

6

Resultados (Parte 03)

A parte 03 se refere aos tratamentos térmicos com transformações de resfriamento contínuo e aplicação de patamar isotérmico (tratamentos térmicos II).

6.1. Tratamentos térmicos II

Amostras do trecho reto do tubo de aço API X80 foram austenitizadas a 1000°C e resfriadas de modo contínuo até a realização de encharque de 15 min em patamar de resfriamento isotérmico, a partir do qual o resfriamento final foi conduzido em meios de resfriamento variados (água, ar calmo e forno), conforme citado na tabela 10. Foram realizados com o objetivo inicial de auxiliar na caracterização microestrutural das morfologias clássicas de bainitas, martensita e perlita, além da obtenção de valores padrões de microdureza. Na prática foi possível observar que a passagem pelo campo bifásico durante a etapa de resfriamento na temperatura de interesse resultava na formação de ferrita proeutetóide, onde a menor solubilidade do carbono (em comparação com a austenita) conduzia a um processo de difusão do carbono, enriquecendo a austenita não transformada. As taxas de resfriamento aplicadas durante a etapa final de resfriamento contínuo determinavam a microestrutura formada a partir destas ilhas de austenita enriquecidas em carbono.

6.1.1. Caracterização microestrutural após resfriamento contínuo com aplicação de patamar isotérmico a temperatura de 700°C

A aplicação da isoterma de 700°C visou obter produtos de altas temperaturas de transformação, como a perlita. A figura 50 exibe a caracterização microestrutural obtida após etapa de resfriamento com permanência isotérmica a 700°C e com variações nas condições finais de resfriamento (água, ar calmo e forno).

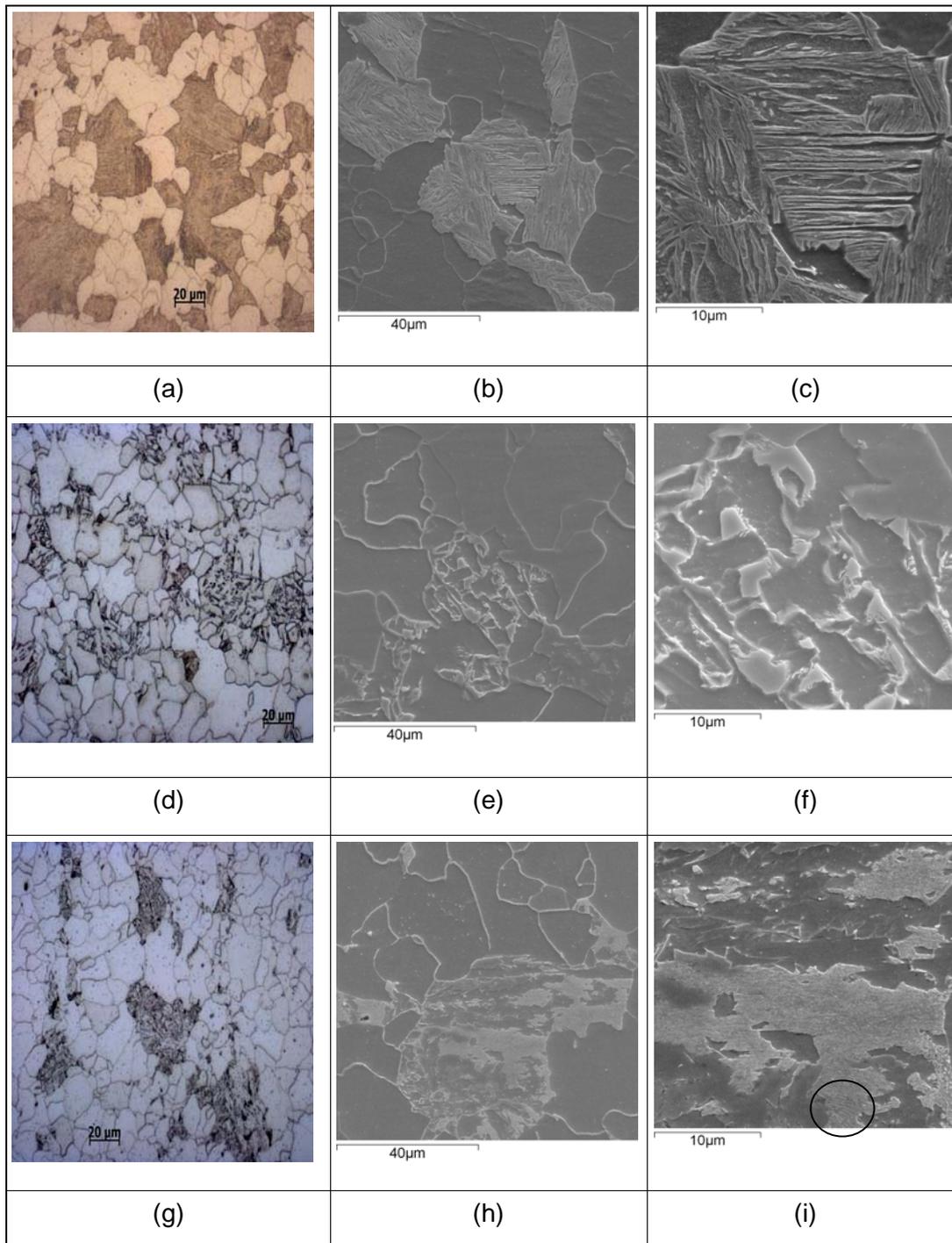


Figura 50 – Tratamento térmico com transformações em resfriamento contínuo e aplicação de patamar isotérmico a 700°C (15 min) seguido de resfriamento final em água (a,b,c), em ar calmo (d,e,f) e no forno (g,h,i). Microscopia óptica com ataque LePera modificado revelando a presença de constituinte AM (em branco) e microscopia eletrônica da varredura. Ataque nital 2%.

Nesta etapa o trecho reto após ser resfriado continuamente entre 1000°C e 700°C, foi mantido em condições isotérmicas a 700°C durante 15 min e submetido a resfriamento final em diferentes meios para a interrupção das reações na isoterma. Foi observado que a perlita não se transforma durante a etapa de resfriamento isotérmico (tempo insuficiente), pois após o resfriamento

final em água, as ilhas de austenita enriquecidas em carbono se transformaram em martensita (figura 50 a,b,c). Com o resfriamento final em ar calmo as ilhas martensíticas foram substituídas por ilhas de bainita granular (figura 50 d,e,f). Na figura 50f parte da austenita retida se encontrava parcialmente decomposta em agregados de ferrita e cementita. Alguma morfologia próxima a lamelar pode ser detectada e destacada na figura 50i.

A figura 51a exibe a microestrutura de um aço grau API X70 com matriz ferrítica-perlítica, cuja morfologia da perlita clássica serviu de padrão para a comparação com a perlita obtida após tratamento térmico do aço API X80. No aço API X70, figura 51a, observa-se as morfologias do microconstituente perlita e de agregados eutetóides de ferrita e cementita em matriz ferrítica. Para o aço grau API X80 de $P_{cm} = 0,17\%$, deste estudo, foi possível obter microconstituintes de morfologia similar resfriando a partir do campo austenítico (1000°C) até a temperatura de 700°C , onde foi submetido a encharque de 15 minutos, e prosseguindo o resfriamento a taxas bem baixas dentro do forno (figura 51b). Este resfriamento, dentro do forno, manteve a temperatura da amostra próxima de 700°C por um período de tempo maior que 15 minutos o que promoveu um tempo maior para as transformações ocorrerem.

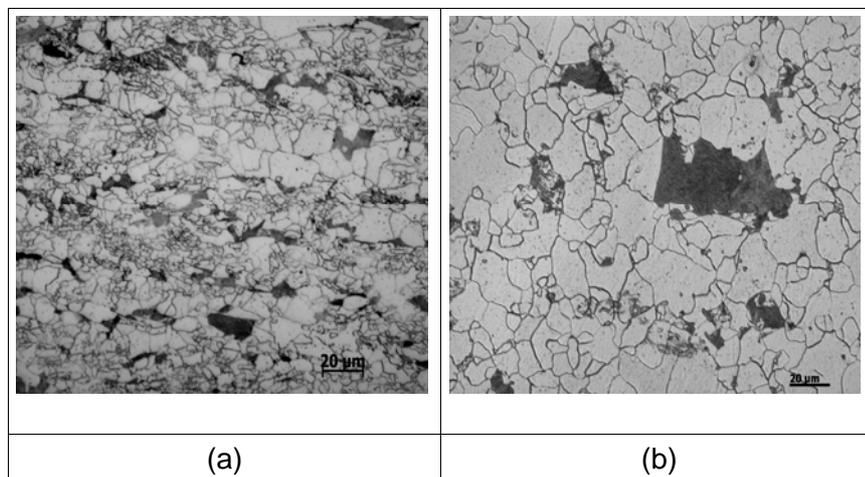


Figura 51 – (a) Microestrutura ferrítica, perlítica exibida por aços dos graus API X70 e (b) API X80 com 0,05% de carbono e $P_{cm} = 0,17\%$ e austenitizado a 1000°C , resfriado até a isoterma de 700°C (15 min) e submetido a resfriamento, até a temperatura ambiente, dentro do forno (condições lentas de resfriamento). Microscopia Óptica, Nital 2%.

6.1.2. Caracterização microestrutural após resfriamento contínuo com aplicação de patamar isotérmico nas temperaturas Bs (623°C), Bi (542°C) e Ms (462°C)

A aplicação da etapa de resfriamento isotérmico com patamar de 623°C, referente a temperatura calculada para o início da transformação bainítica, objetivou caracterizar a morfologia clássica da bainita superior (feixes de ferrita bainita isentos de precipitação interna, porém com precipitação interfacial). A aplicação de etapa de resfriamento isotérmico com patamar de 542°C (Bi) buscou caracterizar a morfologia clássica da bainita inferior (feixes de ferrita bainita contendo precipitação interna e nos contornos das ripas bainíticas). A etapa de resfriamento isotérmico com patamar de 462°C visava observar a reação martensítica.

A figura 52 exhibe a caracterização microestrutural, com diferentes ataques químicos, do tratamento térmico na temperatura Bs. A figura 53 mostra os resultados dos tratamentos de resfriamento contínuo com aplicação de patamares isotérmicos a 623°C (Bs), 542°C (Bi) e 462°C (Ms) durante 15 minutos seguido de resfriamento final em água e a figura 54 mostra uma variação do tratamento na isoterma Ms, porém com resfriamento final em ar calmo.

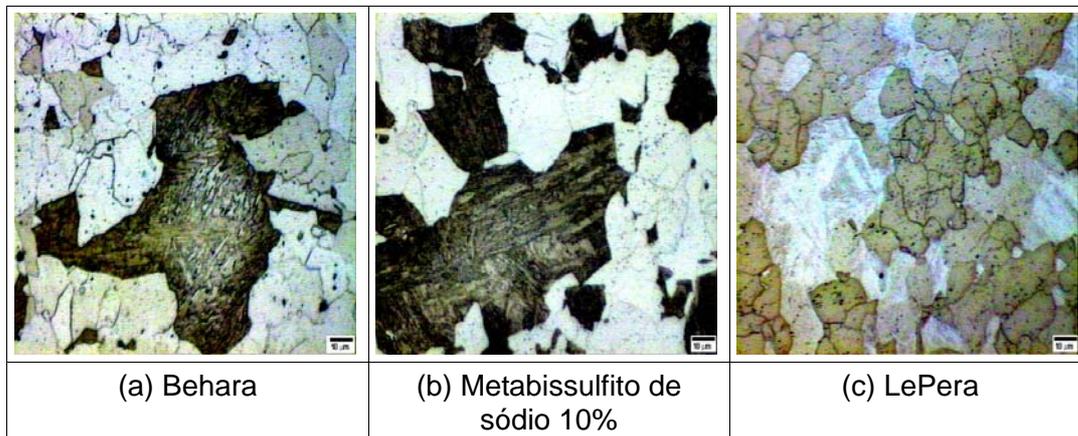


Figura 52 – Tratamento térmico com transformações em resfriamento contínuo e aplicação de patamar isotérmico a 623°C (15 min) seguido de resfriamento final em água. Microscopia Óptica.

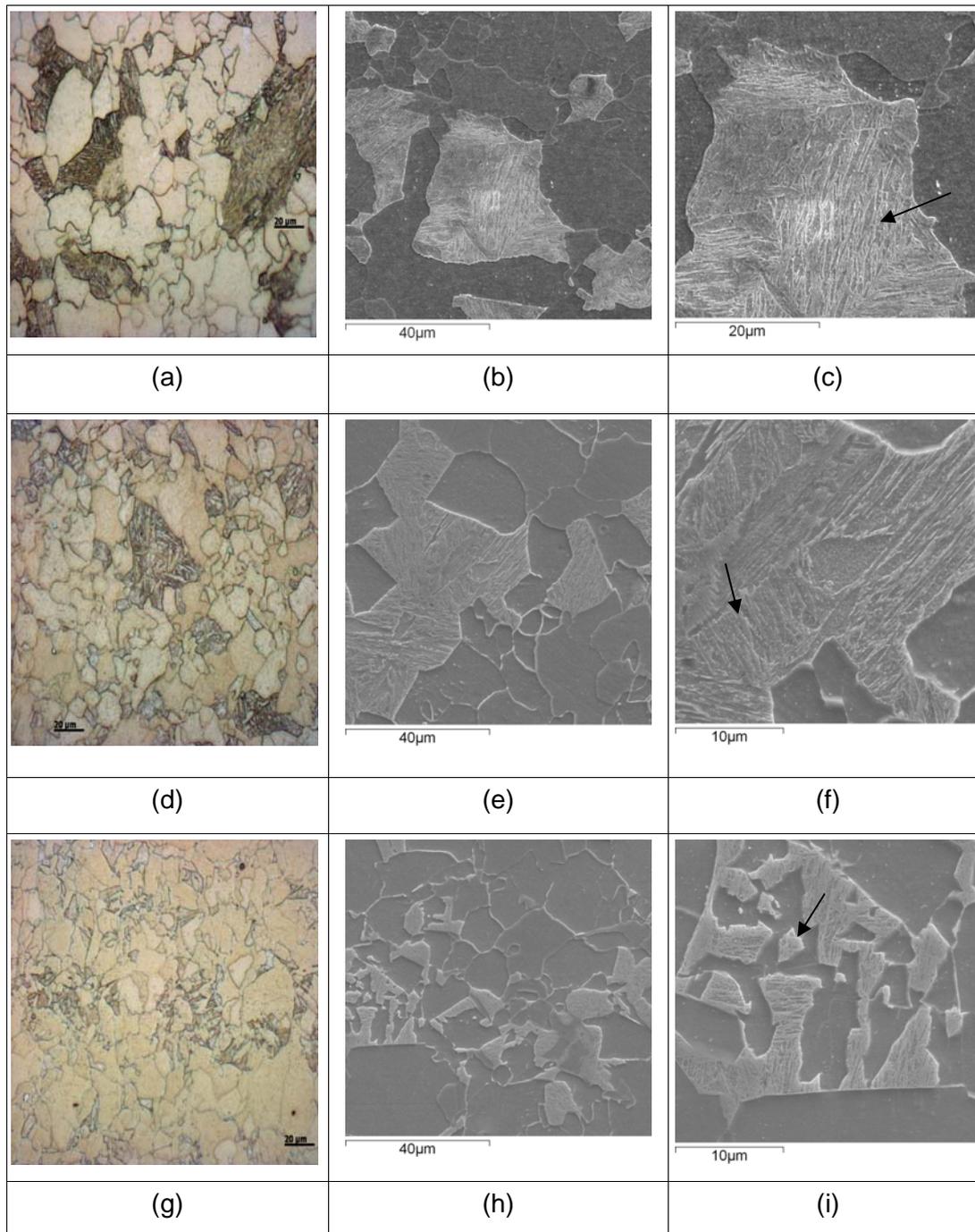


Figura 53 – Tratamento de resfriamento contínuo com aplicação de patamares isotérmicos a 623°C (a, b,c), 542°C (d,e,f) e 462°C (g,h,i) durante 15 minutos seguido de resfriamento final em água. Microscopia óptica com ataque LePera modificado revelando a presença de constituinte AM (em branco) e microscopia eletrônica da varredura com ataque nital 2%.

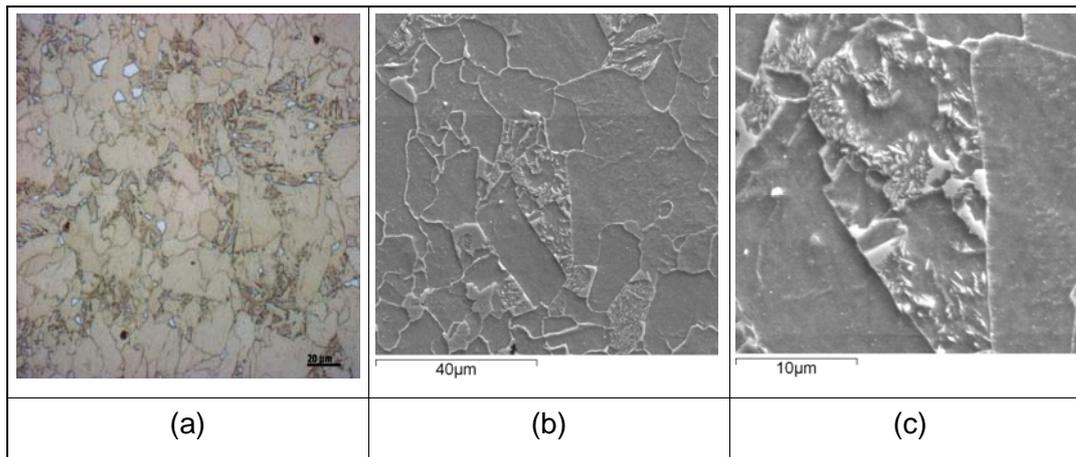


Figura 54 – Tratamento térmico com transformações em resfriamento contínuo e aplicação de patamar isotérmico a 462°C (15 min) seguido de resfriamento final em ar calmo. (a) Resultados para o LePera modificado revelando a presença de constituinte AM (em branco). (b,c) Microscopia eletrônica da varredura. Ataque com nital 2%.

O aço API X80 resfriado continuamente entre 1000°C e 623°C, onde foi mantido em condições isotérmicas a 623°C durante 15 min, foi submetido a resfriamento final em água. Os feixes de ferrita bainítica com a morfologia clássica (lenticular) podem ser observados na figura 53c. A imagem (f), da figura 53, mostra feixes de ferrita bainítica com a morfologia clássica (lenticular) exibindo precipitação interna, o que caracteriza a bainita inferior.

Após resfriar continuamente, entre 1000°C e 462°C (Ms), amostras de aço API X80 foram mantidas em condições isotérmicas a 462°C durante 15 min e na seqüência submetidas a resfriamento final em água (figura 53 g,h,i) revelando feixes de ferrita bainítica associados com martensita no interior de alguns blocos que são morfologicamente similares ao constituinte AM. O resfriamento final conduzido em ar calmo (figura 54 a,b,c) revelou a formação de ilhas de constituinte AM e agregados de ferrita e cementita. A microestrutura final foi determinada pela taxa de resfriamento aplicada após a permanência na temperatura de 462°C. Nesta isoterma (Ms) o refino microestrutural foi maior, o que pode ser observado comparando visualmente os resultados exibidos na figura 53.

6.2. Fração volumétrica

A fração volumétrica das ilhas de martensita / bainita na matriz ferrítica variou na faixa de 15 a 30%, para todos os tratamentos térmicos com aplicação de patamar isotérmico de resfriamento e resfriamento final em água.

As condições finais de resfriamento influenciam diretamente na microestrutura final, alterando a fração volumétrica do constituinte AM. A aplicação de taxas de resfriamento muito altas (água) ou muito baixas (forno) tende a obter baixas frações volumétricas de constituinte AM. Um exemplo da variação da fração volumétrica de AM com a taxa de resfriamento foi obtido para o tratamento térmico com transformações em resfriamento contínuo e aplicação de patamar isotérmico a 700°C, obtendo $3,3 \pm 1,65\%$ e $0,5 \pm 0,4\%$ de constituinte AM, para resfriamento final aplicado em ar calmo e no forno, respectivamente. Observa-se que a faixa de fração volumétrica inicial de AM no trecho reto sem tratamento térmico foi de 4 a 10%.

6.3. Resultados de microdureza

Os resultados de microdureza HV revelam uma diferença significativa de dureza entre as ilhas de martensita / bainita e a matriz ferrítica proeutetóide para todos os tratamentos térmicos com aplicação de patamar isotérmico de resfriamento e resfriamento final em água. Para as ilhas martensíticas / bainíticas os níveis médios de microdureza foram superiores a 300 HV (na faixa entre 275 a 375) enquanto que para a ferrita proeutetóide os valores médios de microdureza não ultrapassaram 175 HV (na faixa entre 150 a 175).