

5 Conclusões

O objetivo deste trabalho foi verificar a influência do ciclo térmico provocado pelo processo de curvamento a quente por indução, bem como o tratamento térmico posterior, na microestrutura e nas propriedades mecânicas do tubo API 5L X80 produzido por laminação controlada e como estes resultados podem ser utilizados em um projeto de construção e montagem de dutos. As principais conclusões são:

- 1- A região do extradorso da curva apresenta uma redução de espessura em torno de 9%. Esta redução deve ser levada em consideração no cálculo da espessura do duto de modo que o tubo apresente, após o curvamento, uma espessura compatível com a espessura de projeto.
- 2- O resfriamento com água pelo lado externo do tubo provoca um gradiente microestrutural ao longo da espessura, formando bainita e martensita na superfície externa e ferrita poligonal na interna. Como consequência, a dureza varia de aproximadamente 260 HV, na superfície interna, a 350 HV na externa. Estes valores de dureza estão dentro dos limites normalmente estabelecidos pelas especificações de tubos.
- 3- A região do intradorso fica submetida por um tempo maior na temperatura de curvamento, resultando em um maior crescimento de grão austenítico, originando uma microestrutura final mais grosseira que o extradorso.
- 4- As zonas de transição apresentam uma microestrutura ainda deformada pelo processo de laminação, semelhante a do material original, porém, com uma maior heterogeneidade de tamanho de grão.

- 5- Após o curvamento, observou-se uma redução significativa na temperatura de transição da região curvada, tanto para o metal de base quanto para o metal de solda e ZTA, indicando que o ciclo térmico do curvamento provoca uma melhora na tenacidade do material. Esta melhora está relacionada com a formação de uma microestrutura menos bandeadada e mais refinada e com a redução do nível de encruamento do aço (que sofre processo de expansão a frio durante a fabricação do tubo). Além disso, este aço possui elementos de liga como Nb e Ti que formam precipitados e retardam o crescimento do grão austenítico durante o aquecimento.
- 6- O processo de curvamento provoca uma redução no limite de escoamento do X80 para valores inferiores ao mínimo exigido por norma. Um dos motivos para esta redução é que a elevada resistência, resultante do processo de laminação controlada, é completamente alterada quando submetida ao ciclo térmico aplicado no curvamento, associado ao baixo valor de carbono equivalente que não permite atingir a temperabilidade necessária para manter as propriedades originais.
- 7- Um aumento significativo no limite de escoamento para as regiões do intradorso e extradorso foi conseguido através da aplicação do tratamento térmico de revenido, ficando acima do limite mínimo estabelecido por norma. Este aumento está relacionado com o mecanismo de endurecimento por precipitação causado pela presença de elementos de liga, como o V, por exemplo.

5.1. Recomendações ao Fabricante

O curvamento por indução seguido do tratamento térmico de revenido é geralmente aplicado para aços de alta resistência. Entretanto, o curvamento sem revenido reduz os custos de fabricação. Neste trabalho o revenido se fez necessário devido a grande redução do limite de escoamento provocada pelo ciclo térmico do curvamento. Esta redução pode ser minimizada utilizando-se aços com valores mais altos de carbono equivalente. Outra opção, para evitar a realização do tratamento térmico, consiste na aplicação do resfriamento por fora e por dentro do tubo. Essa técnica compensa, através do aumento na velocidade de resfriamento, a baixa temperabilidade de tubos com menores valores de carbono equivalente.

5.2. Sugestões para Trabalhos Futuros

O processo de curvamento a quente de aços de alta resistência é um assunto bastante complexo e requer uma avaliação constante para que se possa conhecer o comportamento metalúrgico do material e com isso atingir as propriedades mecânicas desejadas.

Seguem algumas sugestões para dar continuidade a este estudo:

- Avaliar a tenacidade da região curvada após o tratamento térmico bem como as propriedades mecânicas das zonas de transição;
- A parte reta do tubo, que não foi submetida ao ciclo térmico do curvamento, terá suas propriedades alteradas com o tratamento térmico. Dessa forma, torna-se necessário realizar uma avaliação completa desta região.
- Verificar a influência do resfriamento interno e externo nas propriedades mecânicas do tubo.
- Conduzir testes com diferentes valores de carbono equivalente e determinar um valor ótimo para o curvamento a quente.

- Realizar tratamentos térmicos com diferentes parâmetros de modo a definir a condição mais adequada para maximizar a formação de precipitados de V e, conseqüentemente, se obter maiores valores de limite de escoamento.