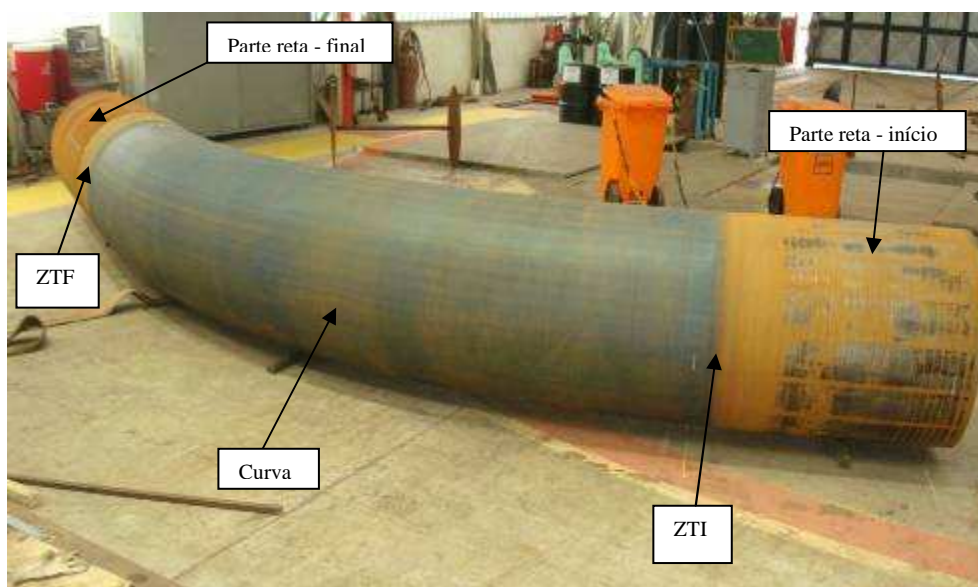


Figura 3. Tubo curvado. ZTI = Zona de transição inicial, ZTF = Zona de transição final

Para o ensaio de tração na região soldada, foram utilizados três corpos de prova retirados na direção transversal ao sentido de laminação da chapa (transversais à solda). Foram utilizados os CP's prismáticos de 1" confeccionados de acordo com a norma ASTM A 370.⁽⁷⁾

O ensaio Charpy foi realizado segundo as normas API 5L, ASTM A 370 e NBR 15273.⁽⁸⁾ Os ensaios foram realizados nas temperaturas de -30°C e 0°C, com 3 CP's para cada temperatura de ensaio. Os Cp's foram removidos no meio da sua espessura da parede do tubo.

Para o ensaio de dureza, foi utilizado o método de microdureza Vickers com carga aplicada de 300 g por 15 s. As medições de dureza foram realizadas em três regiões ao longo da espessura: a 2 mm da superfície interna do tubo (I), no centro da espessura (C) e a 2 mm da superfície externa (E). As impressões foram feitas no metal de base, na zona termicamente afetada e no metal de solda. Estas foram distanciadas uma da outra da seguinte maneira: metal de base 1 mm, zona termicamente afetada 0,5 mm e metal de solda a 1 mm da linha de fusão e no

centro. Os pontos vermelhos da Figura 4 indicam os locais onde foram realizadas as leituras de dureza na junta soldada.

Os ensaios de dureza foram realizados de acordo com as normas ASTM E 92⁽⁹⁾ e ABNT NBR 15273.

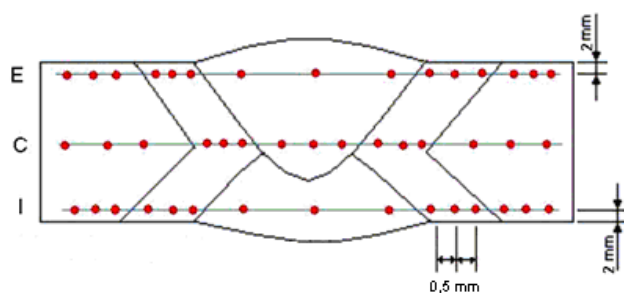


Figura 4. Local de medição da dureza Vickers das juntas soldadas. E = Superfície externa do tubo; C = Centro da espessura; I = Superfície interna do tubo

Foram realizados ensaios não destrutivos (END) de ultrassom e partículas magnéticas no cordão de solda, com a finalidade de revelar possíveis discontinuidades no mesmo, como trincas e subtrincas. O ensaio de ultrassom foi realizado de acordo com as normas PETROBRÁS N1594 F e API 5L. Já o ensaio de partículas magnéticas seguiu as normas PETROBRÁS 1598 E e API 5L.

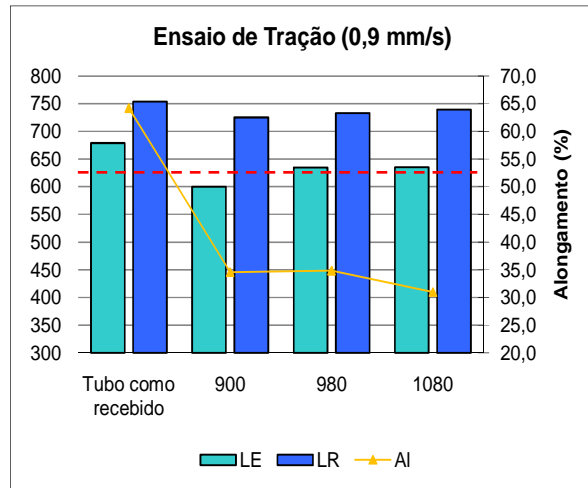
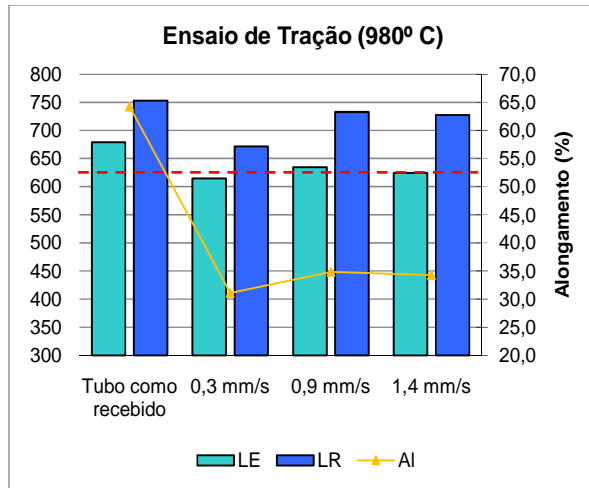
3 RESULTADOS

As Figuras 5 e 6 apresentam os ensaios de tração realizados na região do cordão de solda em partes do tubo submetidas a diferentes condições de temperatura de aquecimento e velocidade com que passam através da bobina de aquecimento. Nas amostras da Figura 5 manteve-se a velocidade constante em 0,9 mm/s e variou-se a temperatura em 900°C, 980°C e 1.080 °C. Nas amostras da Figura 6 a temperatura permaneceu constante em 980 °C e as velocidades variaram em 0,3 mm/s, 0,9 mm/s e 1,4 mm/s.

Nos resultados apresentados na Figura 5 observou-se que em todas as condições ocorreram reduções nos valores dos limites de escoamento e resistência à tração, no entanto as reduções sob 900°C foram superiores as demais temperaturas.

Nos resultados apresentados na Figura 6 também se observou que em relação ao material como recebido houve diminuição tanto do limite de escoamento como na resistência para todas as velocidades empregadas. As maiores perdas foram observadas para a velocidade 0,3 mm/s.

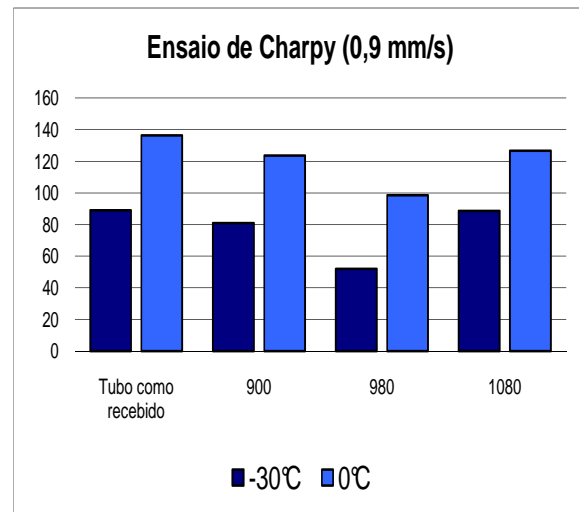
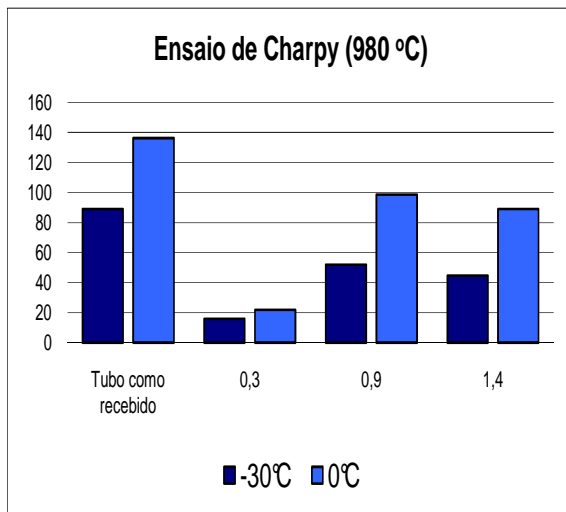
Apesar das reduções dos limites de escoamento e de resistência à tração citados, estes ficaram acima do requisito mínimo estabelecido pela norma API 5L para a região soldada de tubos grau X80 PSL 2 que é de mínimo de 625 MPa para o limite de resistência à tração. Observou-se ainda que as fraturas ocorreram fora do metal de solda e, para da maior parte dos CP's ensaiados, fora da ZTA.



Figuras 5 e 6. Resultados dos ensaios de tração realizados na região do cordão de solda submetidos a diferentes temperaturas de aquecimento sob velocidade temperatura e constante respectivamente. LE = Limite de Escoamento, LR = Limite de Resistência, AI = Alongamento

Nas Figuras 7 e 8 estão apresentados os resultados dos ensaios de impacto Charpy-V realizados no cordão de solda. Os resultados estão apresentados da mesma forma que dos ensaios de tração, divididos por velocidade e temperatura constantes.

Assim como observado nos ensaios de tração, houve uma redução nos valores de energia absorvida para todas as amostras submetidas aos ciclos térmicos de curvamento em relação ao material como recebido. No entanto, somente a amostra aquecida a 980°C sob velocidade de 0,3 mm/s ficou abaixo do estabelecido pela norma API 5L, que determina que a energia absorvida mínima no metal de solda e na ZTA deve ser 27 J para ensaios realizados a 0°C.



Figuras 7 e 8. Resultados dos ensaios de Charpy-V realizados na região do cordão de solda submetidos a diferentes temperaturas de aquecimento sob temperatura e velocidade constante respectivamente.

A partir da análise dos resultados obtidos nas diversas condições de temperatura e velocidade foi escolhida a condição que melhor atendeu aos requisitos das normas ABNT NBR 15273 e API 5L tanto na região da solda como no metal de base. A condição escolhida foi para velocidade de 0,9 mm/s e temperatura de 980°C.

O tubo foi curvado na condição de 0,9 mm/s e 980°C com raio de curvatura de 5D, que é o raio mais utilizado em sistemas de dutos terrestres. Foram realizados ensaios não destrutivos e mecânicos para verificar se o curvamento atendeu os requisitos estabelecidos pelas normas citadas acima. Não foram encontradas descontinuidades no cordão de solda por ocasião da realização dos ensaios de ultrassom e partículas magnéticas. Os ensaios de tração foram realizados em CP's retirados da zona de transição inicial (ZTI), localizada entre a parte reta do tubo que não foi aquecida e o início da curva, da zona de transição final (ZTF), localizada logo após a região curvada e no meio da região curvada. Tais regiões podem ser observadas na Figura 3. Como pode ser observado na Figura 9, os limites de escoamento dos CP's de todas as regiões estudadas tiveram uma redução quando comparados ao limite de escoamento do tubo como recebido, sendo que na ZTI a queda foi de aproximadamente 36%. Entretanto, a norma API 5L não especifica critérios para o limite de escoamento e alongamento na região da solda, estabelece apenas o limite de resistência à tração mínimo de 625 MPa. Os limites de resistência dos CP's ficaram acima deste valor, suprindo os requisitos da norma. Esta não especifica escoamento para solda, porque entende que as deformações elástica e plástica não são uniformes. Isto porque tanto a solda quanto o metal de base estão compreendidos no interior da área útil do corpo de prova do Cp.

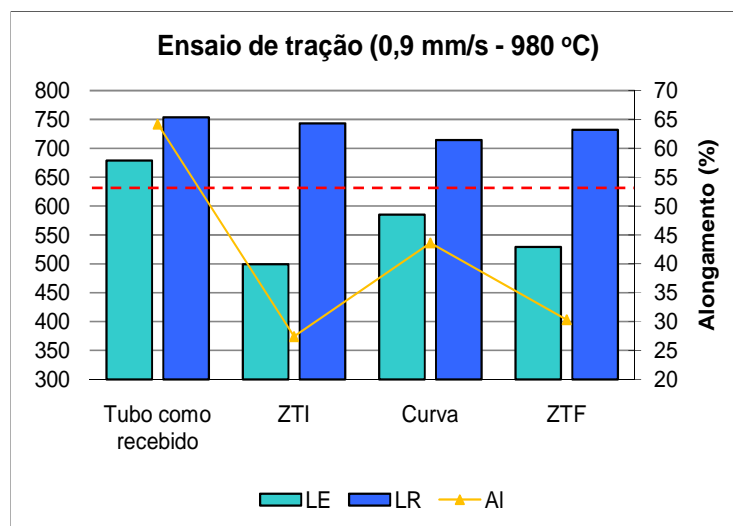


Figura 9. Resultados dos ensaios de tração na região da solda do tubo curvado. LE = Limite de Escoamento, LR = Limite de Resistência, AI = Alongamento

Foram realizados ensaios de Charpy-V no trecho reto e na região curvada nos seguintes pontos: centro da solda, linha de fusão (lf), 2 mm da linha de fusão (lf+2mm) e 5 mm da linha de fusão (lf+5mm). Na ZTI e ZTF, cuja localização pode ser observada na Figura 3, foram realizados ensaios na linha de fusão. Todos os resultados ficaram acima do estabelecido pela norma API 5L, que determina como energia mínima absorvida 27 J em ensaios realizados a 0 °C, os resultados podem ser observados na Figura 10.

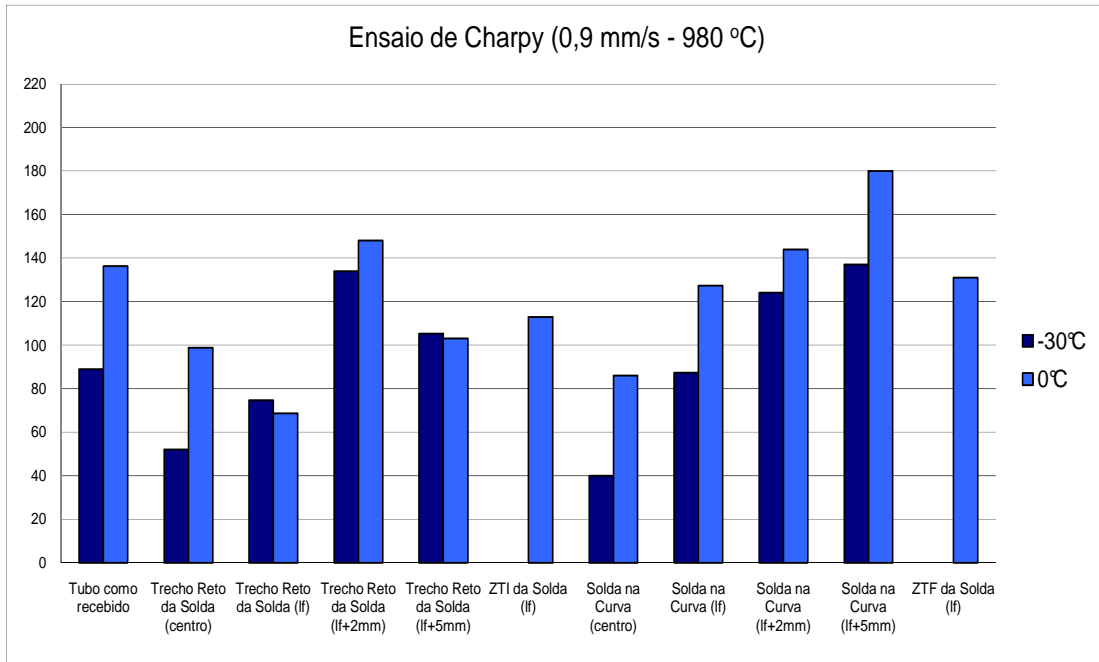


Figura 10. Resultados dos ensaios de impacto na região da solda do tubo curvado.

Apesar dos resultados mecânicos da região soldada superarem os requisitos mínimos da norma, observou-se a necessidade de realização de tratamento térmico para melhorar as propriedades mecânicas do metal de base, região fora da solda, estudada por Meireles,⁽¹⁰⁾ da região curvada do tubo, pois os valores obtidos para limite de escoamento não atingiram o mínimo estabelecido.

Foram realizados tratamentos térmicos de revenimento no cordão de solda da região curvada do tubo nas temperaturas de 400°C, 500°C e 600°C com tempo de encharque de 1 hora e resfriamento ao ar. Após a realização dos tratamentos foram realizados ensaios mecânicos de tração e impacto.

Os resultados dos ensaios de tração mostraram que para as três condições de tratamento térmico os limites de escoamento variaram pouco permanecendo praticamente idênticos aos limites de escoamento das amostras sem tratamento reportadas anteriormente. Os limites de resistência à tração também foram pouco afetados pelos tratamentos térmicos. As perdas máximas foram para o tratamento a 500°C, menos de 7% em relação ao tubo curvado sem tratamento. Todos os resultados de limite de resistência a tração ficaram acima do estabelecido pela norma API 5L de 625 MPa. Estes resultados podem ser observados na Figura 11.

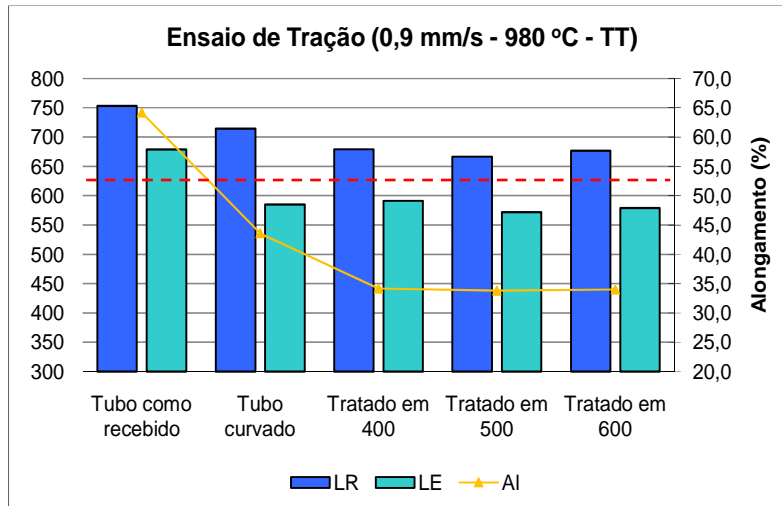


Figura 11. Resultados dos ensaios de tração nos CP's tratados termicamente. LE = Limite de Escoamento, LR = Limite de Resistência, AI = Alongamento

Foram realizados ensaios de impacto Charpy-V no centro da solda para todas as condições de tratamento térmico, os valores de energia absorvida pouco variaram na região curvada, já no trecho reto houve um ganho de cerca de 30% para o tratamento a 500°C e uma perda de cerca de 40% para o tratamento a 600°C. Todos os resultados ficaram acima do estabelecido pela norma API 5L de 27 J para ensaios realizados a 0 °C. Os resultados podem ser observados na Figura 12.

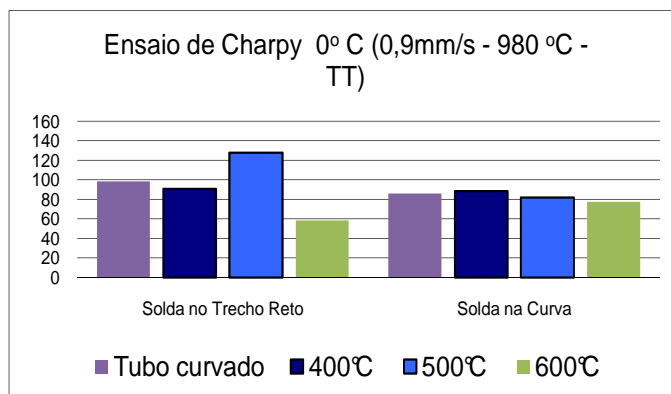


Figura 12. Resultados dos ensaios Charpy na solda Longitudinal do CP's tratados termicamente.

Os resultados de limite de resistência à tração e de energia absorvida a 0 °C ficaram acima do mínimo estabelecido pela norma para todas as amostras do cordão de solda tratado termicamente.

4 DISCUSSÃO

A primeira etapa do trabalho consistiu na determinação dos parâmetros ideais de curvamento para o material em questão. Para tal, iniciou-se a investigação fixando o valor da velocidade em 0,9 mm/s. Nesta condição, variou-se a temperatura em 900°C, 980°C e 1.080 °C. Os resultados dos ensaios de tração e impacto para a primeira etapa de testes estão apresentados nas Figuras 5 e 7, respectivamente. Em todos os casos analisados, notou-se a redução dos valores de limite de escoamento, limite de resistência, alongamento e energia absorvida. Os resultados da região da

solda foram analisados junto com os resultados obtidos no metal de base do tubo, onde, concluiu-se que sob a velocidade de 0,9 mm/s, a redução das propriedades mecânicas foi menor para a temperatura de 980°C.

Escolhida a temperatura, partiu-se para a escolha da velocidade ideal. Além de 0,9 mm/s, foram realizados testes para 0,3 mm/s e 1,4 mm/s. Os resultados dos ensaios mecânicos para a segunda etapa de testes podem ser observados nas Figuras 6 e 8. A condição de 0,3 mm/s não atingiu a energia mínima absorvida de 27 J estabelecida pela norma API 5L, conforme Figura 8. Novamente os resultados foram analisados junto com os resultados do restante do tubo, chegando-se a conclusão que sob a temperatura de 980°C e velocidade de 0,9 mm/s o material apresentou as melhores propriedades mecânicas.

Escolhidas a temperatura e a velocidade de curvamento, passou-se para etapa seguinte, a do curvamento propriamente dito. Foi escolhido o raio de curvatura de 5D, que é o raio mais utilizados na construção de sistemas de dutos terrestres. Os resultados dos ensaios mecânicos realizados no tubo curvado estão apresentados nas Figuras 9 e 10. Observou-se uma significativa redução do limite de escoamento (Figura 9) das regiões analisadas quando comparadas ao tubo original e aos resultados dos testes para escolha dos parâmetros ideais (Figuras 5 e 6). Tais perdas em material semelhante também foram encontradas por Batista et al.⁽¹¹⁾ As reduções nos limites de escoamento do metal de solda podem ser justificadas pela solubilização de carbonetos dispersos, por ação aquecimento e rápido resfriamento, fazendo com que estes passem a estar em solução sólida. O baixo teor de carbono do metal de base e do metal de solda também pode ser responsável pelas perdas das propriedades mecânicas, pois o aço baixo carbono não possui boa temperabilidade. Além disso, segundo Honeycombe,⁽⁴⁾ o tamanho de grão também influencia na temperabilidade, pois quanto menor o tamanho de grão austenítico maior são as quantidades de locais para nucleação da ferrita e perlita, logo menor será a temperabilidade. Como o material estudado possui tamanho de grão de cerca de 5 µm, a sua temperabilidade é muito baixa.

Ao comparar os resultados obtidos nos ensaios dos CP's retirados do cordão de solda para a escolha dos parâmetros, sem realização do curvamento, e dos CP's retirados do tubo curvado, para a mesma temperatura e velocidade, observou-se que os valores das propriedades mecânicas do cordão de solda curvado são inferiores às do cordão não curvado. Indicando que a deformação plástica resultante do curvamento também foi responsável pela redução de tais valores.

Embora as reduções das propriedades mecânicas tenham sido significativas, todos os resultados mecânicos relativos ao curvamento na região do cordão de solda atenderam os requisitos estabelecidos pela norma API 5L, haja vista que a norma não estabelece limite de escoamento nem alongamento mínimo para a região do cordão de solda.

Os resultados referentes ao cordão de solda foram analisados junto aos resultados das outras regiões do tubo (intradorso, linha neutra e extradorso). Na tentativa de elevar as propriedades destas outras regiões, foram realizados tratamentos térmicos de revenido em três temperaturas diferentes: 400°C, 500°C e 600°C. A realização de tratamento térmico após o processo de curvamento está prevista na norma ABNT NBR 15273 e é parte integrante do mesmo.

Os resultados dos ensaios de tração e impacto do material tratado termicamente estão apresentados nos gráficos das Figuras 11 e 12. Os tratamentos não modificaram muito as propriedades mecânicas da região do cordão de solda, notou-se uma pequena diminuição dos limites de resistência à tração para os tratamentos



realizados. Já para os ensaios de impacto notou-se uma melhora da tenacidade para o tratamento realizado a 500°C e uma redução para o tratamento a 600°C. Os resultados de limite de resistência à tração e de energia absorvida a 0°C ficaram acima do mínimo estabelecido pela norma para todas as amostras do cordão de solda tratado termicamente.

5 CONCLUSÃO

Na determinação dos parâmetros de curvamento de tubos fabricados com aço API de grau X80, após tratamentos em diferentes temperaturas e velocidades e análise das propriedades mecânicas, verificou-se que a temperatura de 98 °C e a velocidade de 0,9 mm/s foi a condição em que as propriedades mecânicas atingiram os melhores índices durante a realização dos testes para determinação dos parâmetros de curvamento tanto na região da solda, quanto no metal base, região estudada por Meireles.⁽¹⁰⁾

Após o curvamento do tubo na condição descrita acima, os resultados dos ensaios mecânicos realizados da região curvada na ZTA e no MS atingiram os requisitos estabelecidos pela norma API 5L.

Apesar dos resultados acima reportados, houve necessidade de realização de tratamento térmico complementar no tubo curvado, pois as propriedades de outras regiões do mesmo não atenderam aos requisitos mínimos da norma API 5L. Após estes tratamentos, as propriedades mecânicas da região soldada continuaram dentro dos requisitos estabelecidos pela norma supracitada.

Agradecimentos

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

REFERÊNCIAS

- 1 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;
- 2 SILVA, R. C. et al. Curvamento a Frio de Tubos API 5L X80 de 34" de Diâmetro. Contribuição técnica ao 63º Congresso Anual da ABM, Julho, 2008;
- 3 SPECIFICATION FOR LINE PIPE. API SPECIFICATION 5L. American Petroleum Institute. October, 2007;
- 4 HONEYCOMBE, R. W. K., BHADESHIA, H. K. D. H. Steels, Microstructure and Properties. 3rd Edition – Elsevier Ltd. 2006;
- 5 MARQUES, P. V., MODENESI, P. J., BRACARENSE, A. Q. “Soldagem – Fundamentos e Tecnologia”, UFMG, 2005;
- 6 PARANHOS, R., SOUZA, A.C. “Soldagem a Arco Submerso, Coleção Soldagem 2000”, Rio de Janeiro, 1999;
- 7 Standard Test Methods and Definitions for Mechanical Testing of Steel Products. ASTM A 370. American Society for Testing and Materials. 2003;
- 8 INDÚSTRIAS DE PETRÓLEO E GÁS NATURAL – Curvas por Indução para Sistema de Transporte por Dutos. ABNT NBR 15273:2005. Associação Brasileira de Normas Técnicas. 2005;
- 9 Standard Test Methods for Hardness of Metallic Materials, ASTM E 92. American Society for Testing and Materials. 2003;

- 10 MEIRELES, A. M. Influência dos Parâmetros do Processo de Curvamento por Indução nas Propriedades do Aço de um Tubo API 5L X80. 65^o Congresso Anual da ABM, Julho, 2010;
- 11 BATISTA, G. Z. et al. Evolução Microestrutural de Tubo de Aço API 5L X80 Submetido a Curvamento com Aquecimento por Indução. 61^o Congresso Anual da ABM, Julho, 2006;