

## 13 Conclusões

- A alteração dos parâmetros de curvamento a quente, reduzindo a frequência de 2500 para 500 Hz e elevando a potência de 105 para 205 kW, proporcionou obter para o trecho curvado do tubo de aço API X80 de  $P_{cm} = 0,17\%$ , valores de limite de escoamento limítrofes ao valor mínimo determinado pela API 5L para o X80, elevando o limite de resistência em comparação ao trecho reto original a níveis compatíveis aos observados no trecho curvado do tubo API X80 de  $P_{cm} = 0,18\%$ . Enquanto as regiões centrais e internas da espessura de parede na curva 2500 Hz aparentemente perdiam fatores de endurecimento adicionais (como a precipitação interfásica em comparação com o trecho reto) e contavam com uma maior fração volumétrica de ferrita em direção a camada mais interna da espessura de parede (resfriadas ao ar calmo), na curva 500 Hz (após as mudanças dos parâmetros de curvamento) o aumento da camada afetada pelas correntes induzidas conduziam a homogeneização do tamanho de grão austenítico ao longo da espessura de parede do tubo favorecendo a temperabilidade e a formação de uma maior fração volumétrica de ferrita bainítica (em direção a camada mais interna da espessura de parede).
- Os tratamentos térmicos de resfriamento contínuo com e sem a aplicação de patamar de resfriamento isotérmico mostraram que a austenitização do aço API X80 seguida de resfriamento em água conduz a excelentes combinações de resistência e tenacidade em função da microestrutura bainítica obtida. Estes tratamentos térmicos também auxiliaram na determinação da profundidade endurecida por têmpera para o aço API X80 deste estudo e na caracterização microestrutural dos trechos reto e curvados expondo os importantes efeitos da difusão e das taxas finais de resfriamento sobre a microestrutura e a evolução das propriedades mecânicas, de acordo com o exposto nos capítulos de resultados (06 e 07) e na seção 12.3 do capítulo referente a discussão dos resultados.
- A maior temperabilidade obtida pela homogeneização do tamanho de grão austenítico ao longo da espessura da curva 500 Hz devido ao maior geração de calor em camadas mais profundas da espessura aquecidas por resistência do aço a passagem das correntes induzidas (efeito Joule), em comparação com a curva obtida a 2500 Hz onde as regiões centro-

internas da espessura eram austenitizadas por condução de calor das camadas mais externas, favoreceu a obtenção de uma fração volumétrica maior de ferrita com segunda fase alinhada e solubilização maior dos elementos de liga formadores de carbonitreto ao longo da espessura do trecho curvado a 500 Hz, otimizando as propriedades de tração e tenacidade do trecho curvado antes e após o revenido.

- O tratamento térmico de revenido a 600°C, favorecido pelos bons resultados de propriedades mecânicas obtidos com o curvamento utilizando parâmetro de frequência de 500 Hz, aumentou os valores, inicialmente limítrofes, de limites de escoamento do trecho como curvado acima do valor mínimo normalizado pela API 5L para o X80 sem causar reduções significativas dos limites de resistência. A elevação do limite de escoamento ocorre em função da formação de precipitação fina e homogênea distribuída, bloqueando a movimentação das discordâncias. Com elevação dos percentuais de alongamento e energia absorvida de impacto Charpy, o tratamento térmico após o curvamento a quente também proporcionou maior ductilidade e tenacidade.

## 14 Sugestões para trabalhos futuros

- Reproduzir o curvamento 500 Hz e 205 kW para um tubo API X80 de baixo carbono equivalente adicionando resfriamento interno com ar forçado;
- Determinar os efeitos da deformação a quente durante o curvamento nas propriedades mecânicas do tubo como curvado;
- Determinar um modelo térmico (radial, circunferencial e axial) para o tubo durante o curvamento a quente e determinação dos ciclos de aquecimento e resfriamento;
- Correlacionar microestrutura e propriedades mecânicas com os parâmetros de curvamento, modelando equações que associem a fração volumétrica dos microconstituintes e perfis de durezas, ao longo da espessura de parede na curva, com as taxas aplicadas durante os ciclos de aquecimento e resfriamento.