1.
Introdução

Aços da classe API são, aços de alta resistência e baixa liga (ARBL) oriundos de processo termomecânico controlado, aplicados na fabricação de tubos destinados à montagem e construção de dutos para transporte de gás natural e óleo. Quando a economia de peso é um fator importante para o projeto, os tubos selecionados são aqueles com grau de resistência API superior ao X65, como é o caso do grau API X80 deste estudo que apresenta limite mínimo de escoamento de 80.000 psi (552 MPa). Estes dutos são submetidos a altas pressões de operação, sendo a máxima admissível limitada a 72% do limite de escoamento mínimo do grau API, e cuja razão elástica é normalizada para que o limite de escoamento não exceda a 93% do limite de resistência [1]. Isto visa evitar que o escoamento seja seguido de colapso imediato da estrutura. Ou seja, as condições operacionais devem ser compatíveis com o grau de aço selecionado. Além da elevada resistência, estes aços ARBL são projetados com composição química que possibilita boa soldabilidade e rotas de processamento que proporcionam microestruturas adequadas para obtenção de altos níveis de tenacidade, o que é obtido através do refino de grão. Se o produto transportado pelo duto for óleo ou gás corrosivo, a resistência a corrosão torna-se também um requisito essencial.

Na construção de um duto, além dos trechos retos, existe um determinado número de curvas que pode chegar até 30% dos tubos de um duto [2]. Tubos curvados encontram aplicações nas indústrias de tubulações, estação de energia e petroquímica. Na indústria de tubulações (figura 1), as curvas são aplicadas para acompanhar o perfil do terreno e realizar conexões para mudanças de direção conforme o traçado do projeto [3,4]. Estas curvas podem ser obtidas a frio, em campo, ou opcionalmente a quente com aquecimento por indução eletromagnética de alta frequência, em fábricas. A técnica de curvamento a quente por indução permite a obtenção de pequenos raios e grandes ângulos de curvamento de até 90°, inviáveis de serem obtidos com o curvamento a frio [3, 4, 5]. O número de curvas em um projeto de duto deve ser minimizado [6], pois além do atrito entre o fluido transportado e as paredes internas do duto, as curvas são regiões de perda de carga localizada, o que pode acarretar um maior uso de bombas (fluidos líquidos) ou ventiladores / sopradores (fluidos gasosos).

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0921908/CA

Figura 1 – Curvas X80 (L555M) por indução e conexão de campo [3]

O curvamento a quente é caracterizado por ser realizado por aquecimento por indução local e gradual. As elevadas taxas de aquecimento e os parâmetros de potência, frequência, temperatura e velocidade de curvamento são ajustados para facilitar a deformação e obter a curvatura projetada, além de influenciarem a microestrutura e propriedades mecânicas finais da curva a quente. A escolha apropriada do raio de curvamento e dos parâmetros de processamento deve minimizar na região da curva problemas relacionados com fatores geométricos, tais como a ovalização, reduções no diâmetro e alterações na espessura acima do limite padronizado. A taxa de aquecimento encontra-se entre 10 a 20ºC/s [7]. O aquecimento ocorre por efeito Joule quando a resistência do material à passagem de correntes induzidas pelo campo eletromagnético da bobina de indução gera calor. O efeito pelicular ocorre quando uma fina camada da superfície do tubo de aço aquece devido à resistência a passagem de correntes induzidas. A profundidade da película depende da frequência de operação. Quanto maior a frequência mais estreita se torna a camada afetada, devido ao efeito pelicular [8]. Já a extensão da camada totalmente aquecida dependerá, além da frequência (efeito pelicular), da potência de indução e da transmissão do calor gerado (por condução) até as camadas de espessura de parede mais afastadas da bobina de indução. Assim, para um mesmo tempo de exposição ao aquecimento por indução, a camada afetada torna-se maior quanto menor for a frequência e maior for a potência. As partes mais internas da espessura de parede do tubo aquecem por condução do calor a partir das camadas mais externas até temperaturas de curvamento acima de Ac_3. A austenitização completa da espessura durante o período de aquecimento abaixo da bobina de indução dependerá da espessura do tubo, da potência e também da velocidade de curvamento. A velocidade de curvamento determina o tempo de exposição a temperatura de curvamento, afetando a diferença de temperatura ao longo da espessura e a dureza superficial [4]. O

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0921908/CA

período de aquecimento oscila de 1 a 2 minutos [9], pois os pontos ao longo da circunferência do tubo passarão pela bobina de indução com velocidades diferentes dependendo de suas distâncias ao eixo de curvamento [10]. Assim, o tubo é aquecido até a austenitização e deformado para a obtenção do raio de curvatura projetado. O resfriamento após a passagem pela bobina de indução pode ser com ar soprado ou jatos de água, de acordo com a temperabilidade do material. A velocidade de resfriamento final é muito influenciada pela temperatura de curvamento e principalmente pela espessura de parede do tubo. Os ciclos térmicos do curvamento a quente e a composição química do tubo a ser curvado determinam a microestrutura e, portanto as propriedades mecânicas finais da curva que devem ser adequadas aos critérios de aplicação.

Quanto às modalidades de curvamento a quente, este pode ser realizado com têmpera total ou parcial do tubo, com ou sem tratamento térmico posterior (revenimento) [4, 5]. Sob o ponto de vista econômico, a modalidade de curvamento de menor custo é o curvamento com têmpera parcial livre de revenido posterior. Um tubo curvado pelo processo de têmpera parcial apresenta uma zona de transição entre a curva e o trecho reto. Quanto às regiões, uma curva pode ser dividida em intradorso, extradorso, linha neutra oposta à solda e linha neutra na solda (para tubos com costura). Estas regiões ocorrem porque durante o curvamento a solda é posicionada em posição de linha neutra [11], ficando o extradorso submetido a esforços trativos, que provocam redução de espessura, e o intradorso submetido a esforços compressivos, que promovem ganho de espessura. Quanto às regiões do tubo curvado, este trabalho dará maior enfoque aos trechos reto e curvado, ambos fora da região da solda longitudinal por arco submerso. Os efeitos do curvamento a quente por indução sobre a junta soldada já foram avaliados em trabalho prévio [12].

Para sua utilização em dutos, os tubos curvados devem atender aos requisitos especificados pela API 5L PSL2 para composição química, carbono equivalente, dimensões, peso, tensões máximas e mínimas de escoamento e resistência, tenacidade ao entalhe, entre outros. É desejável que a resistência do tubo curvado seja compatível e/ou superior a do tubo reto que lhe deu origem. Entretanto, Groeneveld [9] enfatiza que curvas obtidas de tubos com o mesmo grau API não conseguem reproduzir as propriedades mecânicas do tubo original, mesmo que a resistência da região curvada esteja normalizada pela API 5L e/ou atenda às condições operacionais para o serviço pretendido. As propriedades

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0921908/CA

mecânicas nos trechos da curva a quente dependem fortemente da temperabilidade do aço que está sendo curvado, pois este processo prevê aquecimento, aplicação de deformação e resfriamento. Pesquisas recentes [2, 12 a 20] em aços API X80, com carbono equivalente (CE_{IIW}) na ordem 0,41%, têm revelado que após a aplicação do ciclo termomecânico do curvamento a quente as alterações microestruturais promovidas ao longo da espessura provocam uma queda acentuada dos valores iniciais de limite de escoamento. Isto torna necessária a adoção de procedimentos para restaurar as propriedades mecânicas da curva, o que pode ser feito através do aperfeiçoamento dos parâmetros de curvamento e/ou do revenimento posterior.

Geralmente quanto menor for o carbono equivalente, desejável para obter boa soldabilidade, e quanto maior for o limite de escoamento do tubo original, maior será a dificuldade de manter as propriedades mecânicas originais. Kondo et al. [4] sugerem que os tubos para a fabricação de curvas por indução devem possuir o mesmo grau de aço, porém um carbono equivalente maior do que os dos tubos para trechos retos objetivando aumentar a temperabilidade. Behrens [21] obteve boas propriedades de tração e tenacidade ao entalhe após submeter a curvamento a quente tubo de aço API X80 com carbono equivalente de 0,48% (CE_{IIW}). Para o grau X80 a norma API 5L [1] especifica que, para tubos sem costura, com espessura de parede maior do que 20,3 mm e tubos designados pelo comprador como de alto carbono equivalente o valor CE_{IIW} deve ser escolhido em comum acordo entre o fabricante de tubo e o comprador. Para os demais tubos a API 5L limita o valor de carbono equivalente (CE_{IIW}) em 0,43%. Para o grau X80 o percentual de carbono máximo é limitado a 0,22%C, sendo que para cada redução de 0,01% no percentual de carbono admite-se um acréscimo de 0,05% no percentual de manganês acima do teor máximo especificado (1,85%Mn) até o limite de 2,0%Mn [1]. No geral as propriedades mecânicas em tração guardam boas correlações com os valores de carbono equivalente CE_{IIW} [4, 5, 7]. O objetivo de aumentar a temperabilidade através do carbono equivalente é a obtenção de boa resistência mecânica após curvamento por indução associada a uma maior fração volumétrica de microestruturas com temperaturas de transformação de fase abaixo da reação ferrítica-perlítica, como as microestruturas bainíticas. Porém, deve-se levar em conta que a elevação da resistência através do carbono equivalente, principalmente devido à elevação do percentual de carbono, pode ser prejudicial à tenacidade e à soldabilidade.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0921908/CA

Groeneveld [9] observou que os ciclos térmicos que ocorrem durante o curvamento a quente alteram completamente a microestrutura obtida por laminação controlada. A deformação a quente também desempenha um importante papel sobre a resistência final da região curvada. Meireles [23] avaliou os níveis de resistência do tubo de aço API X80 após a passagem pela bobina de indução com e sem a aplicação do curvamento (deformação) e seus resultados mostraram reduções nos níveis de resistência após o uso da deformação a quente aplicada para curvar o tubo.

A microestrutura da chapa laminada se beneficia do refino de grão para aliar alta tenacidade ao entalhe com elevada resistência mecânica, contudo outros mecanismos de endurecimento também contribuem para a obtenção da resistência final como o endurecimento por precipitação fina e por densidade de discordâncias. Caso apresente matriz ferrítica com dispersão de fases duras, como o constituinte austenita – martensita (AM), a chapa de aço laminada ao ser conformada a frio em tubo pelo processo UOE (dobramento em U, prensa em O e expansão E) se beneficia de um acréscimo no endurecimento por encruamento (discordâncias) para ganhar mais resistência [22]. Isto potencializa as propriedades mecânicas do material como recebido. O processo de curvamento a quente provoca alterações nas contribuições destes mecanismos de endurecimento, os quais necessitam ser estudados mais aprofundadamente.

O tubo deste estudo foi fabricado para aplicação em trecho reto, de forma que a composição química e a rota de fabricação não foram elaboradas com o objetivo de atender às propriedades mecânicas API 5L após curvamento a quente por indução. Trata-se de um tubo de aço grau X80 com 19 mm de espessura e diâmetro nominal de 508 mm. Possui percentual de carbono igual a 0,05% e o carbono equivalente (CE_{IIW}) na ordem de 0,41% visando obter boa soldabilidade e elevada tenacidade. O tubo em estudo representa um caso de baixo carbono equivalente quando comparado aos percentuais ótimos citados por Behrens [21]. As alterações microestruturais promovidas pelo curvamento a quente, ao longo de toda a espessura de parede do tubo na curva, nem sempre serão adequadas para se alcançar as propriedades mecânicas em tração que atenderão aos requisitos API 5L para o grau X80, especificamente o limite de escoamento. Estes casos estão associados à impossibilidade de trabalhar com tubos para curvamento a quente com carbono equivalente IIW mais elevado do que os dos tubos para trecho reto de mesmo grau de resistência API e com a

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0921908/CA

ausência de um resfriamento em água da superfície interna do diâmetro do tubo após curvamento, o que poderia contribuir para o aumento da resistência. Porém, no que se refere à tenacidade ao entalhe tem sido observado que esta se beneficia do refino de grão gerado pela operação de curvamento por indução [2, 14, 18].

Durante o trabalho do Mestrado [17, 18, 20] foram avaliados os efeitos da redução da frequência e do aumento da potência de curvamento sobre a microestrutura e as propriedades mecânicas de tubo de aço API X80. Os efeitos da variação da temperatura de encharque aplicada durante o tratamento térmico posterior também foram pesquisados [14, 15, 16, 17]. Os resultados obtidos da dissertação de Mestrado mostraram que a combinação da redução da frequência (2500 para 500 Hz) e elevação da potência (105 para 205 kW) durante a operação de curvamento a quente associada com a aplicação de revenimento posterior a 600ºC gerou um trecho curvado com propriedades mecânicas mais compatíveis com as do tubo como recebido e superiores aos limites mínimos estabelecidos pela API 5L [17, 18, 20].

Até então muita ênfase tem sido dada à influência do carbono equivalente (composição química) e à possibilidade da adoção do resfriamento interno (parâmetro de processamento), porém sem discussões mais aprofundadas sobre as diferenças de mecanismos de endurecimento atuantes no trecho reto e na curva. As propriedades mecânicas do tubo como recebido estão embasadas em mecanismos de endurecimento por refino de grão, encruamento e precipitação fina.

Em complemento à pesquisa iniciada no Mestrado [12, 15 a 20] este trabalho tem por ***objetivo principal*** o estudo dos mecanismos de endurecimento atuantes nos diferentes trechos do tubo de aço API X80 curvado a quente e efeitos do revenimento posterior. A formação das microfases e dos constituintes, a análise da temperabilidade, a influência das taxas de resfriamento sobre a microestrutura, a distribuição das microdurezas dos grãos ferríticos, a determinação dos exponentes de encruamento e a determinação das contribuições para o limite de escoamento dos mecanismos de endurecimento serão apresentados para o aço em estudo.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0921908/CA

As contribuições do tamanho de grão (caracterizado via MO e MEV), da solução sólida (via sobrenadante da dissolução ácida e ICP), das discordâncias (via DRX) e da precipitação (via MET, resíduo da dissolução ácida analisado no MEV e por DRX) são referentes a fase majoritária, ferritas poligonal e quasi poligonal. O endurecimento por transformação de fases foi obtido em função da presença do constituinte AM e das ferritas de baixas temperaturas de transformação, tal como a ferrita bainítica e ferrita acicular. As correlações entre os parâmetros de processamento, microestruturas resultantes, mecanismos de endurecimento e propriedades mecânicas foram obtidas.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0921908/CA