

4

Resultados (Parte 01)

Os resultados foram divididos em oito partes que se correlacionam direta ou indiretamente entre si. A parte 01 mostra a caracterização do trecho reto (tubo na condição de como recebido, antes do curvamento) importante para a compreensão das diferenças que ocorrem na região curvada.

4.1.

Caracterização microestrutural do trecho reto

As figuras 30 e 31 exibem a microestrutura, em cortes longitudinal e transversal ao sentido de laminação, do tubo API X80 deste estudo no trecho reto.

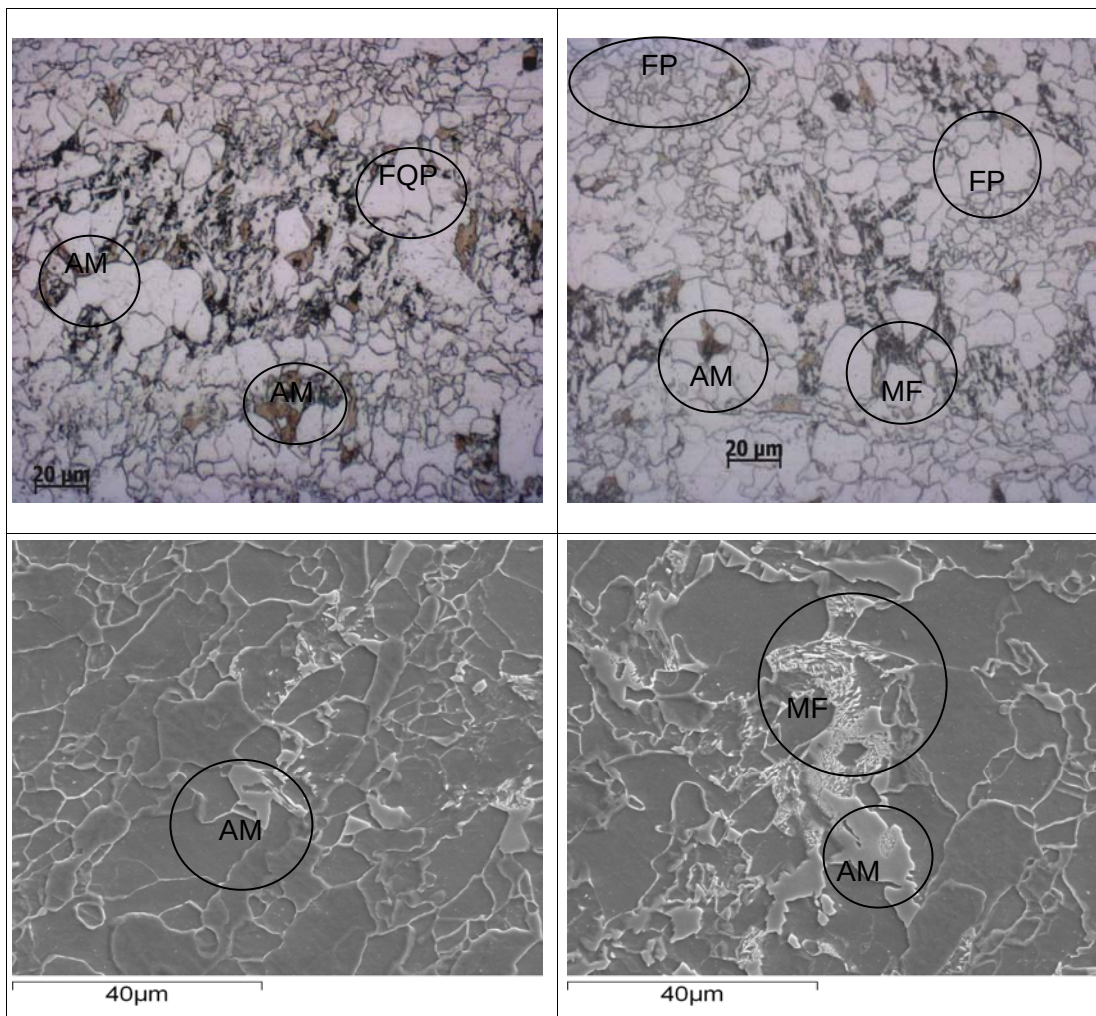


Figura 30 – Microscopias Óptica e eletrônica de varredura do trecho reto, longitudinal ao sentido de laminação, com nital 2%.

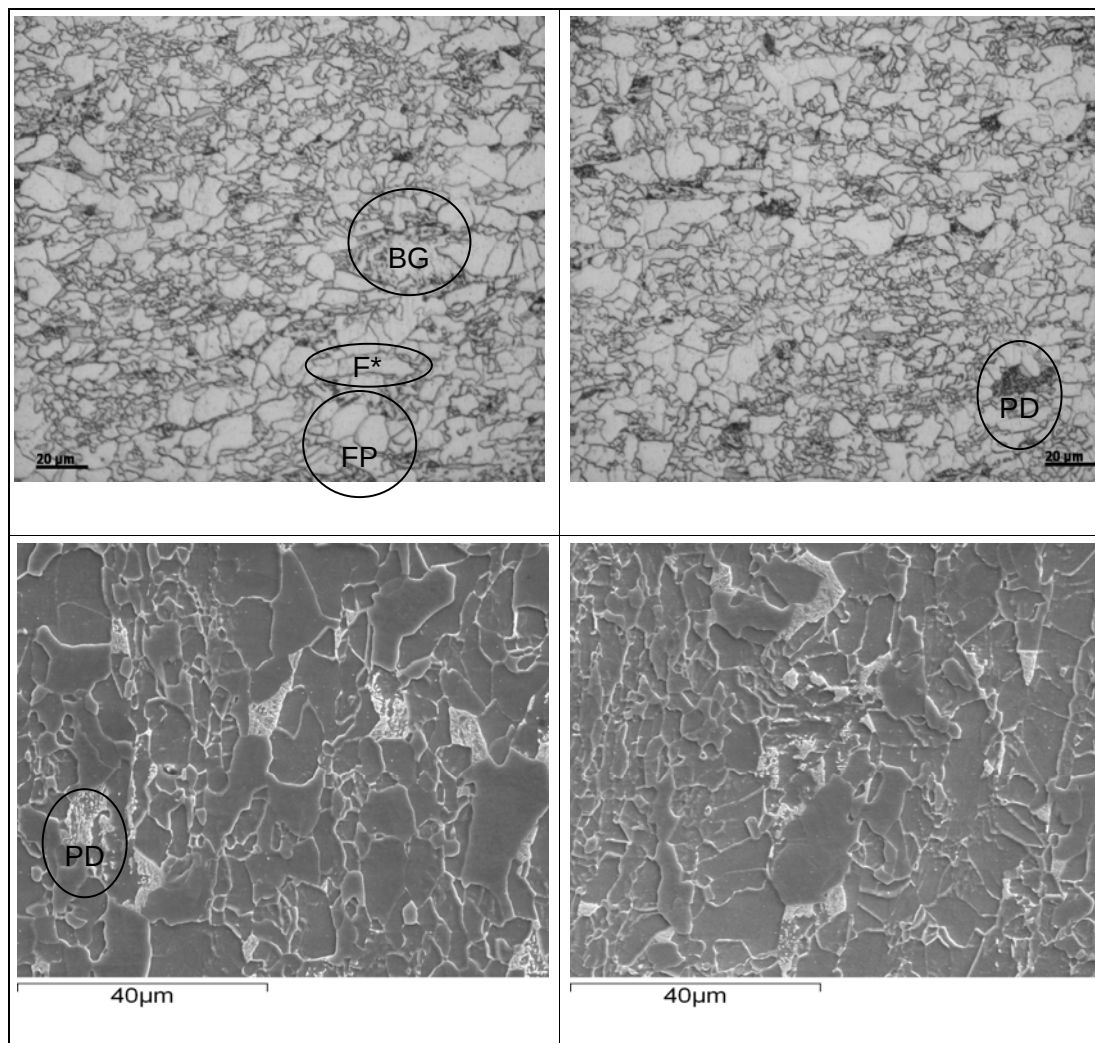


Figura 31 – Microscopias Óptica e eletrônica de varredura do trecho reto, transversal ao sentido de laminação, com nital 2%.

A partir das imagens das figuras 30 e 31 é possível caracterizar a ferrita primária (proeutetóide) com morfologia poligonal (FP), quase-poligonal (FQP), grãos alongados (F*) na direção de laminação (não necessariamente grãos achatados). As microfases (MF), figura 32, observadas são constituinte austenita-martensita (AM) e agregados eutetóides de ferrita e carbonetos (perlita degenerada (PD) ou bainita inferior (BI)). O constituinte AM pode ser observado compondo a bainita granular (BG), figura 33, ou disperso na matriz ferrítica (massivo ou parcialmente decomposto), como observado na figura 32 (a). Alguns grãos morfologicamente similares a bainita superior (BS) também foram observados no trecho reto, o que pode ser observado na figura 33d.

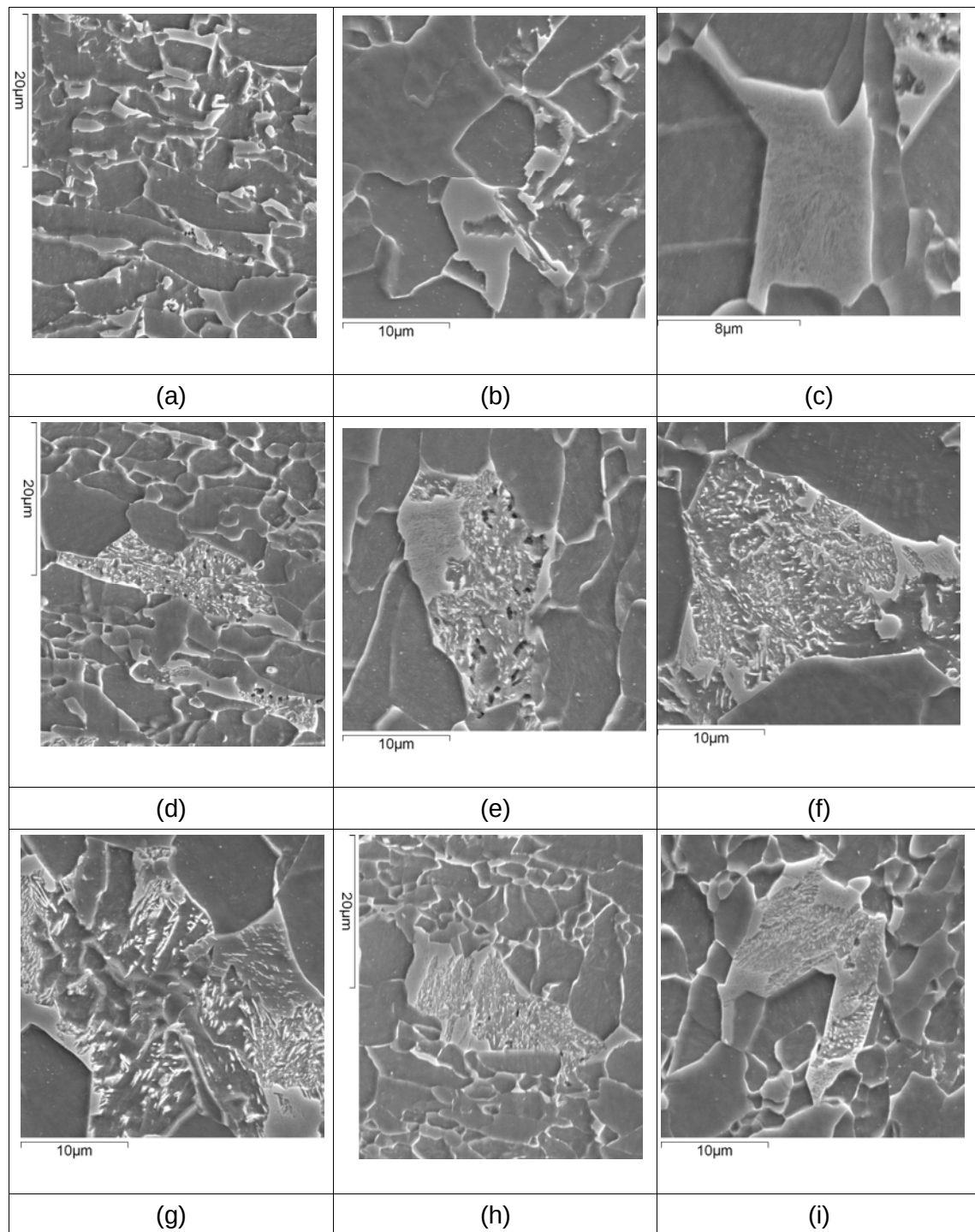


Figura 32 – Constituinte AM disperso e microfases no trecho reto do tubo API X80 de $P_{cm} = 0,17\%$. (a) AM disperso na matriz ferrítica (marmorizado, pois em branco intenso são precipitados); (b) e (c) AM massivo; (d), (e), (f) e (g) AM parcialmente decomposto em agregados eutetóides de ferrita e carbonetos; (h) e (i) AM decomposto em bainita inferior. Ataque Nital 2%.

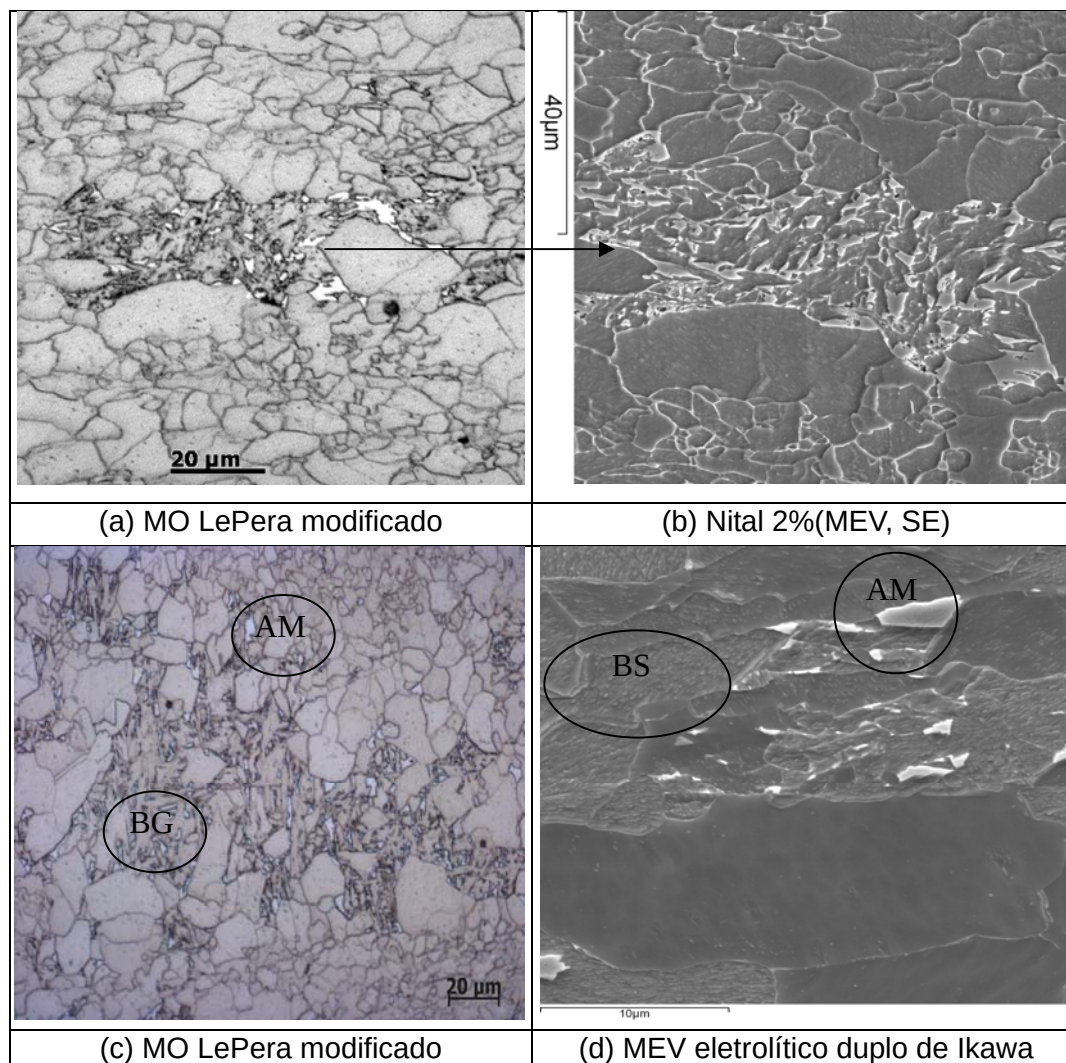


Figura 33 – Morfologia da bainita granular. Tubo de aço API grau X80. (a) e (b) transversal a laminação e (c) longitudinal a laminação e (d) Constituinte AM, grãos ferríticos e grãos bainíticos (bainita superior) no trecho reto.

No trecho reto utilizando o ataque eletrolítico de Ikawa e microscopia eletrônica de varredura foram observados grãos ferríticos, que apresentavam o aspecto mais liso (ferrita proeutetóide) em baixo relevo e grãos cujo aspecto “esbranquiçado” sugere precipitação (figura 33d) que parece seguir a orientação do grão, necessitando, no entanto, de confirmação por microscopia eletrônica de transmissão.

Ao aplicar ataque colorido no trecho reto foi observado que os grãos aparentemente ferríticos apresentavam coloração distinta (figura 34a), branco e amarelo, o que pode estar associado aos dois tipos de grãos observados na figura 33d por microscopia eletrônica de varredura. Porém, esta diferença de coloração também pode ser associada a orientação cristalográfica. Ao austenitizar o trecho reto a 1000°C (30 min) e proceder a resfriamento em óleo

(figura 34b) e em ar calmo (figura 34c) observa-se que o reagente Behara revelou em amarelo, e não em tons de cinza e azul citados na tabela 03, os grãos de bainita superior (para ampla faixa de resfriamento). Isto pode está associado aos grãos bainíticos observados na figura 33d.

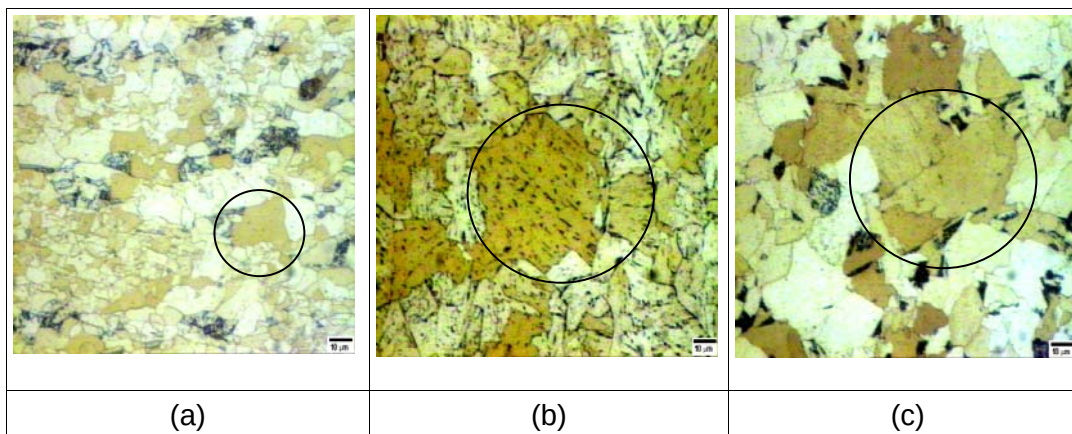


Figura 34 – Aço API X80 (a) trecho reto, (b) temperado em óleo, (c) normalizado. Atacado com reagente Behara.

4.1.1.

Fração volumétrica, tamanho de grão e microdureza

A tabela 14 sumariza os resultados obtidos para a fração volumétrica dos microconstituintes do trecho reto, assim como os respectivos tamanhos de grão e microdurezas.

Tabela 14 – Caracterização microestrutural do trecho reto.

Fases	Fração Volumétrica (%)	Tamanho Médio de Grão (μm)	Microdureza HV (0,05 kg) (transversal)
Ferrita (Poligonal, quase poligonal)	88,4	9,45 $\pm$ 2,1 (longitudinal) 7,52 $\pm$ 2,2 (transversal)	222 $\pm$ 19
Constituinte AM	7,1 $\pm$ 2,9	7,3 $\pm$ 2,9	253 $\pm$ 8,0
Agregados de ferrita e carbonetos	4,5 $\pm$ 2,8	15 $\pm$ 7,3	219 $\pm$ 15
Bainita Granular	Composta por Constituinte AM e ferrita	40 $\pm$ 26	261 $\pm$ 25

A ferrita recristalizada induzida por deformação, oriunda da chapa laminada, presente no tubo API X80 apresenta uma faixa de tamanho de grão mais refinada com média de microdureza Vickers de 216 ± 5 e tamanho médio de grão igual ou inferior a $4 \mu\text{m}$. A média geral de microdureza do trecho reto foi de 226 HV (0,5 kg).

4.1.2. Precipitação interfásica

Alguns grãos ferríticos, possivelmente, apresentando precipitação interfásica ou outro fator de endurecimento adicional (como encruamento) foram observados no trecho reto do tubo. O gráfico da figura 35 exibe a distribuição de microdureza para 100 grãos individuais de ferrita. A comparação entre as distribuições de microdureza dos grãos de ferrita é realizada para o trecho reto como recebido e para a parte interna da espessura de parede na curva (na região do intradorso 2500 Hz) a qual foi submetida a um ciclo térmico de austenitização e resfriamento em ar calmo, similar a uma normalização, provocado pelo curvamento a quente.

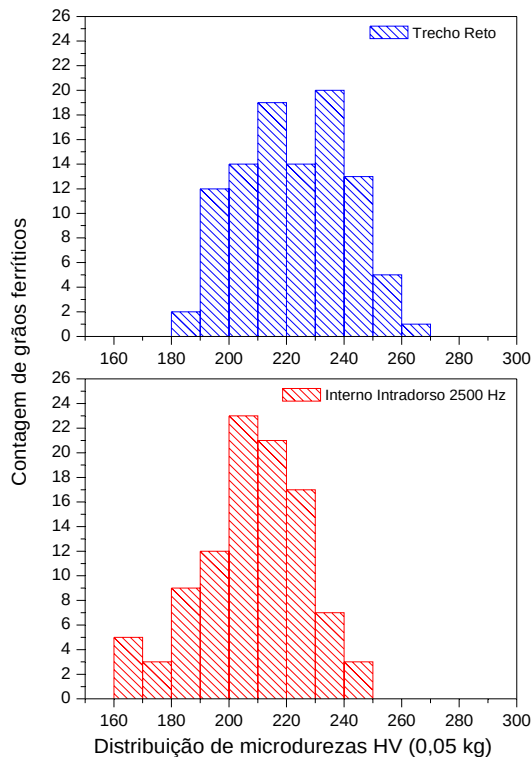


Figura 35 – Distribuição de microdurezas em grãos ferríticos do trecho reto e parte interna da curva.

Esta comparação, figura 35, identificou que ocorre amaciamento quando se pratica a normalização do trecho reto.

Por microscopia eletrônica de transmissão foi possível observar que o trecho reto com recebido apresenta precipitados do tipo II (30 nm a 300 nm) formados durante a laminação a quente, de acordo com o exibido na figura 36. A precipitação interfásica apresenta precipitados mais refinados, do tipo III (abaixo de 20 nm).

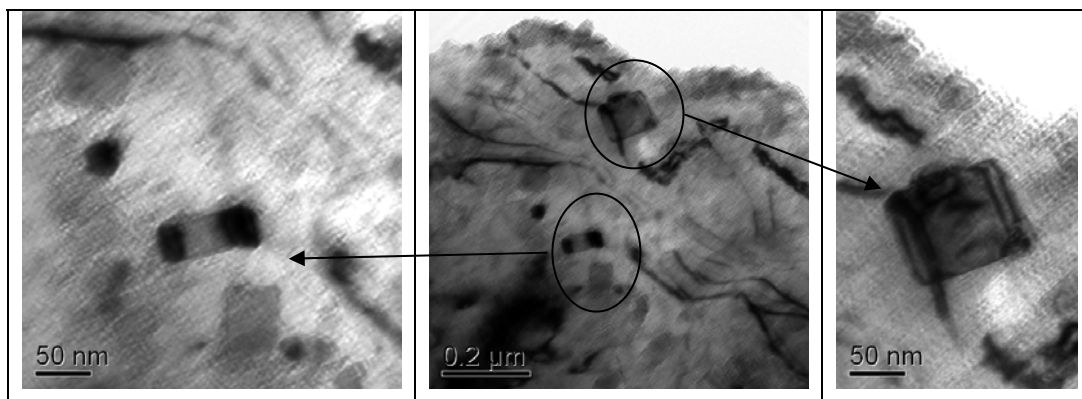


Figura 36 – Trecho reto, precipitados do tipo II observados por microscopia eletrônica de transmissão em campo claro.

4.1.3. Linhas de microsegregação

As medidas de microdureza HV(0,5kg) nas regiões de microsegregação e da matriz de regiões adjacentes mostram média igual a 264 ± 25 e 205 ± 11 HV, respectivamente. A figura 37 exibe a microestrutura, nestas regiões de microsegregação, localizadas nas regiões centrais da espessura do trecho reto, onde podem ser identificadas a presença do microconstituente AM e precipitação interna em grãos ferríticos (figura 37d).

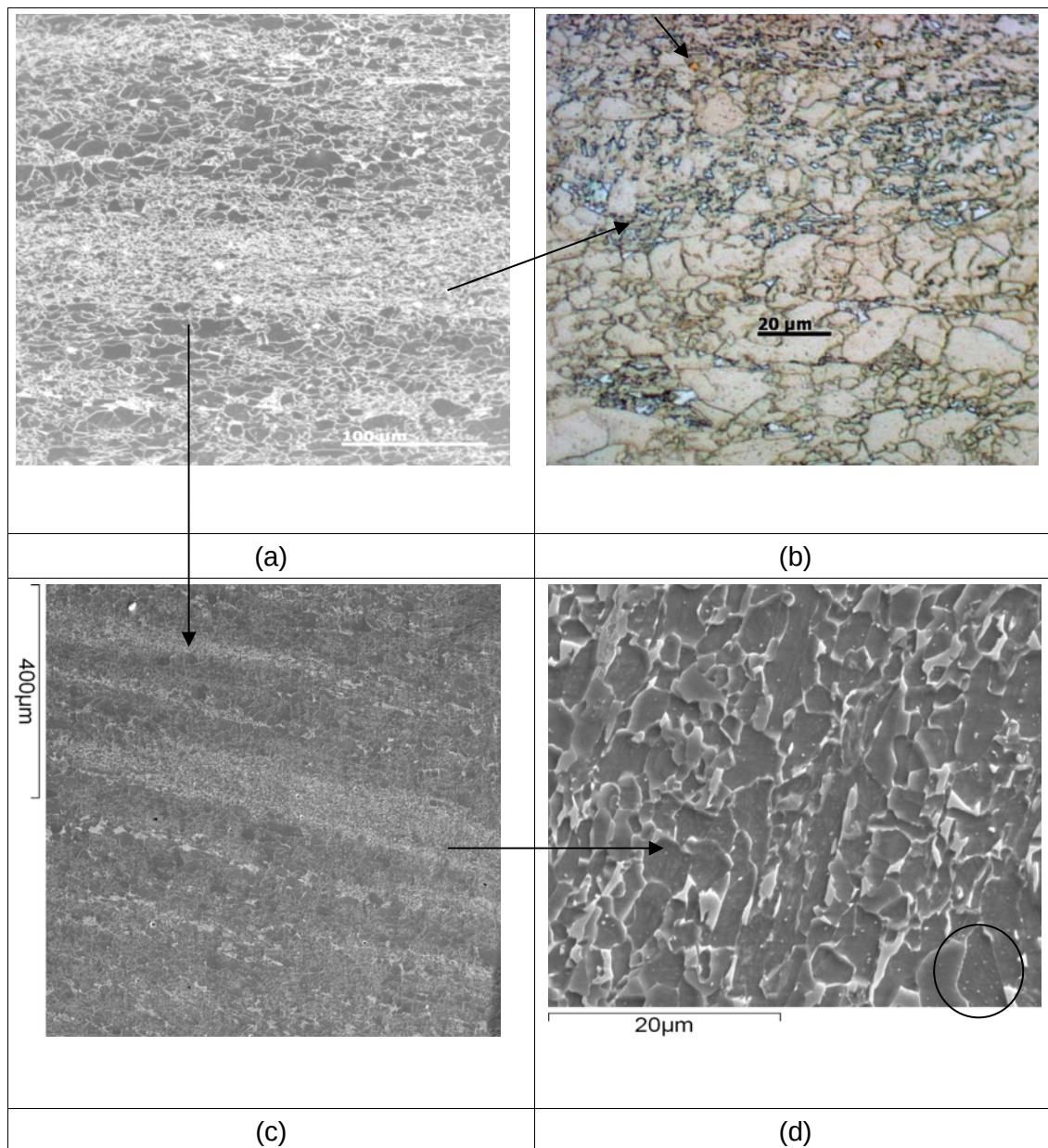


Figura 37 – Linhas de microsegregação presente no trecho reto do tubo de aço API X80 com Pcm = 0,17%. (a) Nital 2%, imagem de microscopia óptica invertida; (b) LePera modificado (constituente AM em branco e precipitados de elementos de liga em laranja); (c) e (d) Nital 2%, microscopia eletrônica de varredura. Nesta região alguns grãos de ferrita apresentam precipitação interna (circulo).

4.2.

Correlação de propriedades mecânicas e microestrutura

Os valores médios de propriedades em tração e energia absorvida em ensaio de impacto Charpy estão exibidos na tabela 15. Estes valores estão de acordo com os dados fornecidos pelo fabricante dos tubos conforme apresentado na tabela 06. O perfil de microdureza ao longo da espessura de parede do tubo no trecho reto encontra-se no gráfico da figura 38.

Tabela 15 – Propriedades mecânicas do trecho reto.

Limite de escoamento (MPa)	Limite de resistência (MPa)	Alongamento (%)	Charpy	
			0°C	-40°C
604 ± 20	679 ± 9	21 ± 2	182 ± 33	147 ± 10

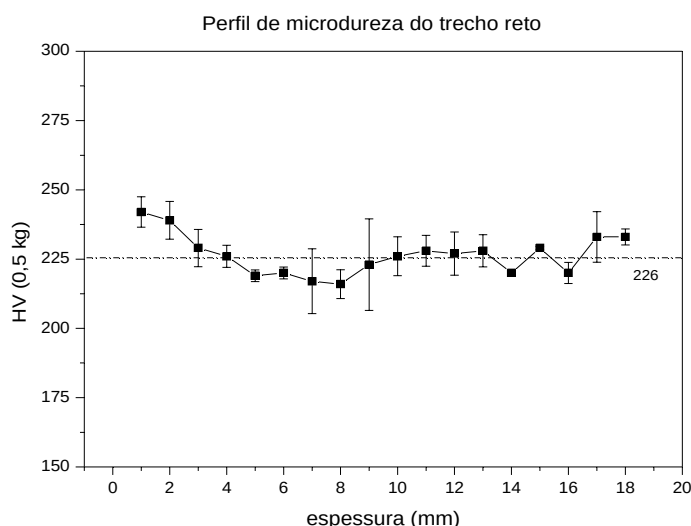


Figura 38 – Perfil de microdureza do trecho reto.

A tabela 16 correlaciona as microdurezas dos microconstituintes identificados no trecho reto, convertidas em limites de resistência, com as frações volumétricas buscando-se determinar as contribuições para a composição do valor de limite de resistência estimado.

Tabela 16 – Limite de resistência estimado do trecho reto e fração volumétrica.

Fases	Microdureza HV (0,05 kg)	LR estimado (MPa)	Fração Volumétrica (%)
Ferrita	222 ± 19	703	88,4
Constituinte AM	253 ± 8,0	814	7,1
Agregados Eutetóides	219 ± 15	690	4,5

Os efeitos da microestrutura de laminação (textura) nas propriedades mecânicas do trecho reto podem ser observados pela presença de delaminações. Nestas regiões microconstituintes de alta dureza influenciaram no modo de fratura e, conseqüentemente, nas propriedades de energia absorvida Charpy, de acordo com as figuras 39 e 40. Todos os corpos de prova Charpy do trecho reto ensaiados apresentaram delaminações, independentemente da temperatura de ensaio. Este resultado contrasta com a ausência de delaminações em 100% dos corpos de prova da região da curva.

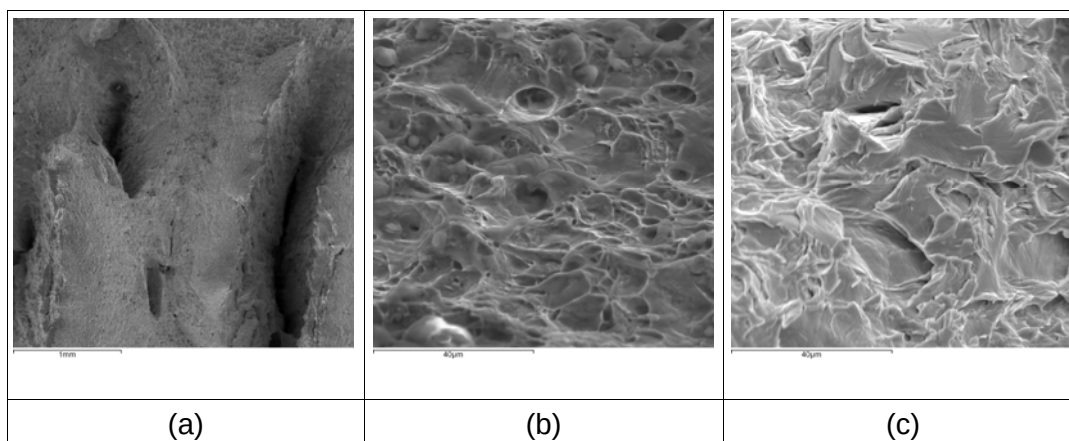


Figura 39 – Fractografia das delaminações observadas em corpos de prova Charpy do trecho reto do tubo de aço API X80. Bordas externas dúcteis e lateral interna frágil. (a) Delaminações em trecho reto de aço X80, (b) Região externa das delaminações e (c) Lateral interna das delaminações.

Pode ser visualizada na figura 40, em corte transversal as regiões de delaminações, a propagação da trinca e a microestrutura presente em corpos de prova Charpy removidos do trecho reto.

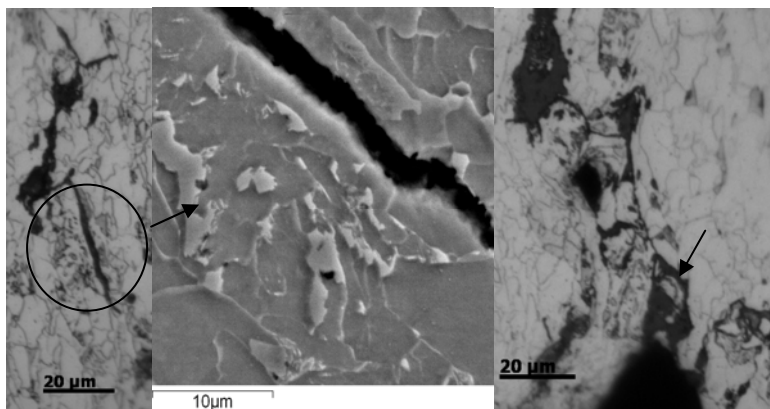


Figura 40 – Nucleação e propagação de trincas de delaminação, reagentes nital 2% e LePera modificado.

A propagação da delaminação ocorre através de microconstituintes de elevada dureza, como a bainita granular, conforme mostrado na figura 40, de um corte transversal a uma delaminação obtida a partir de um ensaio Charpy (0°C) do trecho reto com energia absorvia de 136 J. A micrografia da região interna desta delaminação mostra a nucleação da trinca na interface entre o constituinte AM e a matriz ferrítica (seta).

As elevadas energias absorvidas do trecho reto em comparação com o limite mínimo API 5L (68 J), nas condições de como recebido e após revenimento, pode ser resultado da propagação da trinca, com sucessivas mudanças de direção pelos contornos de grãos da ferrita refinada. Esta característica pode ser observada nas imagens da figura 41, que mostra o efeito do revenido sobre a microestrutura e a morfologia de fratura em corpos de prova Charpy do trecho reto.

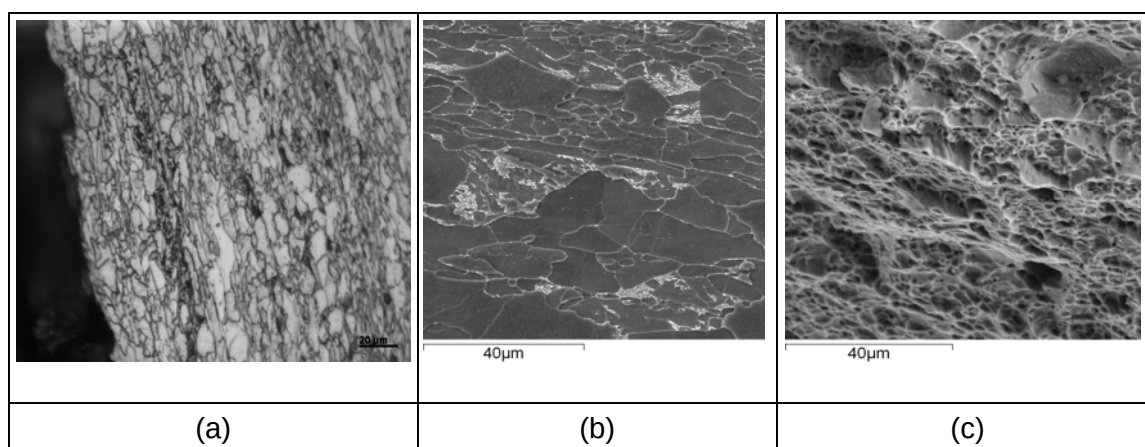


Figura 41 - Fratura dúctil em corpo de prova charpy (0°C) do trecho reto do tubo API X80 revenido a 600°C durante uma hora, com energia absorvida de 228 J. (a) Propagação da trinca (b) microestrutura revenida e (c) Fractografia.

A presença das linhas centrais de segregação pode estar associada com as delaminações centrais, mais profundas, observadas em corpos de prova de tração, de acordo com o exibido na figura 42. A figura 43 mostra a frente de propagação da trinca de um corpo de prova de tração removido da junta soldada longitudinal no trecho reto, na condição de tratado termicamente a 600°C. A ruptura ocorreu fora da região da solda, no metal de base (trecho reto) e as trincas que conduziram a fratura revelaram sucessivas mudanças de direções se propagando pelos contornos de grãos ferríticos. As propriedades mecânicas de tração, deste corpo de prova da junta soldada longitudinal no trecho reto, foram alongamento de 27% e limites de escoamento e resistência de 588 e 682 MPa, respectivamente.

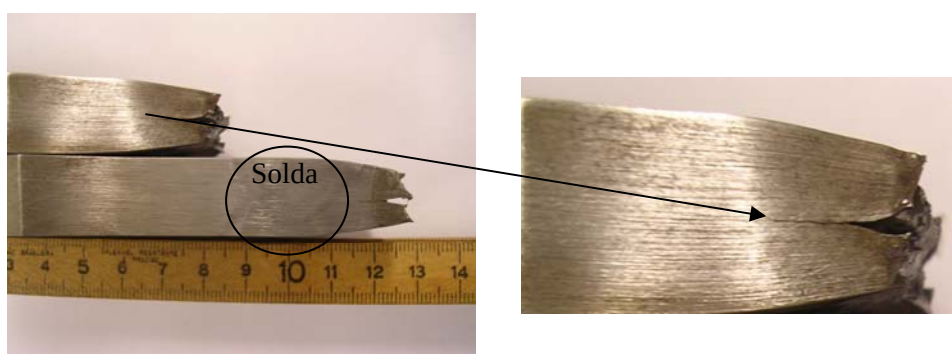


Figura 42 – Corpo de prova de tração API 5L da junta soldada longitudinal presente no trecho reto tratado termicamente a 610°C.

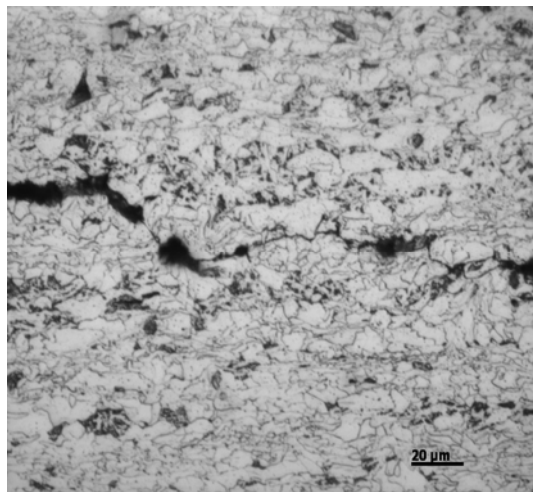


Figura 43 – Vista frontal da frente de fratura atacada com nital 2%.

O tamanho de grão refinado do trecho reto auxilia também no controle do tamanho de grão austenítico durante o ciclo de aquecimento do curvamento a quente, possibilitando obter uma microestrutura final mais refinada nas regiões da curva.