

## 5 Resultados (Parte 02)

A parte 02 enfatiza os aspectos referentes à temperabilidade dos aços observados no API X80 deste estudo, pois a temperabilidade é uma característica importante para os aços destinados a operação de curvamento a quente.

### 5.1. Temperabilidade

Além do carbono equivalente (composição química) outros fatores afetarão diretamente a temperabilidade do aço quando curvado:

a) *Diferenças na granulação da austenita* – A tabela 17 e as imagens da figura 44 exibem a variação do tamanho de grão austenítico em função da temperatura de austenitização aplicadas a amostras do trecho reto. A figura 45 exhibe os efeitos da variação da temperatura de austenitização, têmpera e revenido sobre a profundidade de camada endurecida. O critério aplicado para definir a profundidade de camada endurecida por têmpera (figura 45) foi a comparação com a média de microdureza apresentada pelo trecho reto como recebido.

Tabela 17 – Variação do tamanho de grão austenítico em função da temperatura de austenitização e efeitos nas propriedades mecânicas após têmpera em água e revenimento a 500°C durante 1 hora.

Temperatura de austenitização	Tamanho de Grão da austenita prévia ( $\mu\text{m}$ )	Microdureza Média HV (0,5 kg)	Limite de escoamento (MPa)	Limite de Resistência (MPa)
1000°C	15 $\pm$ 3,00	227 $\pm$ 15	611 $\pm$ 6	703 $\pm$ 5
950°C	8,0 $\pm$ 0,95	224 $\pm$ 19	572 $\pm$ 6	646 $\pm$ 5
900°C	6,0 $\pm$ 0,60	214 $\pm$ 15	569 $\pm$ 4	646 $\pm$ 2

Observa-se que, mesmo após a aplicação de revenimento posterior, a têmpera em água do aço API X80 obteve diferentes resultados para as diferentes condições de austenitização, os quais podem ser creditados a maior temperabilidade promovida pelo estado austenítico a 1000°C em comparação com 900°C.

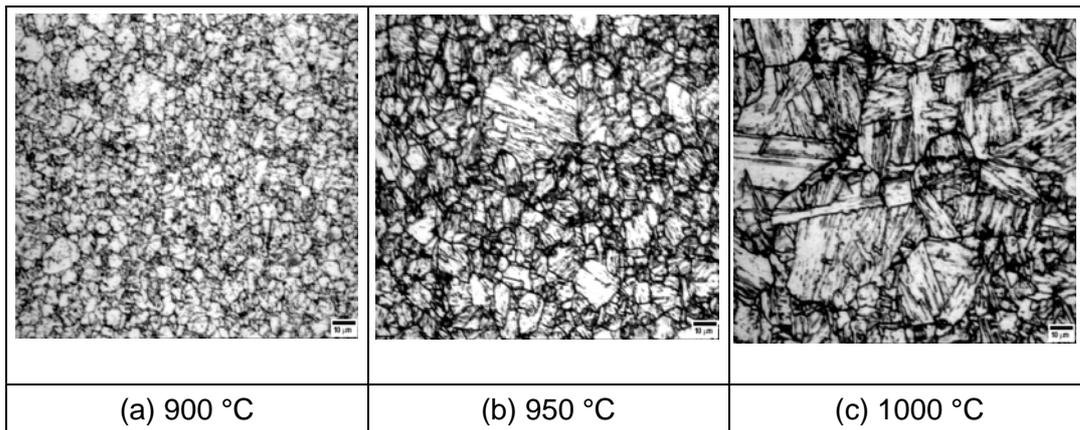


Figura 44 – Evolução do tamanho de grão austenítico com a temperatura de austenitização.

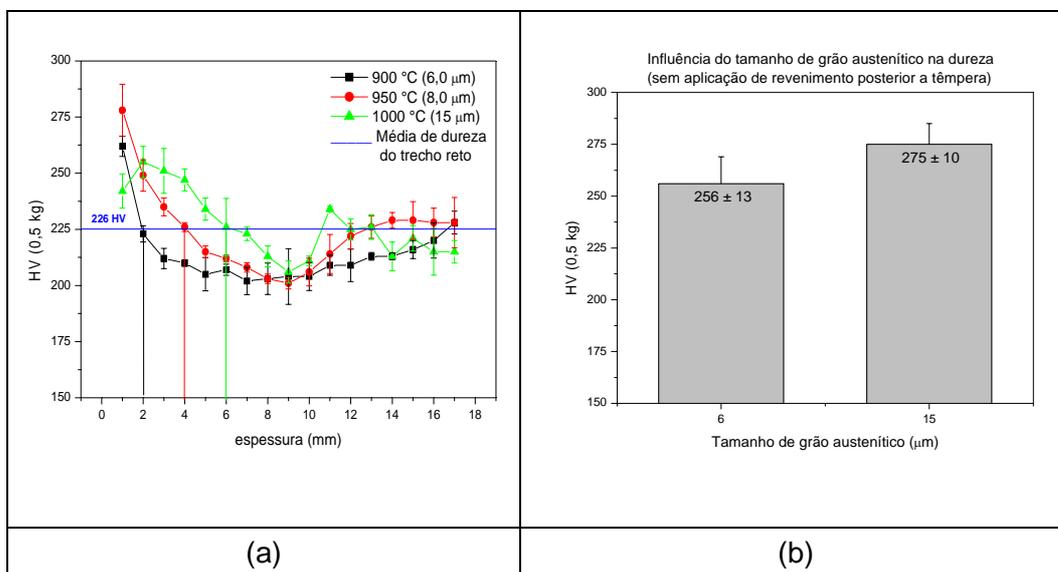


Figura 45 – Perfil de microdureza em função da espessura para diferentes temperaturas de austenitização e influência do tamanho de grão austenítico nas propriedades de dureza de amostras de aço API X80 com Pcm = 0,17%. O gráfico (a) revela o efeito de espessura no endurecimento do API X80 e o (b) exhibe o endurecimento real, sem os efeitos de amaciamento provocados pelo revenido.

O perfil de microdureza em função de espessura para amostras austenitizadas a diferentes temperaturas e submetidas a têmpera e revenido (figura 45) mostra que ocorreu acréscimo de 200% na espessura de camada endurecida com a evolução do tamanho de grão austenítico de 6 para 15 μm.

Comparando a média de microdureza do aço API X80 como temperado, figura 45(b), com as médias de microdureza do aço API X80 como temperado e revenido, tabela 17, observa-se que o amaciamento provocado pelo revenido (queda de dureza) pode ter influenciado na determinação da extensão efetiva de camada endurecida por têmpera, reduzindo-a. O revenido após têmpera também influenciou na forma do perfil de microdureza em função da espessura, figura 45, que deveria ser mais simétrico e apresentar queda de microdureza somente associada a efeitos de espessura.

A figura 46 mostra o aspecto microestrutural da camada endurecida (temperada e revenida) após ataque com Nital 2% e Picral 4%.

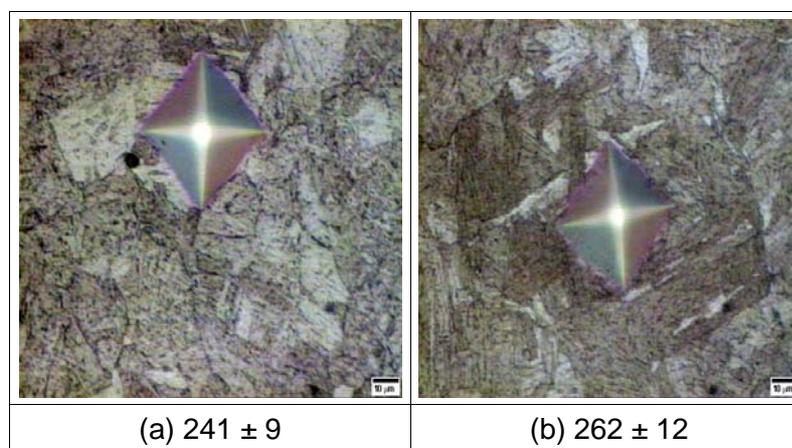


Figura 46 – Microestrutura da camada endurecida e média de microdureza HV (0,2 kg, 15 s) da (a) Bainita superior revenida e (b) Martensita revenida. Ataque Nital – Picral.

b) *Inclusões não-metálicas e carbonetos (ou nitretos)* – Partículas de segunda fase e precipitados não dissolvidos durante a austenitização do trecho reto também influenciam na temperabilidade, pois serão herdadas no trecho curvado. As inclusões não metálicas, observadas para o material do trecho reto (figura 47a) são similares as observadas nos trechos da curva do tubo API X80, como por exemplo, no intradorso, conforme mostrado no espectro EDS (figura 47b). A mesma similaridade é encontrada para os carbonitretos observados no trecho reto e na curva conforme mostrado na figura 48.

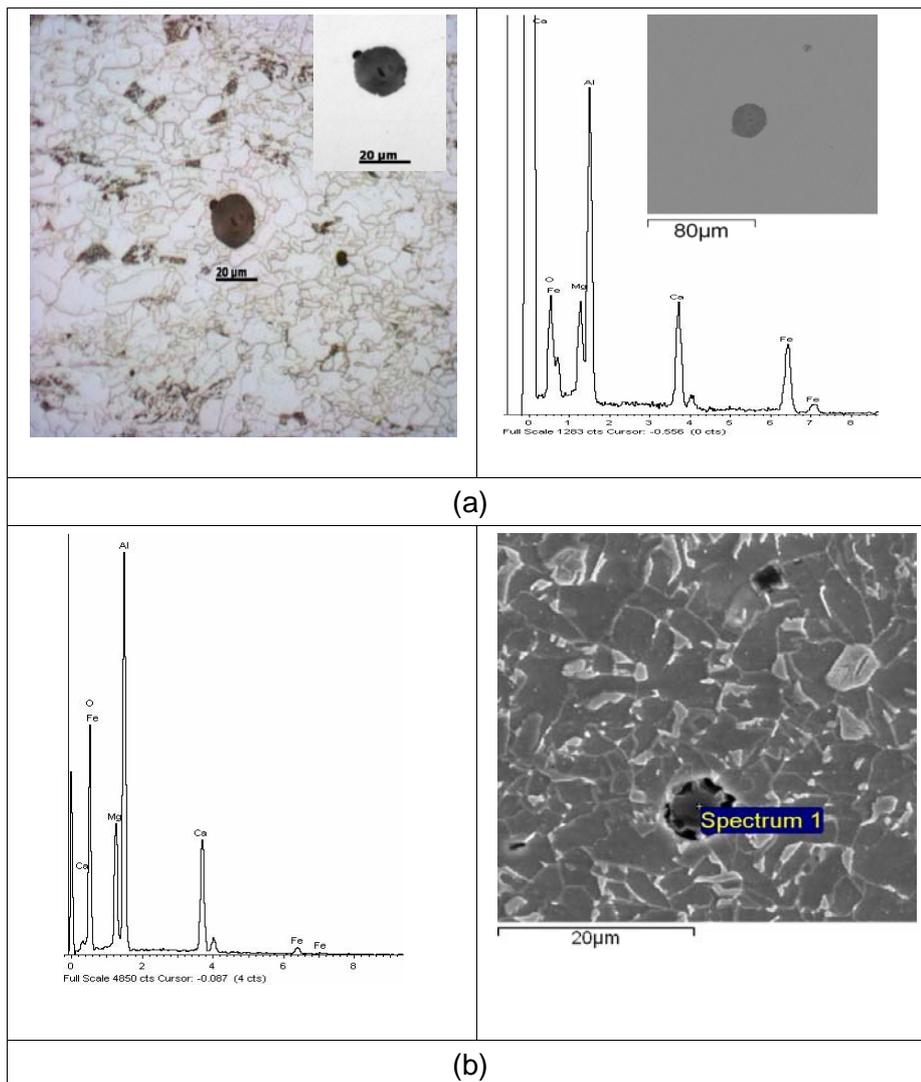


Figura 47 – Inclusões não metálicas observadas no trecho reto e na curva. Ataque Nital 2%. (a) Inclusão de óxido complexo contendo Al, Ca e Mg presente no trecho reto em MO e MEV (elétrons retroespalhados) e (b) Inclusão de óxido complexo contendo Al, Ca e Mg presente na curva (intradorso) em MEV (elétrons secundários).

No material na condição de como recebido, o percentual médio de inclusões foi estimado em  $1,04 \pm 0,6\%$  a partir da contagem realizada em 30 campos do metal de base do trecho reto do tubo de aço API X80.

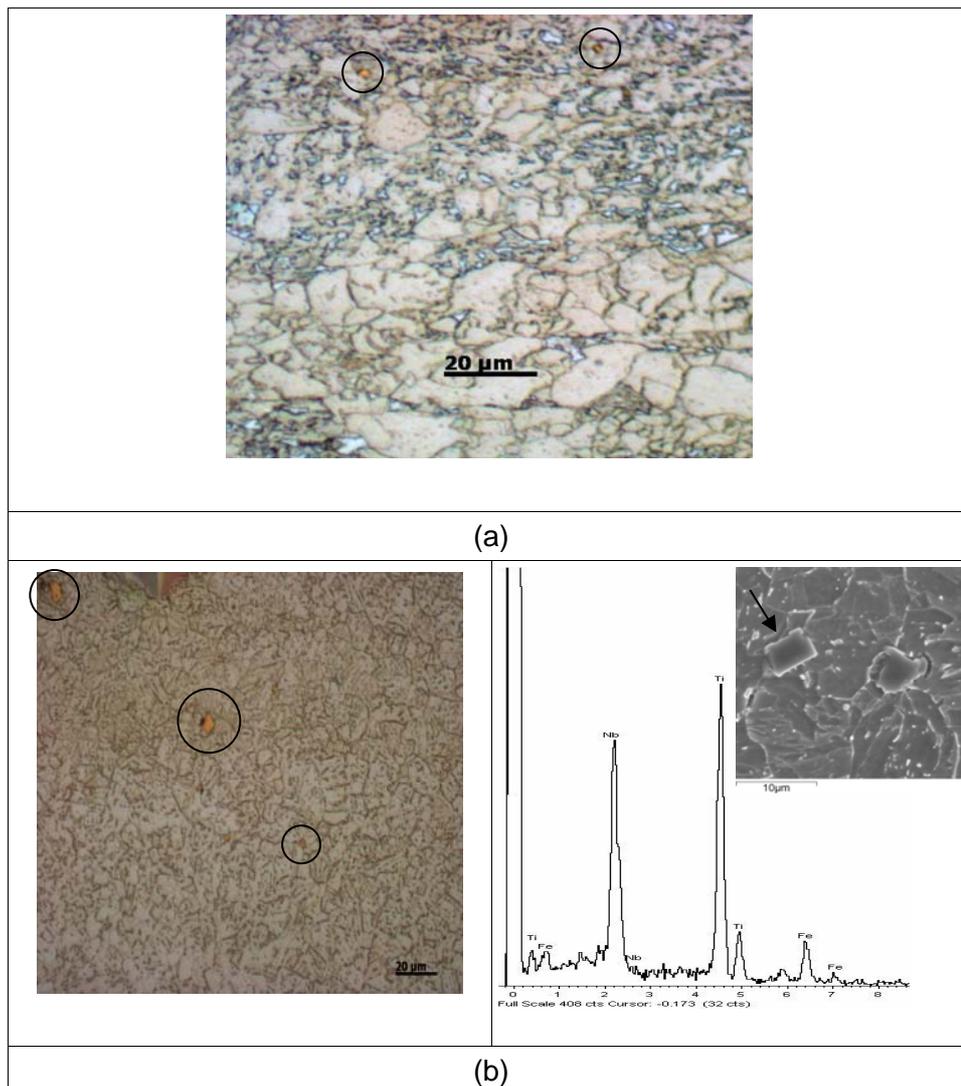


Figura 48 – Carbonitretos observados no trecho reto e na curva em MO e MEV (elétrons secundários). Ataque: LePera Modificado. (a) Carbonitretos de Ti e Nb nucleando ferrita na região central do trecho reto (zona de microsegregação) e (b) Carbonitretos de Ti e Nb grosseiros observados na curva (Intradorso). Os Carbonitretos não dissolvidos (partículas em laranja) são oriundos do trecho reto do tubo original.

Na prática, as inclusões afetam as propriedades de tração e energia absorvida Charpy ajudando a nuclear alvéolos que levam ao modo de fratura dúctil, o que pode ser observado nas imagens da figura 49, tal como citado por Poruks et al [26] e Lambert et al [27].

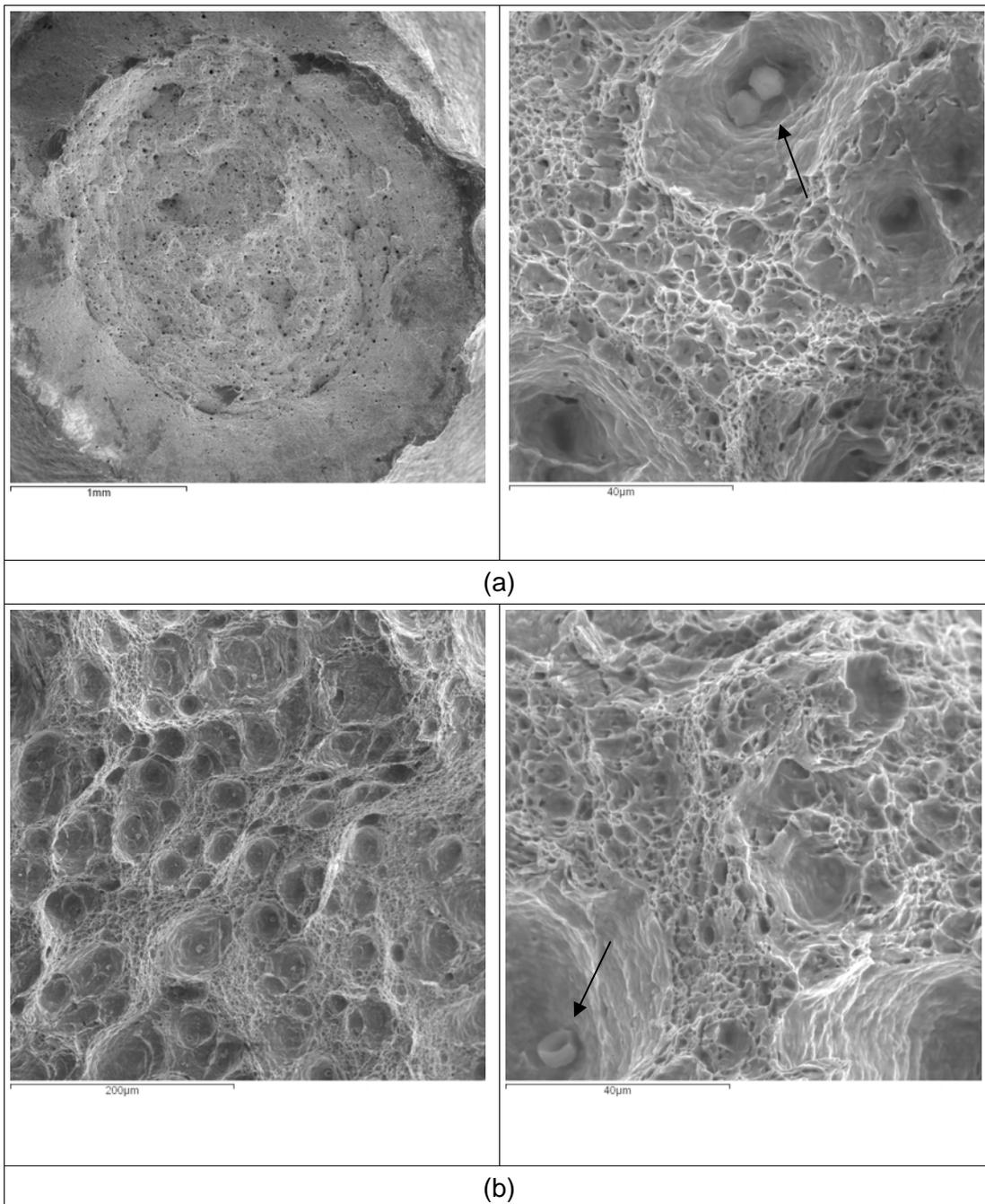


Figura 49 – Fractografia dos corpos de prova de aço API X80 exibindo fratura dúctil com alguns alvéolos nucleados a partir de inclusões. (a) Corpo de prova de tração ensaiado a temperatura ambiente e (b) corpo de prova Charpy ensaiado a 0°C. Microscópio eletrônico de varredura.