

1

Introdução

A correlação dos parâmetros de curvamento a quente por indução com a evolução microestrutural e as propriedades mecânicas será abordada com ênfase nos efeitos provocados pela alteração dos parâmetros operacionais de frequência e potência para o curvamento de um tubo de aço API 5L grau X80 de baixo carbono (0,05%C) contendo Nb, Ti, V, Cr e Mo. O objetivo principal consiste em obter níveis de propriedades mecânicas compatíveis com aquelas normalizadas pela API 5L após curvamento a quente de tubos de aço API X80 com carbono equivalente Pcm na ordem de 0,17%.

A operação de curvamento a quente consiste em uma modalidade de curvamento realizada em fábrica onde parte do tubo passa por uma bobina de indução. Esta bobina opera com uma determinada frequência de corrente alternada, produzindo aquecimento devido à resistência do material a passagem das correntes induzidas (efeito Joule) pelo campo eletromagnético gerado. Os parâmetros de frequência e de potência podem ser ajustados para alterar a espessura da camada que será efetivamente aquecida por ação das correntes induzidas, sendo que o restante da espessura aquecerá por condução de calor. Este aquecimento provoca a completa austenitização ao longo da espessura de parede do tubo (que se encontra abaixo da bobina de indução) favorecendo assim a deformação a quente do tubo em um processo termomecânico que será responsável pela obtenção do raio e do ângulo de curvatura desejados. Após a passagem pela bobina de indução a superfície externa da espessura de parede do tubo na curva é submetida a resfriamento em água, enquanto a superfície interna resfria ao ar calmo. Esta característica de ciclo de resfriamento do curvamento a quente é muito importante para a evolução microestrutural e conseqüentemente para as propriedades mecânicas finais do produto curvado.

O tubo como recebido foi caracterizado para a melhor compreensão das alterações provocadas pelo curvamento a quente na microestrutura do aço API X80 e seus reflexos sobre as propriedades mecânicas. Algumas características microestruturais do tubo como recebido, tais como tamanho de grão e a presença de precipitação interfásica nos grãos de ferrita, revelaram-se importantes para o entendimento das alterações microestruturais e de

propriedades mecânicas promovidas pelos ciclos térmicos de aquecimento e resfriamento atuantes durante curvamento a quente.

Amostras do tubo na condição de como recebido e trechos de diferentes regiões do tubo curvado (extradorso, intradorso e linha neutra) foram submetidos a ensaios de tração para obter os limites de escoamento e de resistência e a ensaios de impacto Charpy para determinar, através da energia absorvida, os efeitos do curvamento sobre a tenacidade. A caracterização da evolução microestrutural ao longo da espessura de parede foi associada a perfis de microdureza (HV).

O curvamento a quente para tubos de 20" de diâmetro nominal e espessura de parede de 19 mm é tradicionalmente realizado com parâmetros de alta frequência (2500 Hz) e potência de 105 kW. Após a obtenção da curva, esta é submetida a um tratamento térmico para alívio de tensão a 500°C durante 1 h, tratamento este que é tradicionalmente utilizado após o curvamento a quente. Através de duas vias complementares, buscou-se a compreensão dos mecanismos que promovem as alterações e a otimização das propriedades mecânicas do produto curvado. A primeira via enfoca a alteração dos parâmetros de curvamento a quente, reduzindo a frequência para 500 Hz e aumentando a potência para 205 kW, visando produzir uma maior camada afetada pelas correntes induzidas e endurecimento por transformação de fase. A segunda via trata da realização do alívio de tensão com temperatura otimizada de 600°C para promover endurecimento por precipitação fina de elementos de liga, e sendo assim o alívio de tensão atuaria com propósito de revenido e, portanto será tratado como revenido.

Em paralelo as duas operações de curvamento a quente abordadas (2500 Hz e 500 Hz) foram realizados tratamentos térmicos com transformações de fase em resfriamento contínuo, em escala laboratorial, com e sem a aplicação de patamar isotérmico. Estes tratamentos térmicos foram aplicados ao aço na condição de como recebido e tiveram como principal objetivo auxiliar na caracterização da evolução microestrutural que ocorre ao longo da espessura de parede na curva e respectivas propriedades mecânicas resultantes. Com este intuito, observou-se que uma microestrutura com alta fração volumétrica de ferrita bainítica resultante do tratamento térmico de têmpera em água apresenta ótimas propriedades mecânicas. Sendo também, morfologicamente similar a microestrutura resultante do resfriamento rápido da superfície externa da

espessura de parede do tubo na curva após a passagem pela bobina de indução. As informações obtidas através dos tratamentos térmicos com transformações em resfriamento contínuo foram úteis para auxiliar a indentificar as microestruturas obtidas.

Outra forma de otimizar as propriedades mecânicas em tração, especificamente o limite de escoamento, é a aplicação de um revenimento posterior a operação de curvamento a quente. Com o objetivo de elevar os níveis de limite de escoamento dos trechos curvados simulou-se revenimentos, em escala laboratorial e industrial, em uma faixa de temperaturas entre 400 a 700°C durante 1 h. Algumas simulações promovendo a variação do tempo de encharque também foram realizadas.

Os resultados obtidos mostraram que para tubos com carbono equivalente Pcm na ordem de 0,17% a atuação conjunta de endurecimento por transformação de fase e endurecimento por dispersão fina de precipitados de elementos de liga, obtido com a aplicação de revenido com temperatura otimizada a 600°C, proporcionou obter limites de escoamento e de resistência em acordo com a norma API.