

7

Resultados (Parte 04)

A parte 04 se refere aos tratamentos térmicos com transformações de resfriamento contínuo sem a aplicação de patamar isotérmico.

7.1.

Tratamentos térmicos I

Com o objetivo de simular a evolução microestrutural da superfície externa (resfriada em água) até a superfície interna (resfriada em ar calmo) da espessura de parede na curva, com e sem a aplicação do revenido posterior, foram aplicados em amostras do trecho reto tratamentos térmicos de resfriamento contínuo com diferentes temperaturas de austenitização e taxas de resfriamento. Os efeitos dos tratamentos térmicos de resfriamento contínuo sobre a evolução microestrutural e propriedades mecânicas do aço API 5L X80 de baixo carbono equivalente ($P_{cm} = 0,17\%$) serão abordados nesta seção.

7.1.1.

Caracterização microestrutural

A caracterização por microscopia eletrônica de varredura é exibida nas figuras 55 e 56, a partir de austenitização a 1000°C e 900°C, respectivamente, para cada um dos meios de resfriamento (ar calmo, ar forçado, óleo e água).

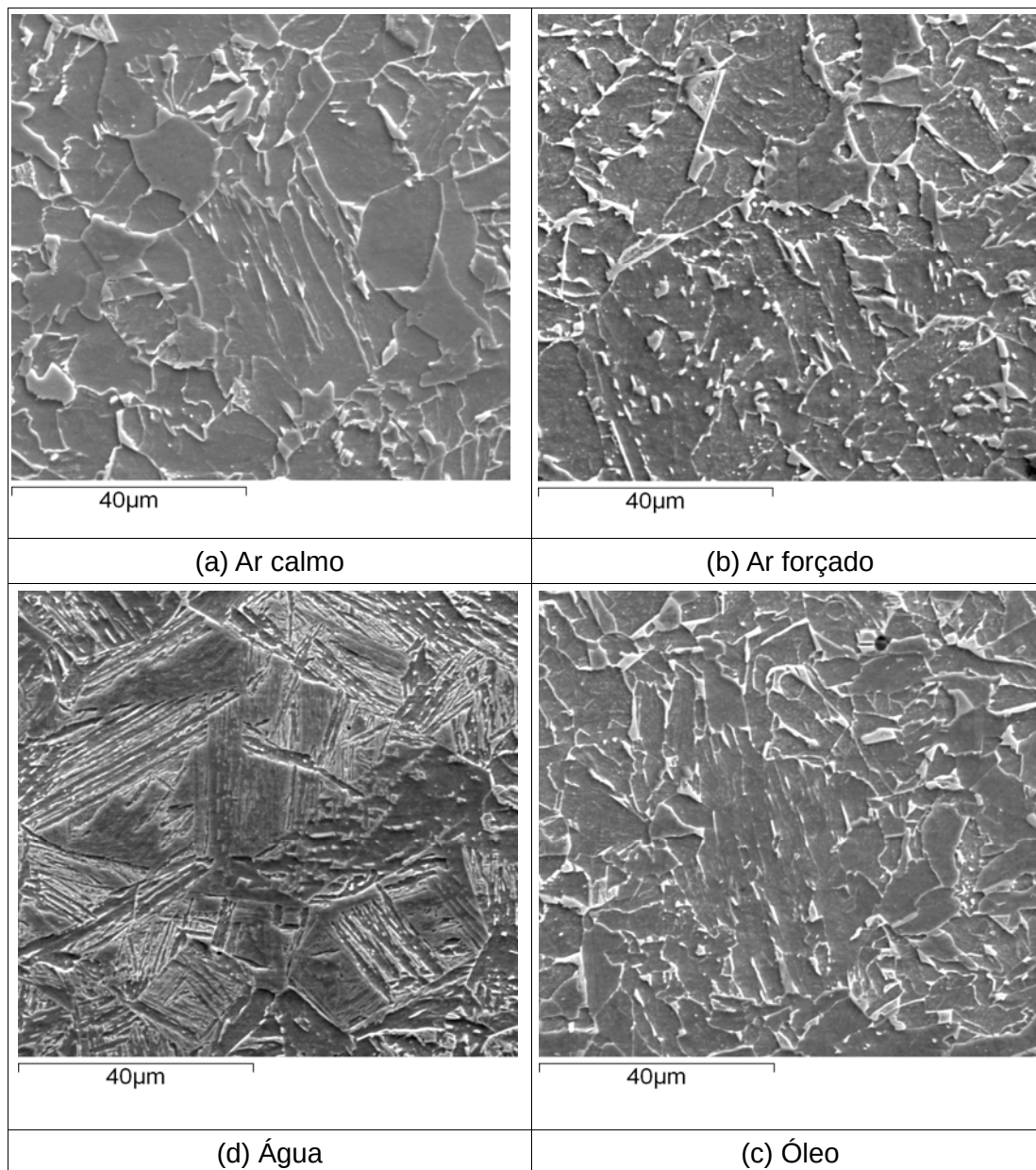


Figura 55 – Aço API 5L X80 (NbCrMoV) de $P_{cm} = 0,17\%$ submetido a tratamento térmico com transformações em resfriamento contínuo a partir de austenitização a 1000°C durante 30 minutos e resfriamento em diferentes meios. Caracterização em microscopia eletrônica de varredura. Ataque com Nital 2%.

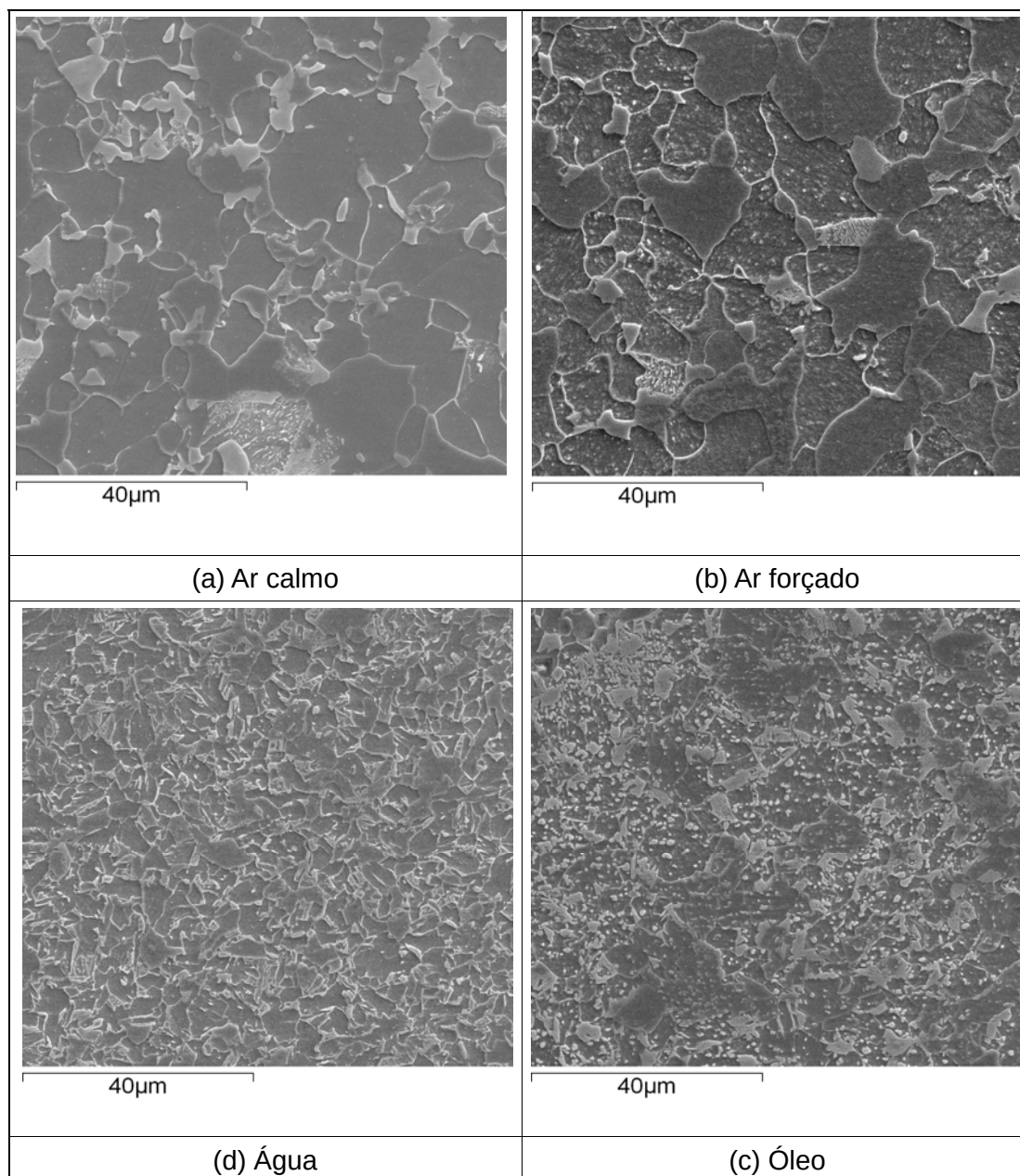


Figura 56 – Aço API 5L X80 (NbCrMoV) de $P_{cm} = 0,17\%$ submetido a tratamento térmico com transformações em resfriamento contínuo a partir de austenitização a 900°C durante 30 minutos e resfriamento em diferentes meios. Caracterização em microscopia eletrônica de varredura. Ataque com Nital 2%.

A evolução microestrutural em função da aplicação de diferentes ciclos térmicos encontra-se exposta na tabela 18.

Tabela 18 – Microestruturas caracterizadas a partir da evolução microestrutural do trecho reto API X80 de P_{cm} = 0,17% submetido a diferentes ciclos térmicos e microdurezas médias resultantes dos tratamentos térmicos (figuras 55 e 56).

Austenitização/ Meio resfriador	Ferrita (FP, FA FQP)	Agregados de ferrita e carbonetos	Bainita Granular (BG)	Bainita Superior (BS, FB)	Martensita de baixo Carbono (M)	AM	Média HV (0,05 kg)
1000°C / Água	sim	-	-	sim	sim	sim	275 ± 10
900°C / Água	sim	-	-	-	-	sim	246 ± 13
1000°C / Óleo	sim	sim	sim	sim	-	sim	224 ± 10
900°C / Óleo	sim	sim	sim	sim	-	sim	215 ± 07
1000°C / Ar forçado	sim	sim	sim	sim	-	sim	196 ± 10
900°C / Ar forçado	sim	sim	-	-	-	sim	181 ± 14
1000°C / Ar calmo	sim	sim	sim	sim	-	sim	187 ± 11
900°C / Ar calmo	sim	sim	-	-	-	sim	182 ± 12

Onde: Ferrita poligonal (FP), ferrita acicular (FA), ferrita quase poligonal (FQP), bainita granular (BG), bainita superior (BS), ferrita bainítica (FB), Martensita (M) e constituinte austenita-martensita (AM).

A figura 57 exibe a evolução da fração volumétrica de constituinte AM para os diferentes meios de resfriamento a partir de distintas temperaturas de austenitização visando determinar os efeitos do tamanho de grão da austenita prévia e correlacionar diferentes taxas de resfriamento com a evolução da fração volumétrica do AM. A figura 58 mostra a caracterização metalográfica com o ataque LePera modificado aplicado para revelar AM em microscopia óptica.

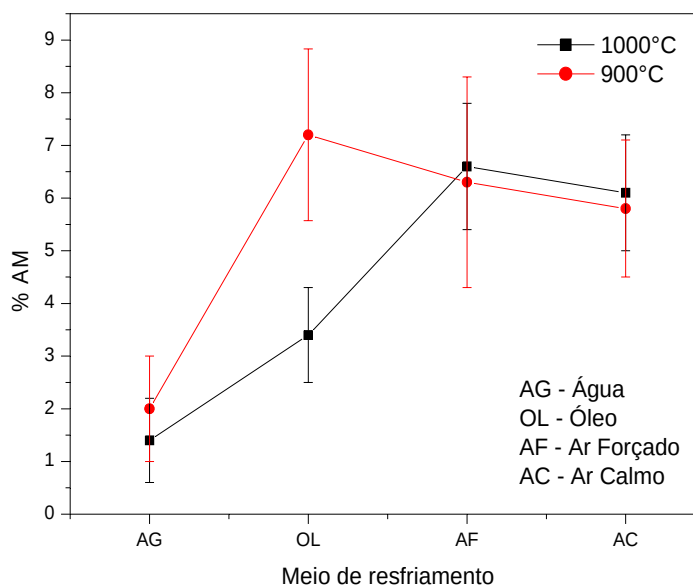


Figura 57 – Quantificação da fração volumétrica de constituinte AM.

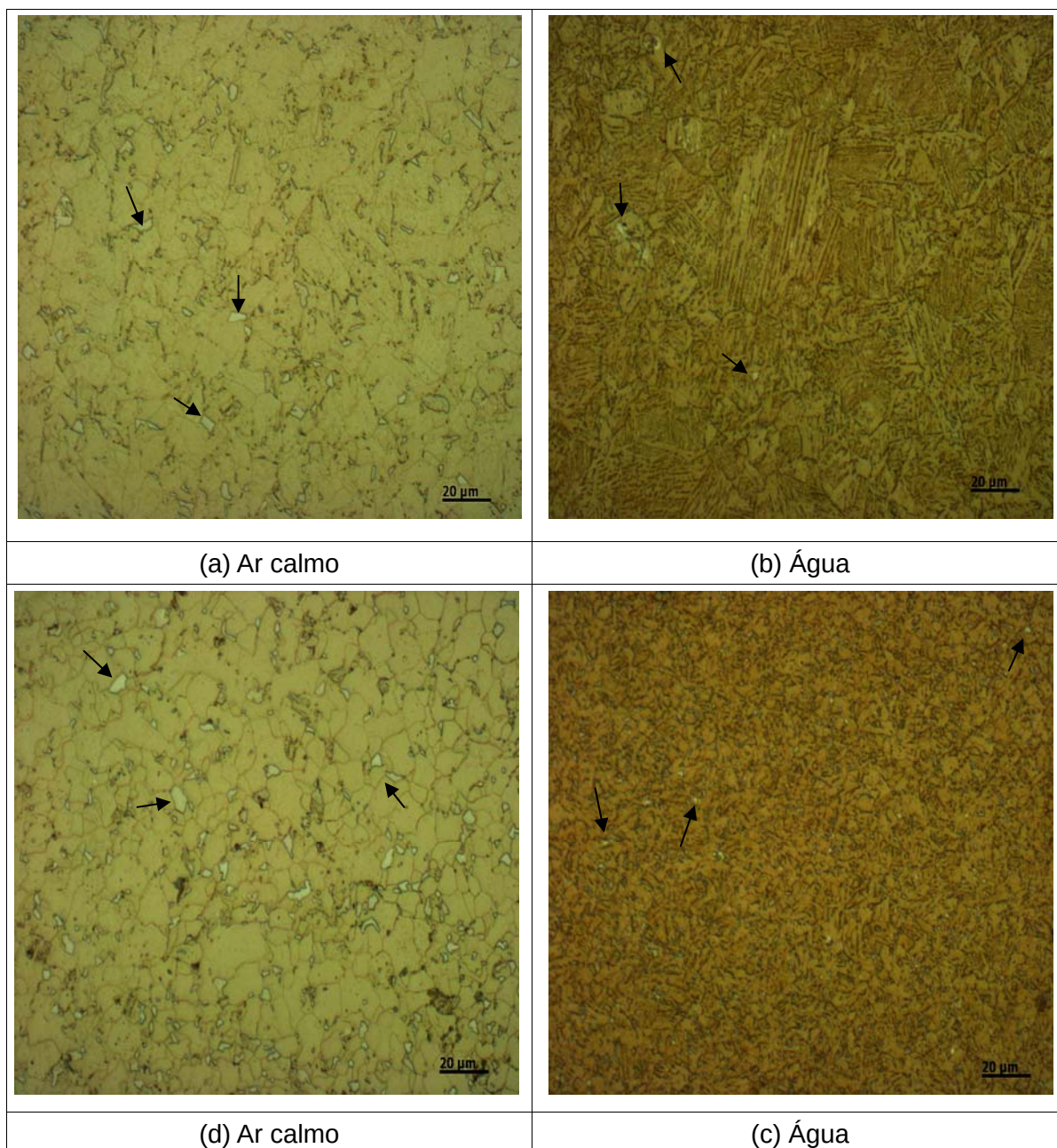


Figura 58 – (a) e (b) Trechos austenitizados a 1000°C e (c) e (d) a 900°C submetidos a diferentes taxas de resfriamento. Observação (em branco) de constituinte AM em microscopia óptica; ataque LePera Modificado.

Pode se observar que ocorre uma variação significativa para a fração volumétrica de constituinte AM somente para o meio de resfriamento em óleo, em função do tamanho de grão austenítico. Com a redução da taxa de resfriamento de água para ar calmo observa-se que a fração volumétrica de constituinte AM aumenta.

7.1.2.

Correlação entre microestrutura e propriedades mecânicas

A figura 59 correlaciona as microestruturas obtidas nos tratamentos térmicos de resfriamento contínuo com suas respectivas microdurezas HV (0,05 kg, 15s). A figura 60 estima, a partir dos valores de microdureza, os limites de resistência.

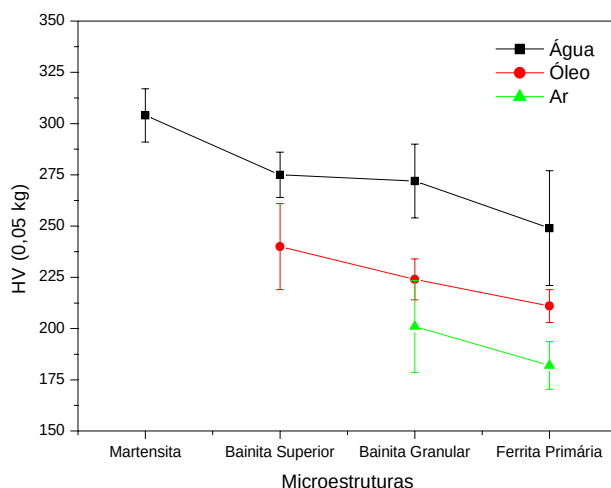


Figura 59 – Correlação entre microestrutura e microdureza obtida após tratamentos térmicos com transformações em resfriamento contínuo de amostras de aço API grau X80 ($P_{cm} = 0,17\%$) austenitizadas a 1000°C .

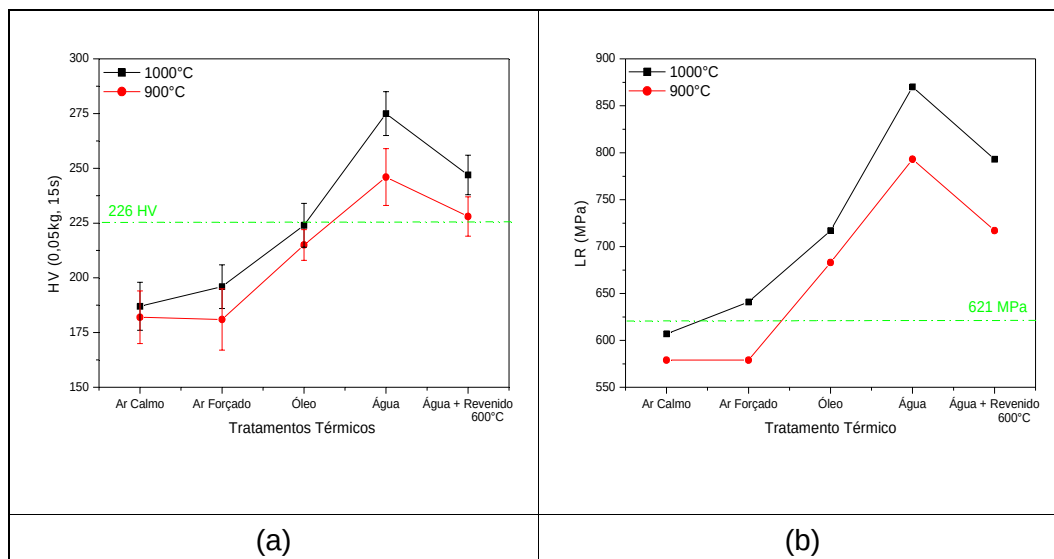


Figura 60 – (a) Microdurezas e (b) limite de resistência estimado em função dos tratamentos térmicos com transformações em resfriamento contínuo.

Para estabelecer um padrão de comparação (figura 60) foi aplicado a média de microdureza obtida para o trecho reto (226 HV) e o limite de resistência mínimo estabelecido pela API 5L X80.

Para o estado temperado (em água) a partir de 1000°C as propriedades de tração (sem o efeito de revenimento posterior) encontram-se na tabela 19, observando-se um aumento médio de 12% nos limites de escoamento e resistência comparativamente ao aço na condição de como recebido.

Tabela 19 – Propriedades mecânicas do trecho reto como recebido em comparação com o estado como temperado

API 5L X80 (P _{cm} = 0,17%)	Limite de escoamento (MPa)	Limite de resistência (MPa)	Alongamento (%)	Charpy	
				0°C	-40°C
Como recebido	604 ± 20	679 ± 09	21 ± 02	182 ± 33	147 ± 10
Como temperado	678 ± 22	764 ± 04	23 ± 01	230 ± 25	176 ± 04
Diferenças percentuais	12%		9,5%	26%	20%

A análise das imagens de fractografia dos corpos de prova de tração obtidos de amostras de aço API X80 submetidas a tratamentos térmicos de resfriamento contínuo a diferentes taxas de resfriamento (figura 61), mostra refinamento dos alvéolos de fratura dúctil em função da elevação da taxa de resfriamento, similar a resultados obtidos por Shanmugam, Ramiseti et al [25].

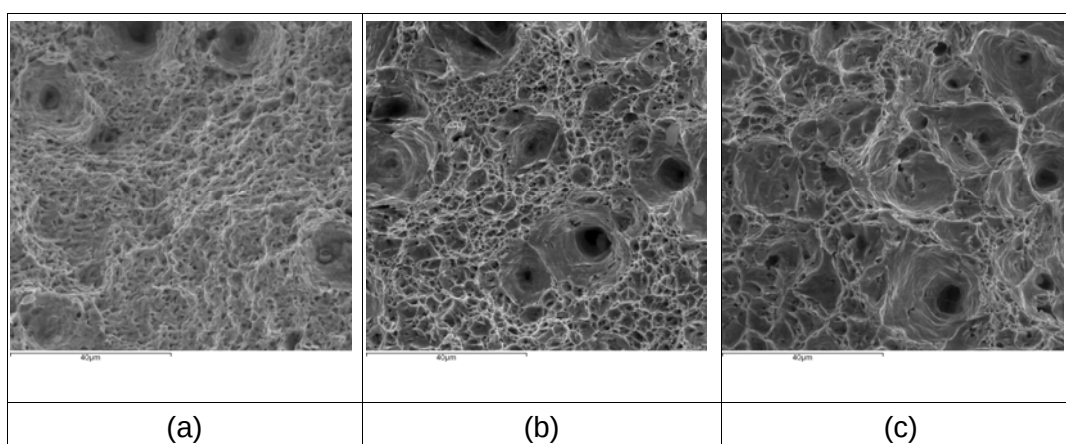


Figura 61 - Fractografia dos corpos de prova de tração do aço API X80 de P_{cm} = 0,17 % usinados a partir de amostras austenitizadas a 1000 e 900°C e resfriadas em água e ar calmo. (a) Austenitizado a 900 e resfriado em água, (b) Austenitizado a 1000 e resfriado em água e (c) Austenitizado a 1000 e resfriado em ar calmo.

7.1.3. Efeitos do revenimento na microestrutura e nas propriedades mecânicas após tratamentos térmicos I

Um dos efeitos do revenido sobre a microestrutura é a decomposição parcial ou total da austenita retida presente no constituinte AM. Porém devido a metaestabilidade deste constituinte uma certa fração não dissolvida em ferrita e carbonetos após a aplicação do ciclo térmico de revenimento foi observada, como revela a figura 62.

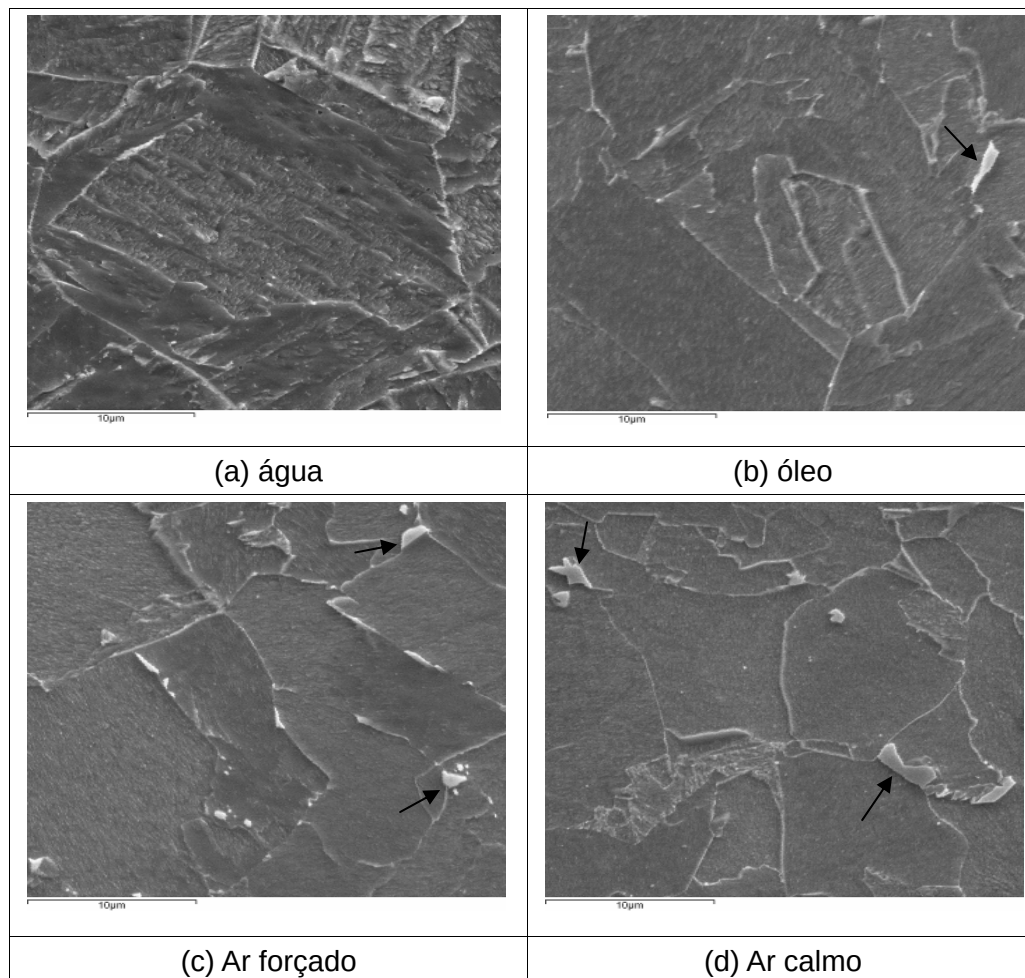


Figura 62 – Metaestabilidade do constituinte AM em aço API X80 revenido (500°C durante 1h). Ataque eletrolítico duplo de Ikawa, MEV.

A metaestabilidade do constituinte AM [40] pode ser observada pela presença deste constituinte em todas as amostras submetidas aos tratamentos térmicos de resfriamento contínuo seguidos de revenidos executados a temperaturas de encharque de 500°C e 600°C durante 1 hora. Observa-se que a morfologia tornou-se mais maciça e menos refinada e acicular com a redução da taxa de resfriamento aplicada, conforme indicado na figura 62d.

A figura 63 exibe os efeitos do revenimento sobre a microestrutura obtida por têmpera em água a partir de austenitização a 1000°C e 900°C.

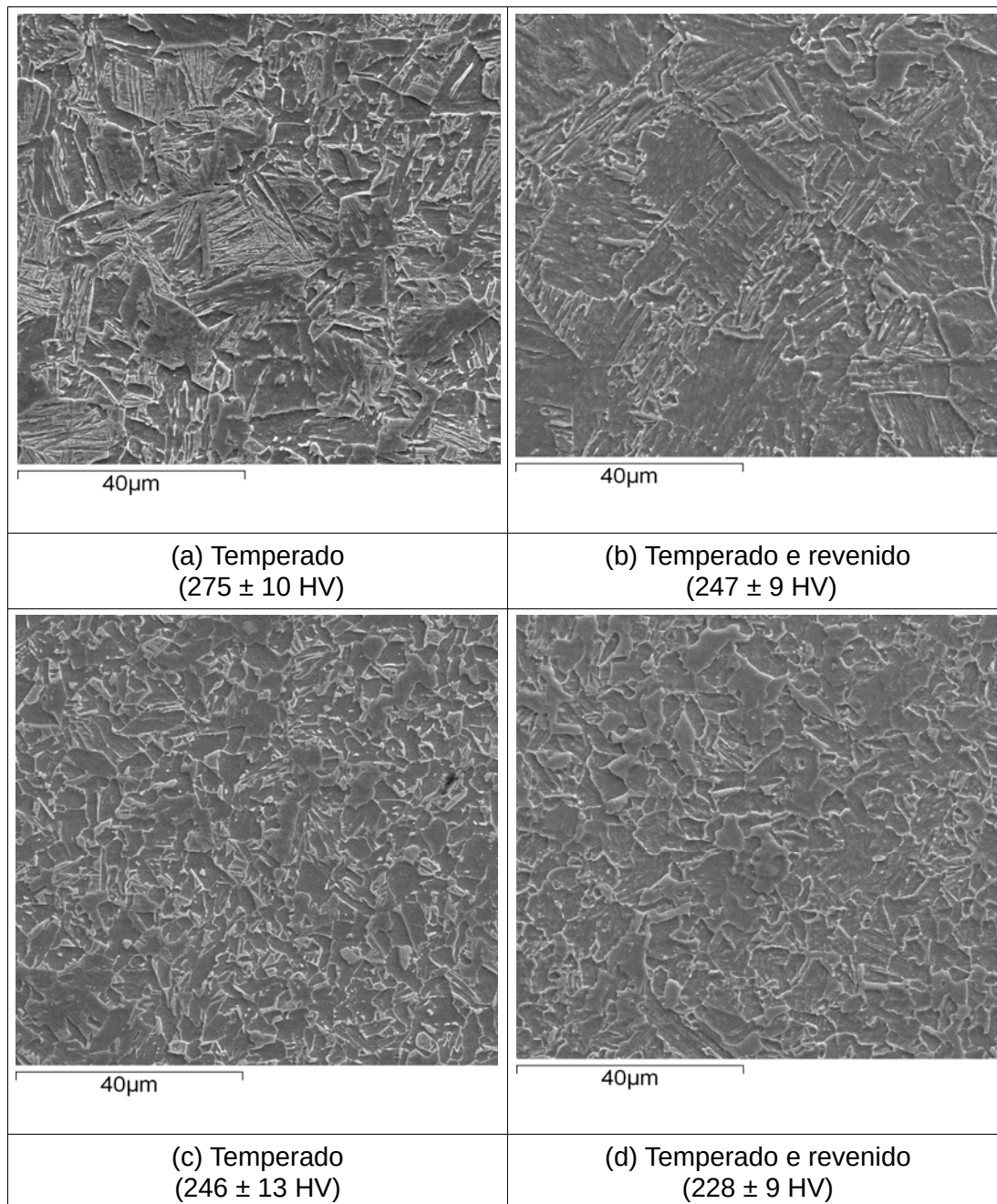


Figura 63 – Efeitos do revenimento a 600°C (1h) sobre a microestrutura e microdureza do aço API X80 temperado a partir de austenitização a 1000°C (a,b) e a 900°C (c,d).

A evolução da microdureza dos microconstituintes após a realização de revenimento (600°C) está mostrada na figura 64.

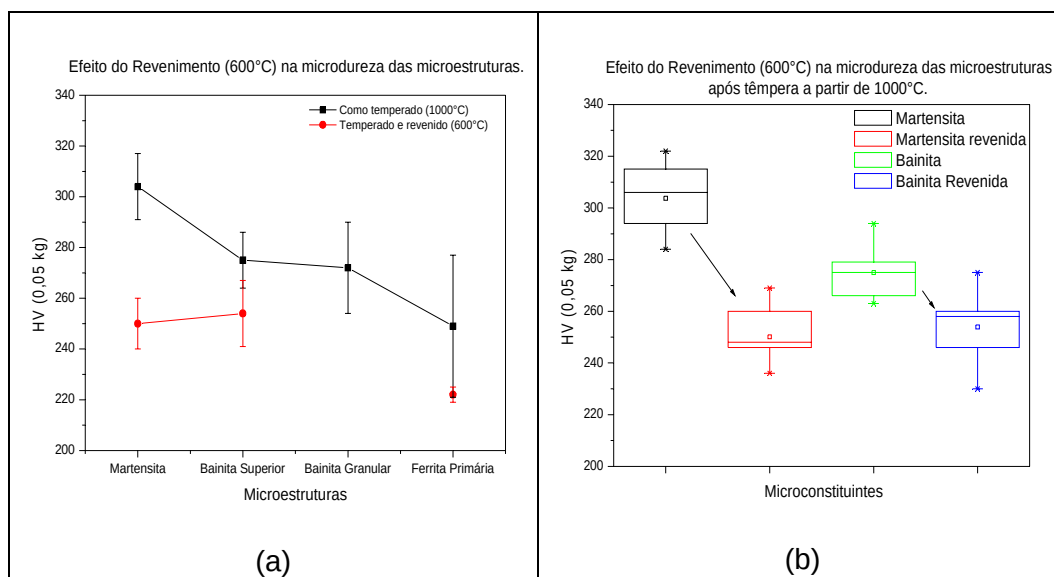


Figura 64 – Correlação entre microconstituintes e microdureza.

A microdureza da martensita revenida (250 HV) é 18% menor que a da martensita como temperada (304 HV). A microdureza média da bainita revenida (254 HV) é apenas 8% inferior a da bainita obtida após têmpera em água (275 HV), de acordo com a figura 64, indicando que o revenimento torna a dureza da martensita e da bainita similares.

As propriedades mecânicas em tração foram obtidas visando caracterizar, para os tratamentos térmicos com transformações em resfriamento contínuo e na condição de revenido posterior a 500°C (1h), o melhor meio de resfriamento que permita atingir os valores normalizados pela API 5L para o grau X80. Os resultados desta simulação encontram-se na figura 65.

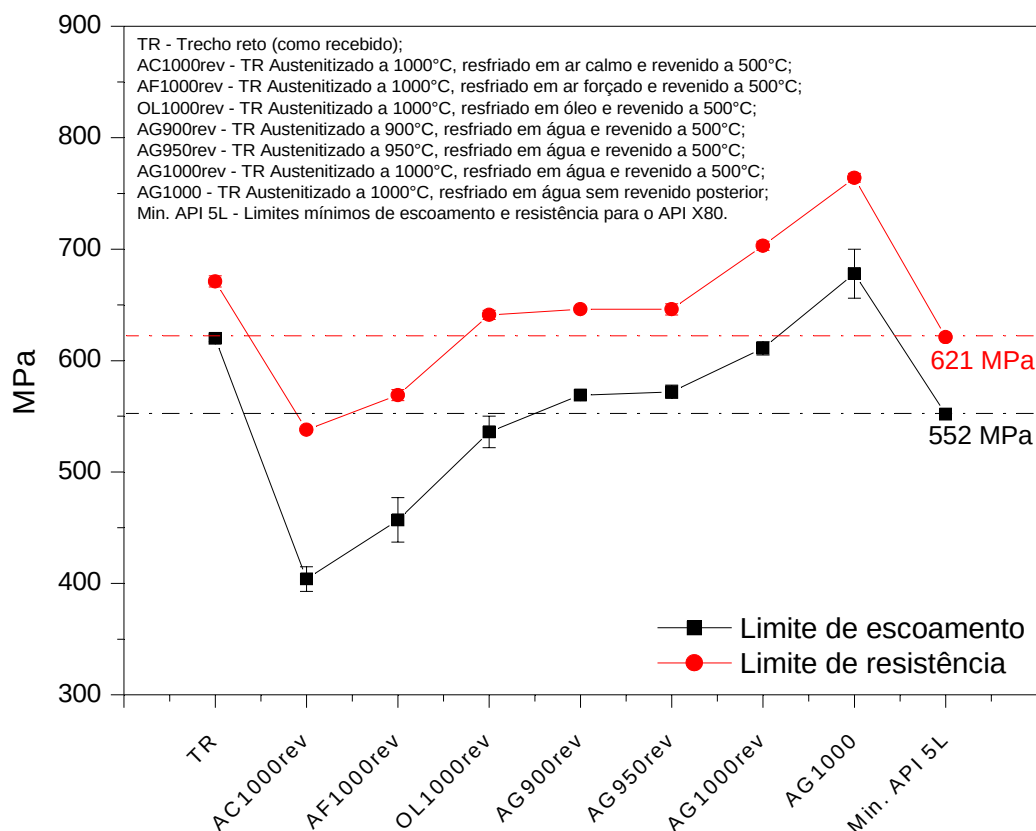


Figura 65 – Variação das propriedades mecânicas após realização dos tratamentos térmicos com transformações em resfriamento contínuo seguidos de revenido.

De acordo com os resultados obtidos (figura 65) a água é o melhor meio de resfriamento que permite atingir os limites de escoamento e resistência conforme especificado na norma API 5L para o grau X80, na faixa de temperaturas de austenitização de 900 a 1000°C. O melhor resultado foi obtido na condição de têmpera a partir de 1000°C, com resfriamento aplicado em ambas as superfícies da espessura de parede do trecho de tubo tratado, obtendo-se propriedades mecânicas excelentes.