

Copyright 2016, ABRACO

Trabalho apresentado durante o INTERCORR 2016, em Búzios/RJ no mês de maio de 2016.

As informações e opiniões contidas neste trabalho são de exclusiva responsabilidade do(s) autor(es).

Reposição de espessura por soldagem em tubos de caldeira de recuperação e seu efeito nas propriedades mecânicas, metalúrgicas e químicas

^a**Camila Pontes Pena**, ^b**Paulo José Modenesi**

Abstract

This study aimed to evaluate the consequences of the weld buildup process for thickness repair on the mechanical, metallurgical and corrosion properties of recovery boiler tubes used in the pulp industry due to the high risk of explosion of this type of boiler. The study was done with sample tubes with weld buildup thickness that have operated in the boiler, new tubes and tubes welded in the laboratory. The samples were evaluated through macro and microstructure analyses, mechanical properties and corrosion analysis to raise basic information on the risk that these tubes can bring to the operation of chemical recovery boiler after repair. These analyses led to the conclusion that the area filled with welding has improved its mechanical properties and there were no noticeable visual differences between base metal and weld regarding corrosion. However, one should take into account other possible harmful effects that may occur in this procedure and that were not addressed in this paper.

Keywords: recovery boiler, welding, corrosion.

Resumo

Este trabalho teve como objetivo avaliar as consequências do processo de reposição de espessura por soldagem sobre as características mecânicas, metalúrgicas e de corrosão de tubos de caldeira de recuperação química usadas na indústria de celulose devido ao seu risco de explosão. O estudo foi feito com amostras de tubos com espessura reposta e que continuaram a operar na caldeira, tubos novos e tubos que foram soldados em laboratório. A avaliação foi feita através da análise de macro e microestrutura, propriedades mecânicas e análise de corrosão para levantar informações básicas sobre qual o risco que esses tubos podem trazer à operação da caldeira de recuperação química após terem sido reparados. Através das análises pode-se concluir que a área preenchida com soldagem tem suas propriedades mecânicas melhoradas e com relação à corrosão não foi notada uma diferença visual entre metal base e solda. No entanto, deve-se levar em conta outros possíveis efeitos danosos que podem ocorrer neste procedimento e que não foram abordados neste trabalho.

Palavras-chave: caldeira de recuperação, reposição de espessura, soldagem, corrosão.

^a Engenheira Química – ISQ Brasil Instituto de Soldadura e Qualidade Ltda.

^b PhD, Professor titular do Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais da UFMG.

Introdução

Uma caldeira de recuperação é parte integrante do processo *kraft* de produção de celulose na indústria de papel no qual madeira é cozida sob pressão em um digestor com uma solução de NaOH e Na₂S (licor branco) para produzir uma polpa, que é separada do restante do líquido. Esse líquido residual que contém a lignina da madeira, materiais orgânicos e compostos inorgânicos é evaporado para aumentar sua concentração de sólidos, formando o chamado licor negro. O licor negro é queimado como combustível na caldeira de recuperação produzindo um material inorgânico em fusão, conhecido como *smelt* fundido, o qual é rico em carbonato de sódio (Na₂CO₃) e sulfeto de sódio (Na₂S).

A operação e a manutenção de uma caldeira de recuperação química requerem conhecimento e experiência visto que existem alguns riscos envolvidos que podem levar à sua explosão, sendo que a mais comum é a explosão água-*smelt* (DECAIGNY, 2013; KUMAR, 2010) causada pela mudança de estado físico da água quando ela entra em contato o *smelt* contido no centro da caldeira. A principal causa desta explosão é o vazamento de água através de furos causados por corrosão externa nos tubos da fornalha (SATHYANATHAN, 2010).

Os procedimentos de soldagem para reposição de espessura são utilizados na indústria para reparos de equipamentos, no entanto, deve-se levar em conta que qualquer reparo que envolva soldagem tende a provocar alterações mecânicas e metalúrgicas no material. Devido ao risco de explosão de uma caldeira de recuperação, resolveu-se estudar de que forma o procedimento de recomposição de espessura de tubos da parede da caldeira por soldagem pode afetar sua integridade. Ressalta-se que este procedimento de reparo é de grande importância visto que nem sempre existem tubos disponíveis para serem substituídos quando é constatada sua perda de espessura, pois são materiais específicos para esta aplicação e de alto custo. Além disso, sua substituição requer uma parada longa da caldeira que reflete diretamente em custos de interrupção da produção. Sendo assim, esse procedimento é de extrema importância e deve ser de alta confiabilidade de forma a garantir a segurança da caldeira de recuperação química e também o mínimo tempo de parada.

Este trabalho pretende avaliar as consequências do processo de reposição de espessura por soldagem sobre as características mecânicas, metalúrgicas e de corrosão em tubos de caldeira de recuperação química usados na indústria de celulose. O estudo será feito em amostras de tubos com espessura repostada e que continuaram a operar na caldeira, tubos novos e tubos que foram soldados em laboratório.

Metodologia

1.1 Material de estudo

Neste estudo foram utilizados tubos de aço baixo carbono sem costura da parede de água da fornalha de uma caldeira de recuperação química da indústria de celulose. As características gerais dos tubos estão listadas a seguir:

- Especificação do material do tubo é ASTM A210 Grau A1 (ASTM, 2012):
 - Composição química: carbono máximo 0,27%, manganês máximo 0,93%, fósforo máximo 0,035%, enxofre máximo 0,035% e silício mínimo 0,10%;

- Dureza: máximo 79 HRB ou 143 HB.
- Diâmetro: 63,5 mm.
- Espessura da parede: 5,0 mm.

Para as soldas de reposição de espessura foi utilizado o processo de eletrodo revestido de especificação AWS A5.1 E7018 do fabricante ESAB.

As amostras 1, 2 e 5 foram fornecidas por uma empresa fabricante de celulose e as amostras 3 e 4 foram feitas a partir delas, sendo:

- Amostra 1 (A1): tubo novo.
- Amostra 2 (A2): tubo usado que estava em operação há 23 anos na caldeira sem a reposição de espessura.
- Amostra 3 (A3): tubo novo da Amostra 1 que serviu de corpo de prova para a soldagem em laboratório.
- Amostra 4 (A4): tubo usado da Amostra 2 que serviu de corpo de prova para a soldagem em laboratório.
- Amostra 5 (A5): tubo usado que estava em operação há 22 anos na caldeira quando foi feita a recuperação da espessura por soldagem dentro da caldeira e que continuou em operação durante mais 1 ano.

1.2 Preparação das Amostras

As cinco amostras dos tubos foram cortadas na transversal e na longitudinal, incluindo a região da solda quando aplicável, embutidas em resina de cobre, lixadas em diferentes granulometrias, polidas com pasta de diamante e atacadas com solução de nital 2% e nital 10% para serem utilizadas nos ensaios posteriores de análise macro e micrográfica.

1.3 Análise química do aço por espectrometria ótica

Foi realizada a análise química por espectrometria ótica da região superficial do metal base (MB) das amostras 1, 2 e 5 para validação da composição do aço dos tubos onde foram determinados os teores dos seguintes elementos químicos: C, Mn, Si, Al, P, S, Nb, V, Ti, Ni, Cu, N, O e Fe.

1.4 Macrografias

As amostras 3, 4 e 5 contendo as soldas foram atacadas com nital 10% e macrofotografadas para visualizar de forma geral as regiões principais da solda.

1.5 Microscopia ótica

As cinco amostras do item 1.1 foram atacadas com nital 2% e posteriormente observadas com microscópio óptico (MO) para caracterização da microestrutura com identificação dos constituintes presentes. O objetivo principal foi avaliar a ZTA (zona termicamente afetada), MB (metal base) e ZF (zona fundida) e verificar as diferenças entre as microestruturas das diferentes regiões em função da condição de cada amostra.

1.6 Medição de dureza

Foi realizada a medição da microdureza Vickers com o objetivo de identificar possíveis alterações de resistência mecânica entre as diferentes regiões identificadas no microscópio óptico e comparar os tubos com e sem solda, e também o tubo novo e o usado na caldeira. O ensaio foi realizado utilizando-se um microdurômetro onde foi levantado o perfil (MB/ZTA/ZF) de dureza nas Amostras 3, 4 e 5 e feita a medição aleatória nas Amostras 1 e 2. As amostras utilizadas para a determinação deste perfil foram as mesmas preparadas para o microscópio óptico.

1.7 Ensaio de corrosão

Foi realizado um ensaio de oxidação na temperatura de serviço nas Amostras 1, 2, 3 e 5 na presença de licor negro na tentativa de simular o fenômeno de corrosão em sal fundido. O objetivo é avaliar se há alguma alteração com relação à resistência à corrosão na parte com a reposição da espessura e na parte sem esta.

Foi depositada uma camada de licor negro forte sobre as amostras e as mesmas foram colocadas num forno durante 24 horas a 350°C que é temperatura máxima na superfície externa dos tubos dentro da caldeira informada.

Resultados e discussão

2.1 Descrição e caracterização das amostras originais

Nas figuras 1 a 3 estão apresentadas as 3 (três) amostras recebidas do fabricante de celulose.



Figura 1 - Amostra 1: Tubo novo sem pinos.



Figura 2 - Amostra 2: tubo usado com pinos que estava em operação na caldeira sem a reposição de espessura.



Figura 3 - Amostra 5: tubo usado da caldeira de recuperação com pinos onde foi feita a reposição da espessura por soldagem dentro da caldeira e que continuou em operação durante mais 1 ano.

2.2 Soldagem em laboratório

Foram preparadas mais 2 (duas) amostras, sendo elas nomeadas de Amostras 3 e 4, a partir das Amostras 1 e 2, respectivamente. Nas Amostras 3 e 4 (Figuras 4 e 5) foi realizado em laboratório o mesmo procedimento de soldagem feito na Amostra 5.



Figura 4 - Amostra 3: tubo novo da Amostra 1 que serviu de corpo de prova para fazer a reposição de espessura por soldagem.



Figura 5 - Amostra 4: tubo usado da Amostra 2 que serviu de corpo de prova para fazer a reposição de espessura por soldagem.

2.3 Análise química do aço por espectrometria ótica

Os resultados da análise química por espectrometria ótica no metal base das Amostras 1, 2 e 5 estão apresentados na Tabela 1.

Tabela 1 - Composição química pela análise de espectrometria ótica

Elemento	Composição (%)		
	Amostra 1	Amostra 2	Amostra 5
C	0,2031	0,1734	0,1871
Mn	0,5828	0,7993	0,8986
Si	0,1305	0,1973	0,2727
Al	0,0103	0,0286	0,0327
P	0,0211	0,0278	0,0278
S	0,018	0,0172	0,0141
Nb	0	0	0
V	0,0026	0,0032	0,0033
Ti	0,0013	0,0012	0,0014
Ni	0,043	0,0074	0,0253
Cu	0,1875	0,0039	0,0041
N	0,0076	0,0062	0,0062
Fe	98,6745	98,6679	98,4367
Outros	0,1177	0,0666	0,09

A composição química encontrada para as amostras estão dentro da esperada pela especificação do tubo (ASTM A210 Grau A1) para o uso destinado.

2.4 Caracterização por macrografias

As macrografias das Amostras 3, 4 e 5 contendo as soldas estão apresentadas respectivamente nas figuras 6 a 8 cujas indicações com letras nas figuras estão descritas abaixo:

- Região A: metal base sem influência da soldagem;
- Região B: interface da solda com metal base na superfície do tubo (ZTA);
- Perfil C: representado na direção vertical indicada pela seta que passa pelas regiões de MB, ZTA e ZF.

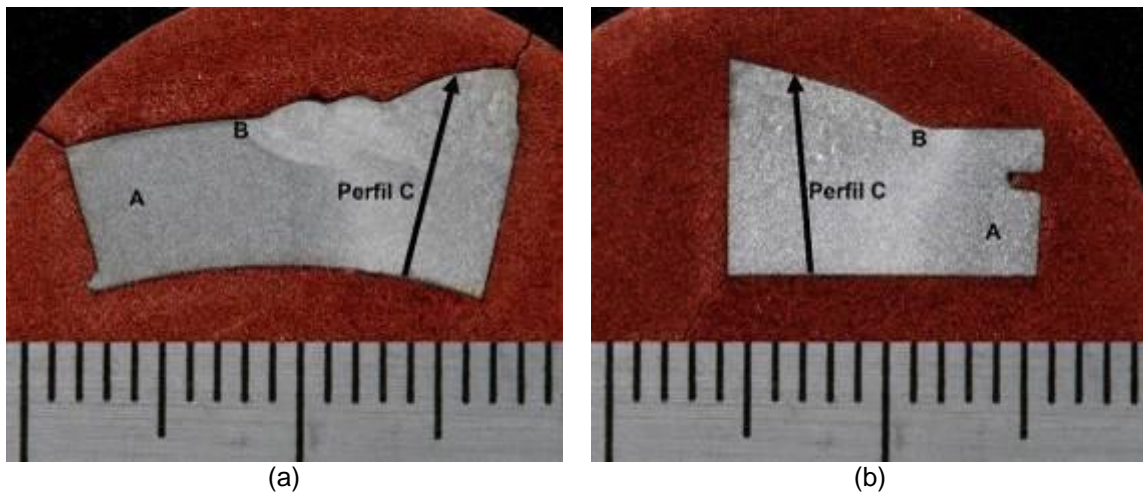


Figura 6 - Amostra 3: macrografia contendo a região da solda. Ataque: nital 10%. (a) corte transversal (b) corte longitudinal.

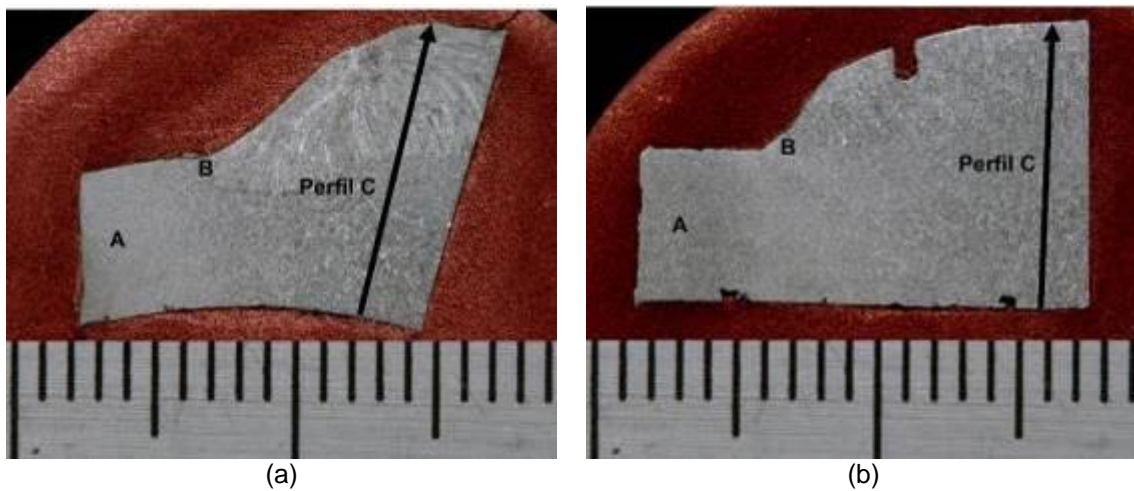


Figura 7 - Amostra 4: macrografia contendo a região da solda. Ataque: nital 10%. (a) corte transversal (b) corte longitudinal.

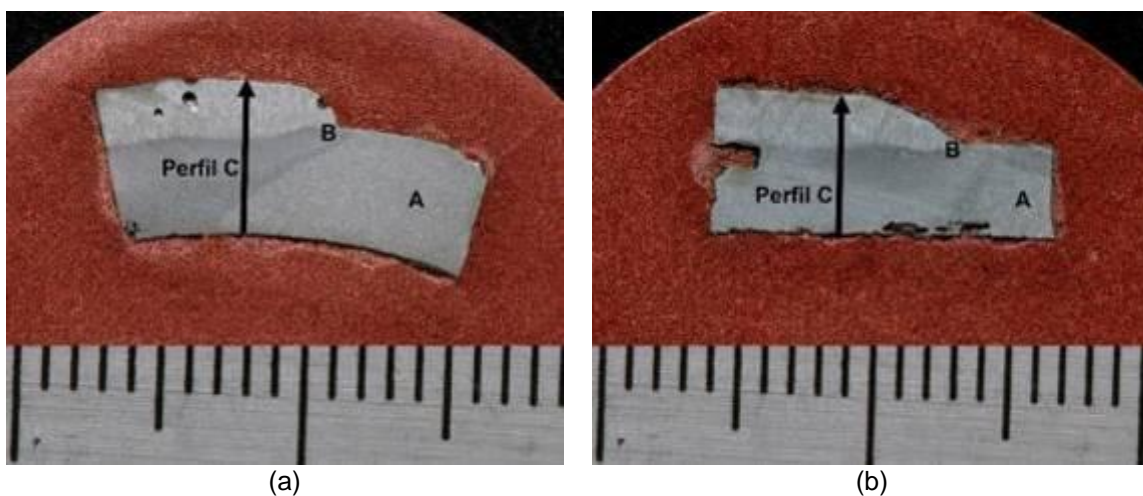


Figura 8 - Amostra 5: macrografia contendo a região da solda. Ataque: nital 10%. (a) corte transversal (b) corte longitudinal.

2.5 Caracterização microestrutural

As figuras 9 e 10 apresentam a microestrutura do metal base da Amostra 1 (tubo novo de referência).

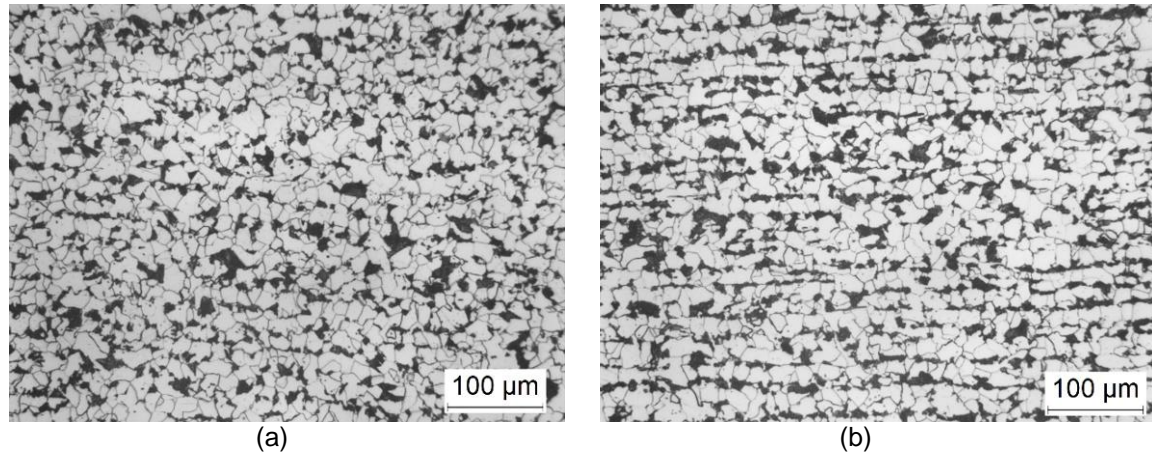


Figura 9 - Amostra 1: aspecto da microestrutura do metal base do tubo não afetado pela soldagem. Ampliação original: 200X. Ataque: nital 2%. (a) corte transversal (b) corte longitudinal.

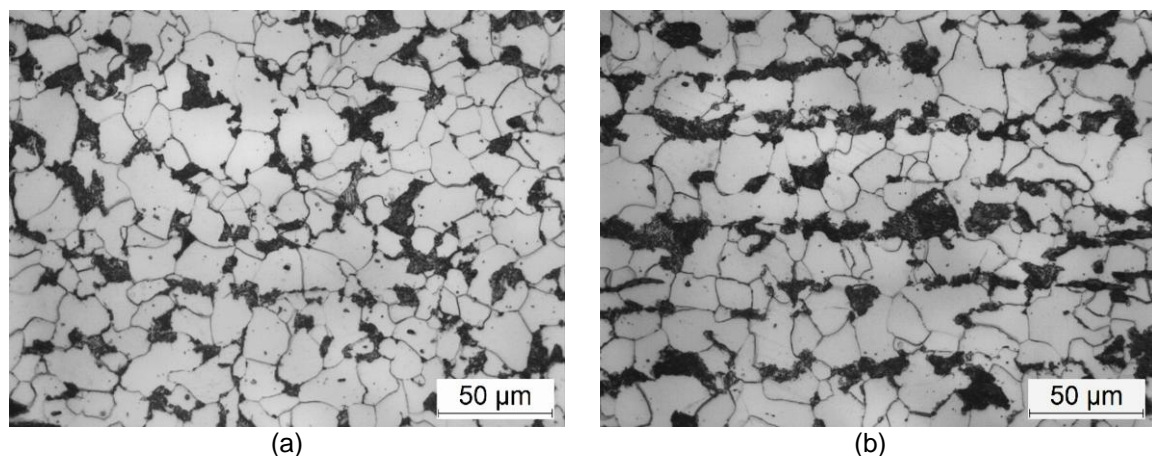


Figura 10 - Amostra 1: aspecto da microestrutura do metal base do tubo não afetado pela soldagem. Ampliação original: 500X. Ataque: nital 2%. (a) corte transversal (b) corte longitudinal.

A microestrutura apresentada nas figuras 9 e 10 revela a presença de ferrita e perlita cuja constituição é típica de aços baixo carbono como este utilizado no trabalho.

As figuras 11 a 13 apresentam a microestrutura da Amostra 2 que é o tubo que estava em operação na caldeira.

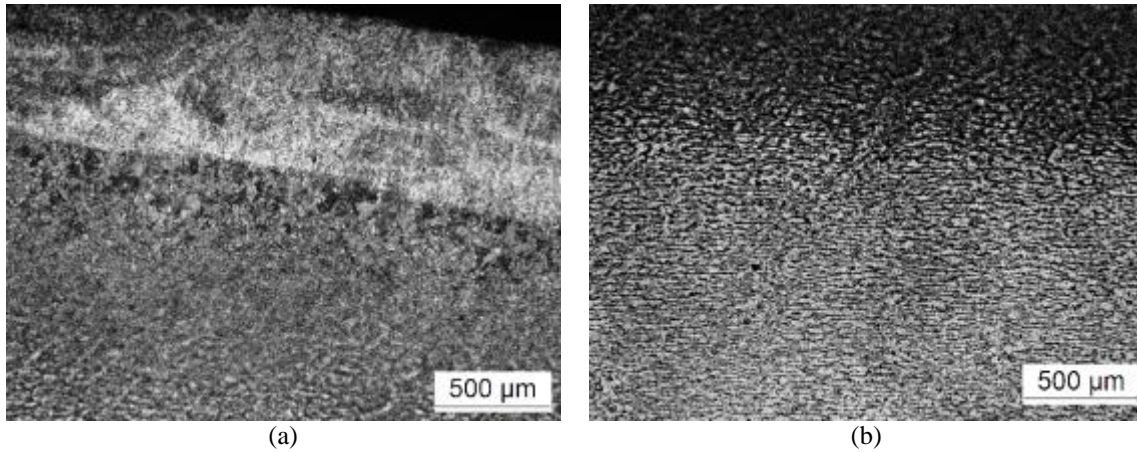


Figura 11 - Amostra 2: aspecto da microestrutura na superfície do lado quente do tubo, corte transversal. Ampliação original: 50X. Ataque: nital 2%. (a) superfície (b) interior.

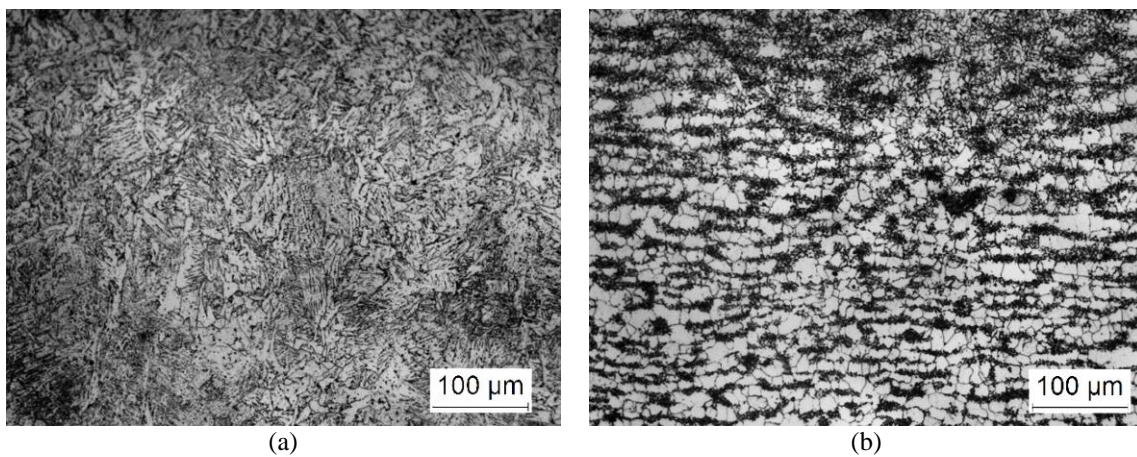


Figura 12 - Amostra 2: aspecto da microestrutura na superfície do lado quente do tubo, corte transversal. Ampliação original: 200X. Ataque: nital 2%. (a) superfície (b) interior.

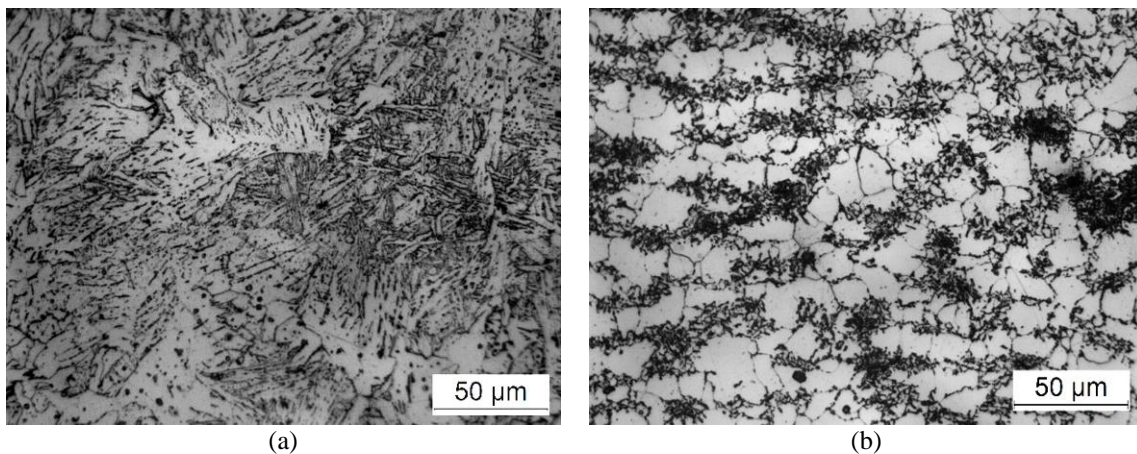


Figura 13 - Amostra 2: aspecto da microestrutura na superfície do lado quente do tubo, corte transversal. Ampliação original: 500X. Ataque: nital 2%. (a) superfície (b) interior.

A microestrutura apresentada nas figuras 11 a 13 (a) mostra que o tubo sofreu mudanças de microestrutura devido à soldagem dos pinos pois o corte transversal foi feito nas imediações de um pino de proteção. O metal base mostrado nas figuras 11 a 13 (b) apresenta ferrita e perlita semelhante ao da Amostra 1 porém com grãos um pouco menores. Esta redução pode ter se dado devido à exposição a alta temperatura e ao ambiente agressivo.

As figuras 14 a 18 mostram as microestruturas observadas para Amostra 3 (tubo novo com reposição de espessura em laboratório) para as regiões destacadas na Figura 6.

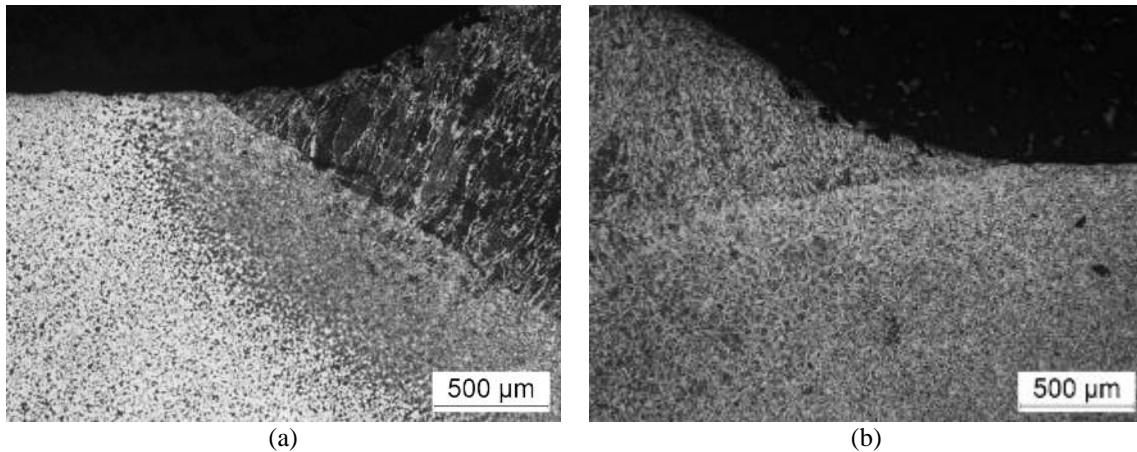


Figura 14 - Amostra 3: aspecto da microestrutura na região B da Figura 6. Ampliação original: 50X. Ataque: nital 2%. (a) corte transversal (b) corte longitudinal.

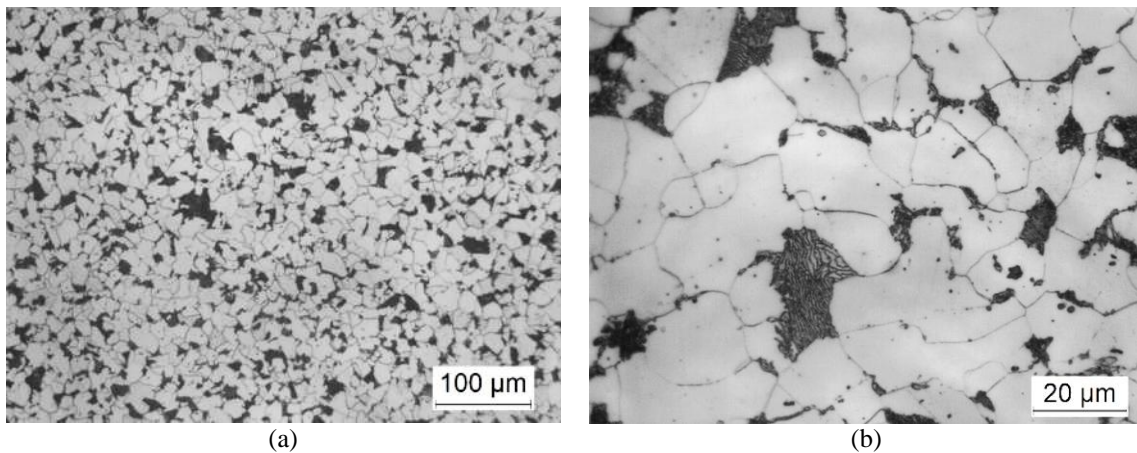


Figura 15 - Amostra 3: aspecto da microestrutura na região A (MB) da Figura 6 corte transversal. Ataque: nital 2%. (a) 200x (b) 500x.

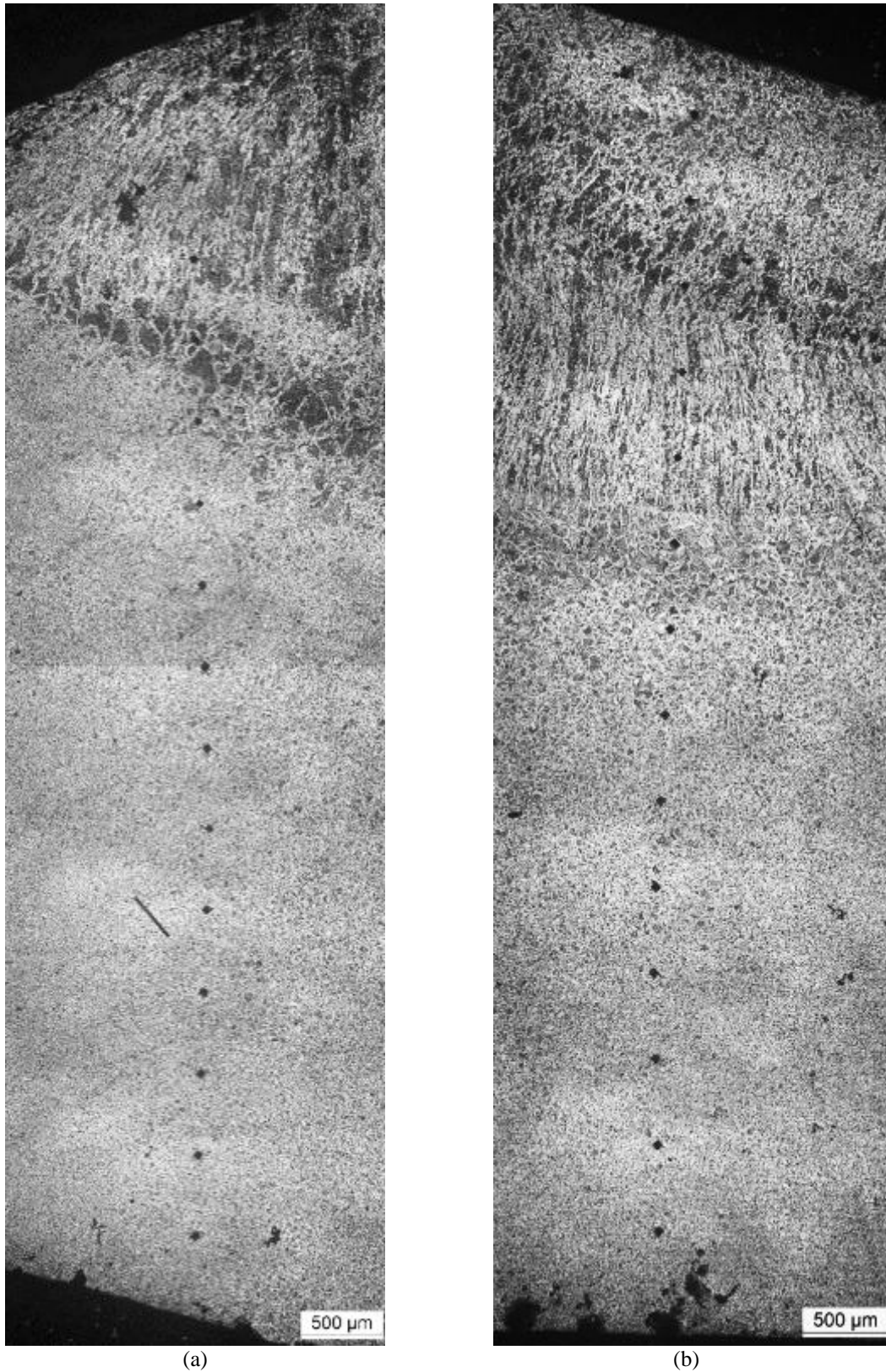


Figura 16 - Amostra 3: aspecto da microestrutura ao longo do perfil C da Figura 6. Ampliação original: 50X. Ataque: nital 2%. (a) corte transversal (b) corte longitudinal.

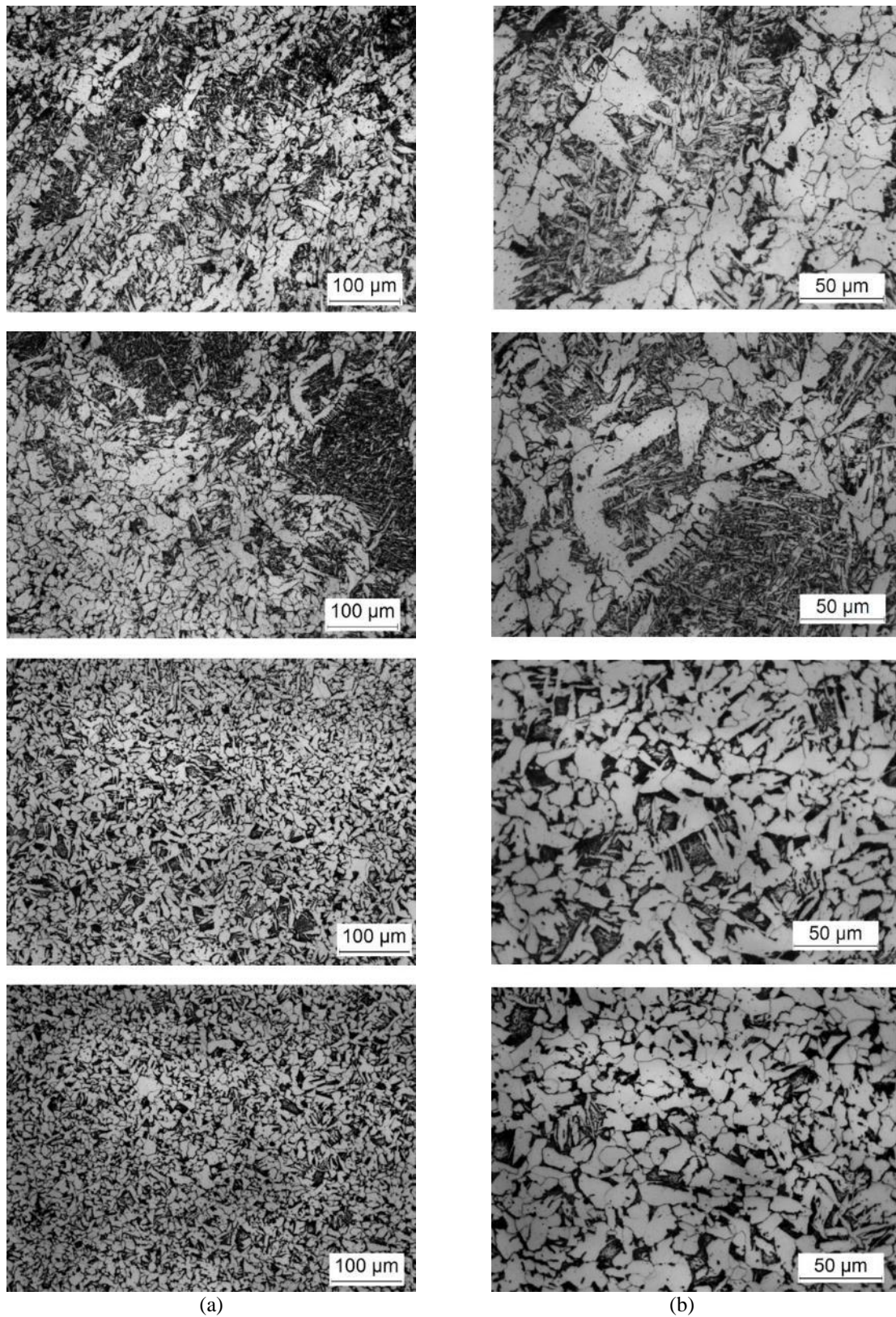


Figura 17 - Amostra 3: aspecto da microestrutura ao longo do perfil C da Figura 6 de baixo para cima para o corte transversal. Ataque: nital 2%. (a) 200X (b) 500X.

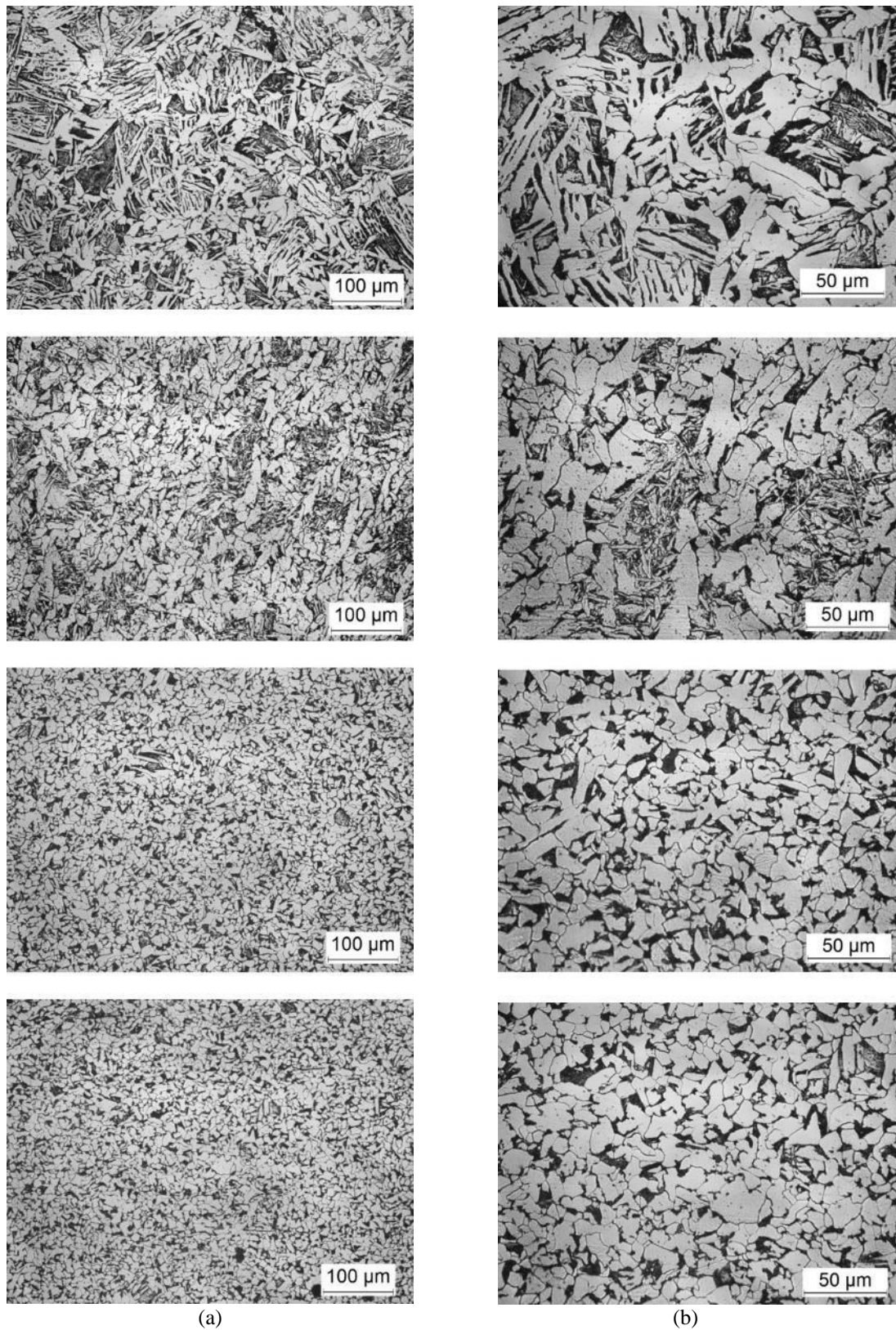


Figura 18 - Amostra 3: aspecto da microestrutura ao longo do perfil C da Figura 6 de baixo para cima para o corte longitudinal. Ataque: nital 2%. (a) 200X (b) 500X.

Na Figura 14 é mostrada a zona de interface com a região da margem da solda (região B) onde se pode visualizar a ZF no canto direito superior, ZTA na faixa do meio e a zona de transição até o MB do lado esquerdo.

Na Figura 15 é mostrada a microestrutura da região A com ferrita e perlita que é idêntica à microestrutura da Amostra 1 (tubo novo); tal fato já era esperado já que o material é essencialmente o mesmo.

Na Figura 16 é apresentado o perfil C ao longo da amostra onde já é notada a alteração microestrutural devido à soldagem. Na região inferior das figuras 17 e 18 pode-se ver ainda essencialmente ferrita e perlita e à medida que vamos subindo vão aparecendo grandes regiões de ferrita acicular (agulhas aleatórias) e ferrita de Widmanstätten (agulhas alinhadas). Estes constituintes são típicos de materiais que sofreram processos de soldagem.

As figuras 19 a 22 mostram as diferentes microestruturas observadas na Amostra 4 (tubo antigo que estava em operação na caldeira com reposição de espessura em laboratório) para as regiões destacadas na Figura 7.

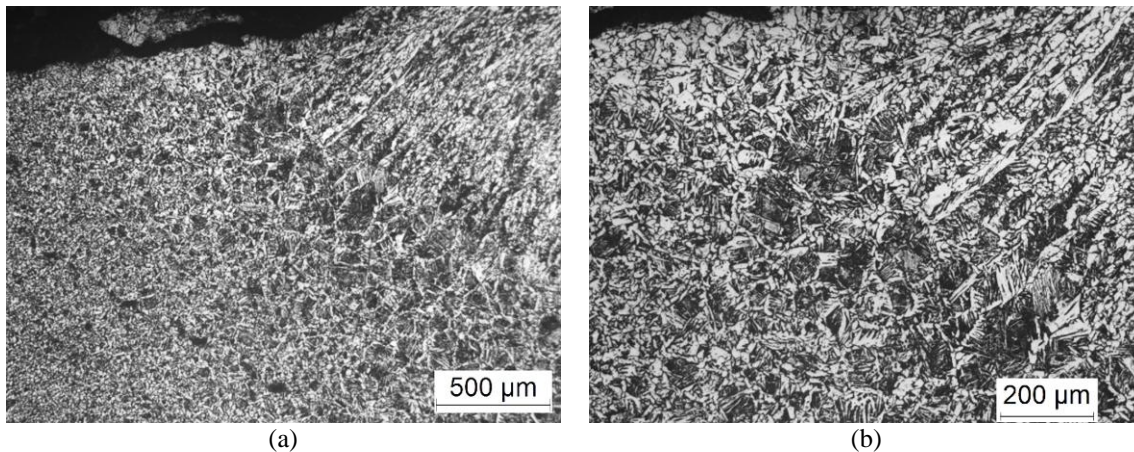


Figura 19 - Amostra 4: aspecto da microestrutura na região B da Figura 7. Corte transversal. Ataque: nital 2%. (a) 50X (b) 100X.

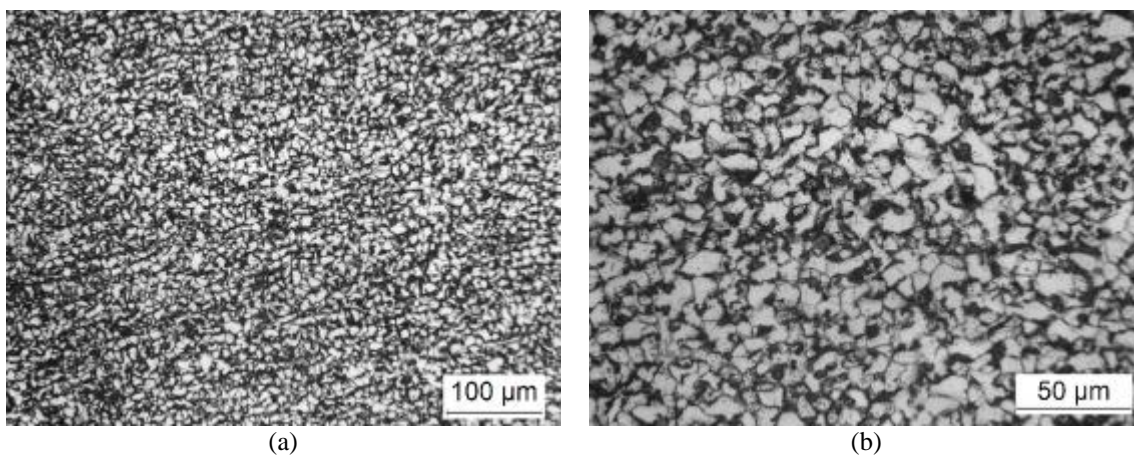


Figura 20 - Amostra 4: aspecto da microestrutura na região A da Figura 7. Corte transversal. Ataque: nital 2%. (a) 200X (b) 500X.

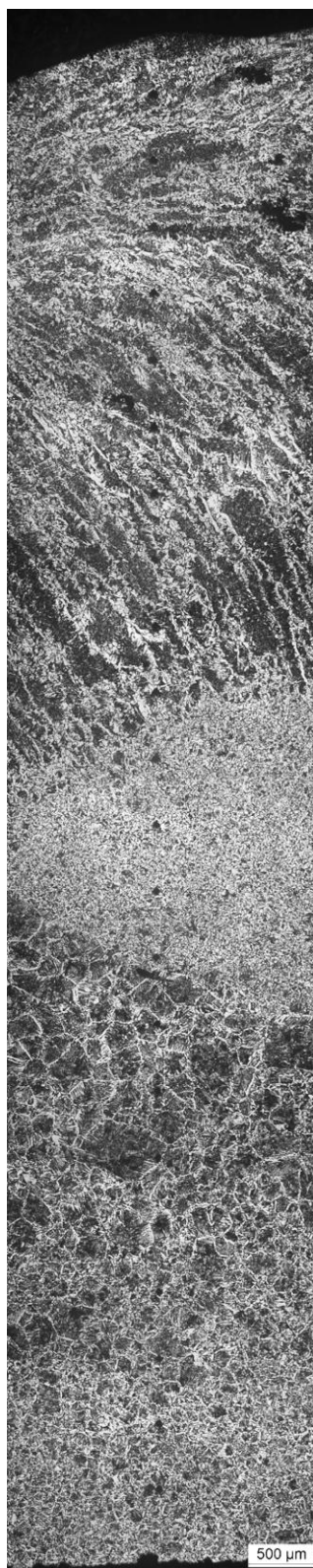


Figura 21 - Amostra 4: aspecto da microestrutura ao longo do perfil C da Figura 7. Ampliação original: 50X. Ataque: nital 2%. Corte transversal

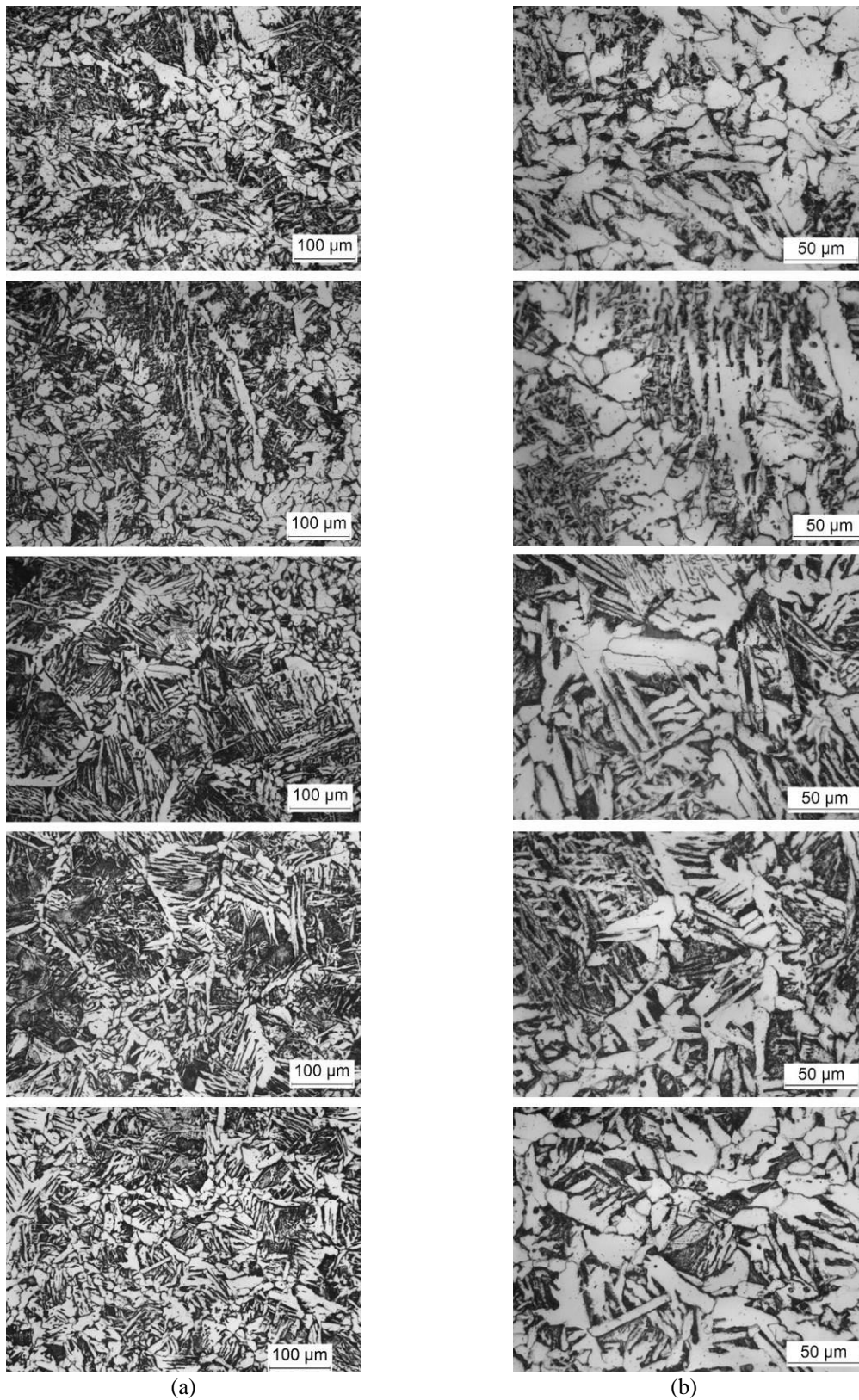


Figura 22 - Amostra 4: aspecto da microestrutura ao longo do perfil C da Figura 7 de baixo para cima para o corte transversal. Ataque: nital 2%. (a) 200X (b) 500X.

Na Figura 19 é mostrada a zona de interface com a região da margem da solda (região B) onde se pode visualizar a ZF no canto direito superior, ZTA na faixa do meio e a zona de transição até o MB do lado esquerdo.

Na Figura 20 é mostrada a microestrutura da região A do metal base constituída de ferrita e perlita. Pode-se perceber que ela é semelhante à microestrutura da Amostra 1 (tubo novo), no entanto nota-se uma diminuição do tamanho de grão que pode ter sido causada pela operação prolongada em temperaturas mais altas.

Na Figura 21 é apresentado o perfil C ao longo da amostra onde já é notada a alteração microestrutural devido à soldagem. Na região inferior da Figura 22 já podem ser vistas regiões com agulhas de ferrita de Widmanstatten e à medida que vamos subindo vão aparecendo grandes regiões de ferrita acicular (agulhas aleatórias), típicos desse tipo de solda. Nota-se que esta amostra está muito mais alterada microestruturalmente que a Amostra 3 visto que ela operou por muito tempo na caldeira antes de ter sido feito a reposição de espessura em laboratório e possui uma quantidade bem maior de ferrita acicular e com segunda fase alinhada.

As figuras 23 a 27 mostram as diferentes microestruturas observadas na Amostra 5 (tubo antigo que estava em operação na caldeira com reposição de espessura) para as regiões destacadas na Figura 8.

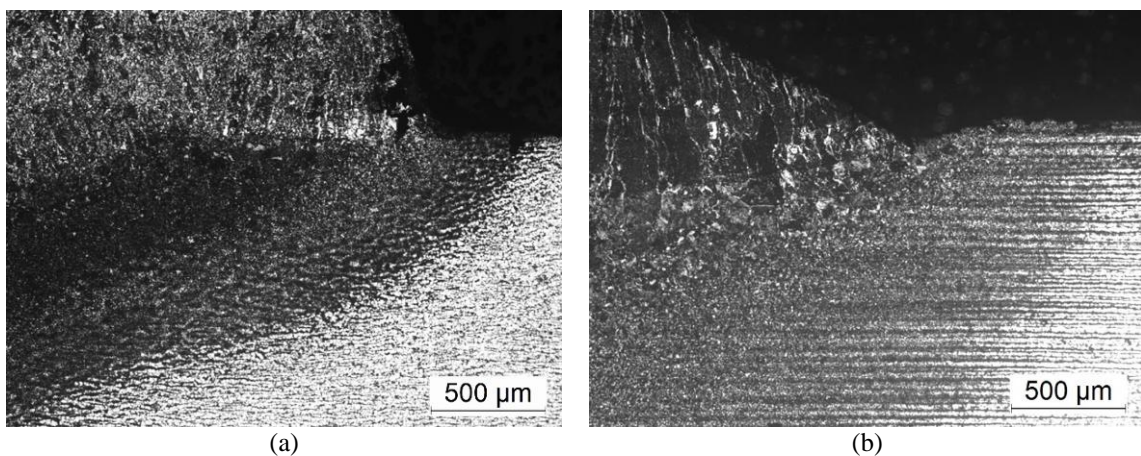


Figura 23 - Amostra 5: aspecto da microestrutura na região B da Figura 8. Ampliação original: 50X. Ataque: nital 2%. (a) corte transversal (b) corte longitudinal.

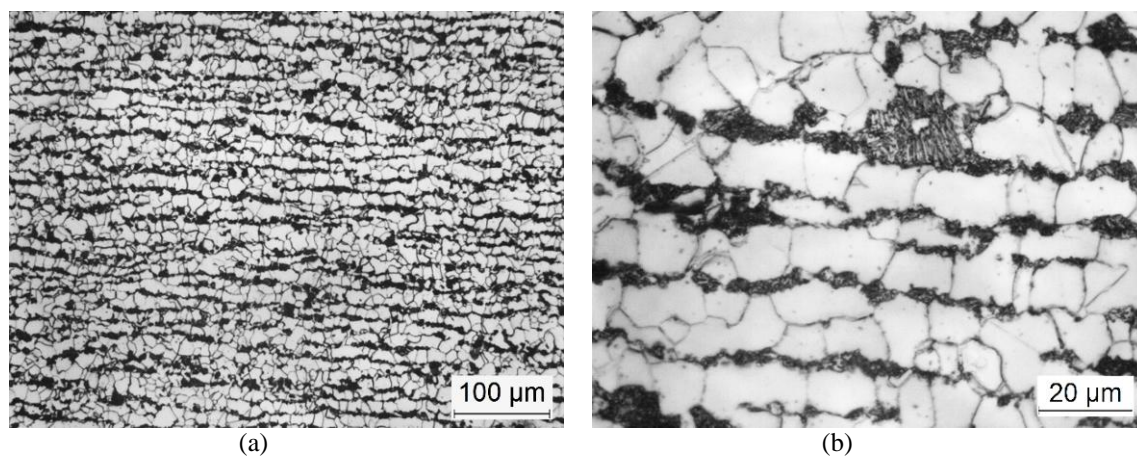


Figura 24 - Amostra 5: aspecto da microestrutura na região A da Figura 8. Corte transversal. Ataque: nital 2%. (a) 200X (b) 500X.

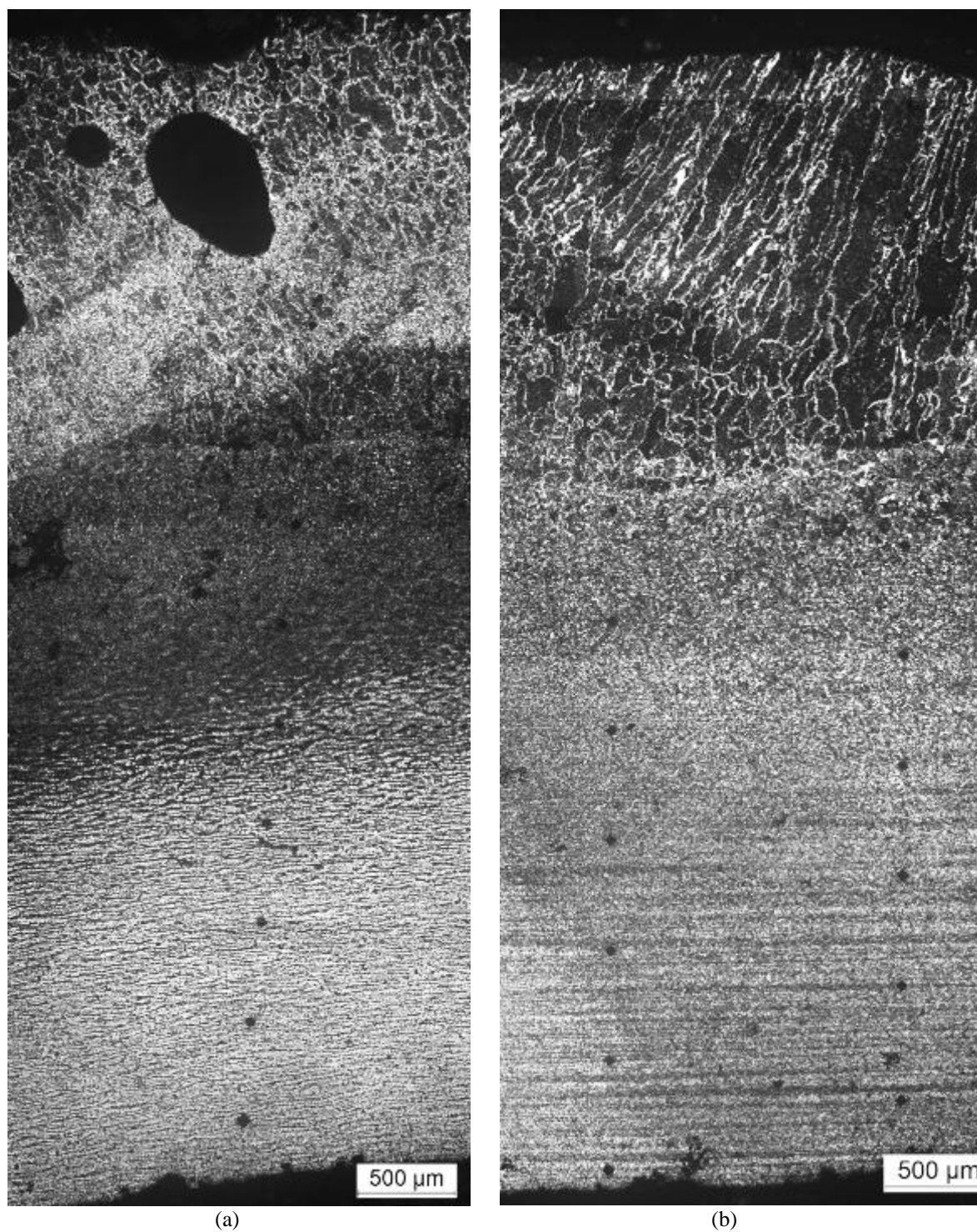


Figura 25 - Amostra 5: aspecto da microestrutura ao longo do perfil C da Figura 8. Ampliação original: 50X. Ataque: nital 2%. (a) corte transversal (b) corte longitudinal.

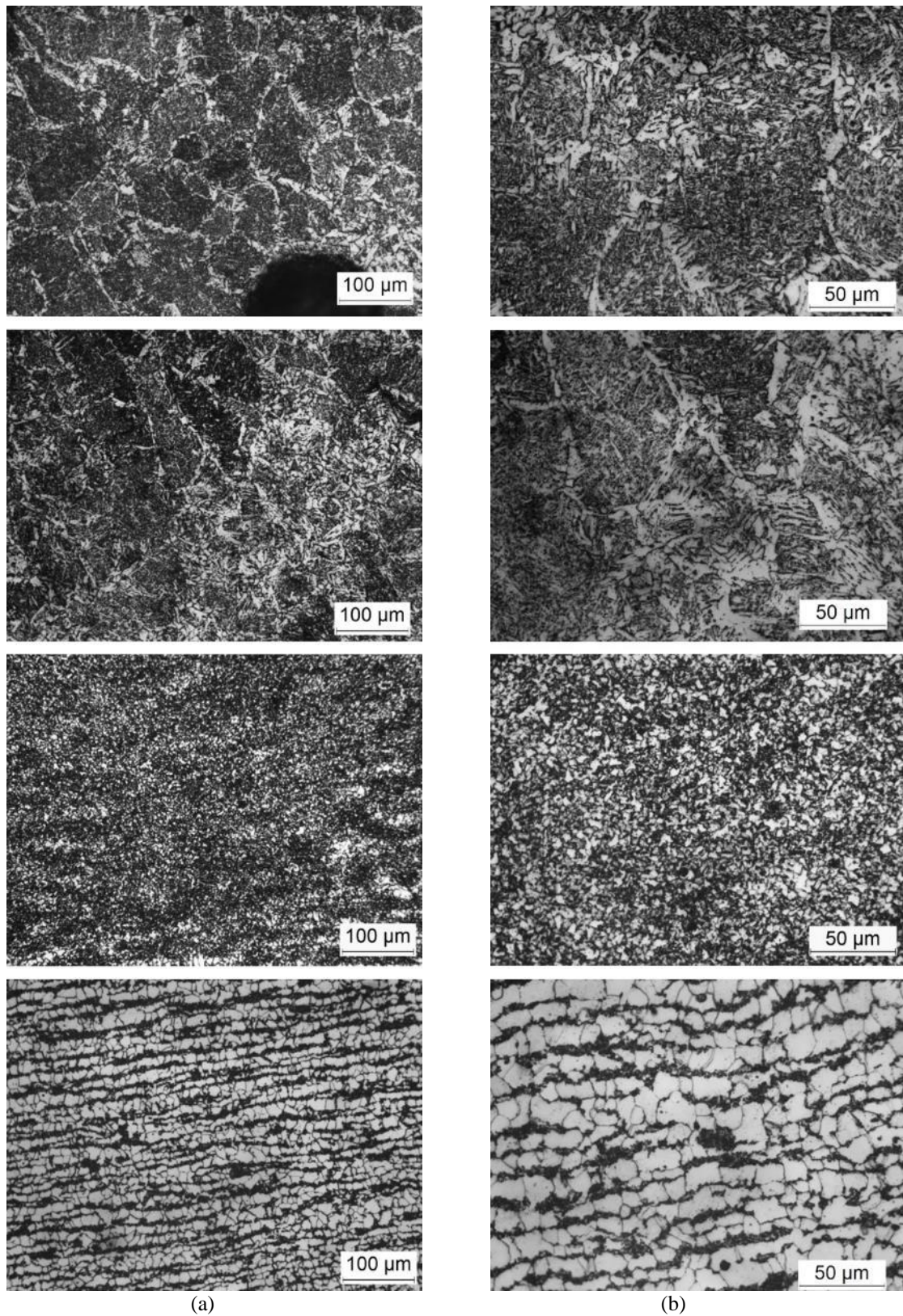


Figura 26 - Amostra 5: aspecto da microestrutura ao longo do perfil C da Figura 8 de baixo para cima para o corte transversal. Ataque: nital 2%. (a) 200X (b) 500X.

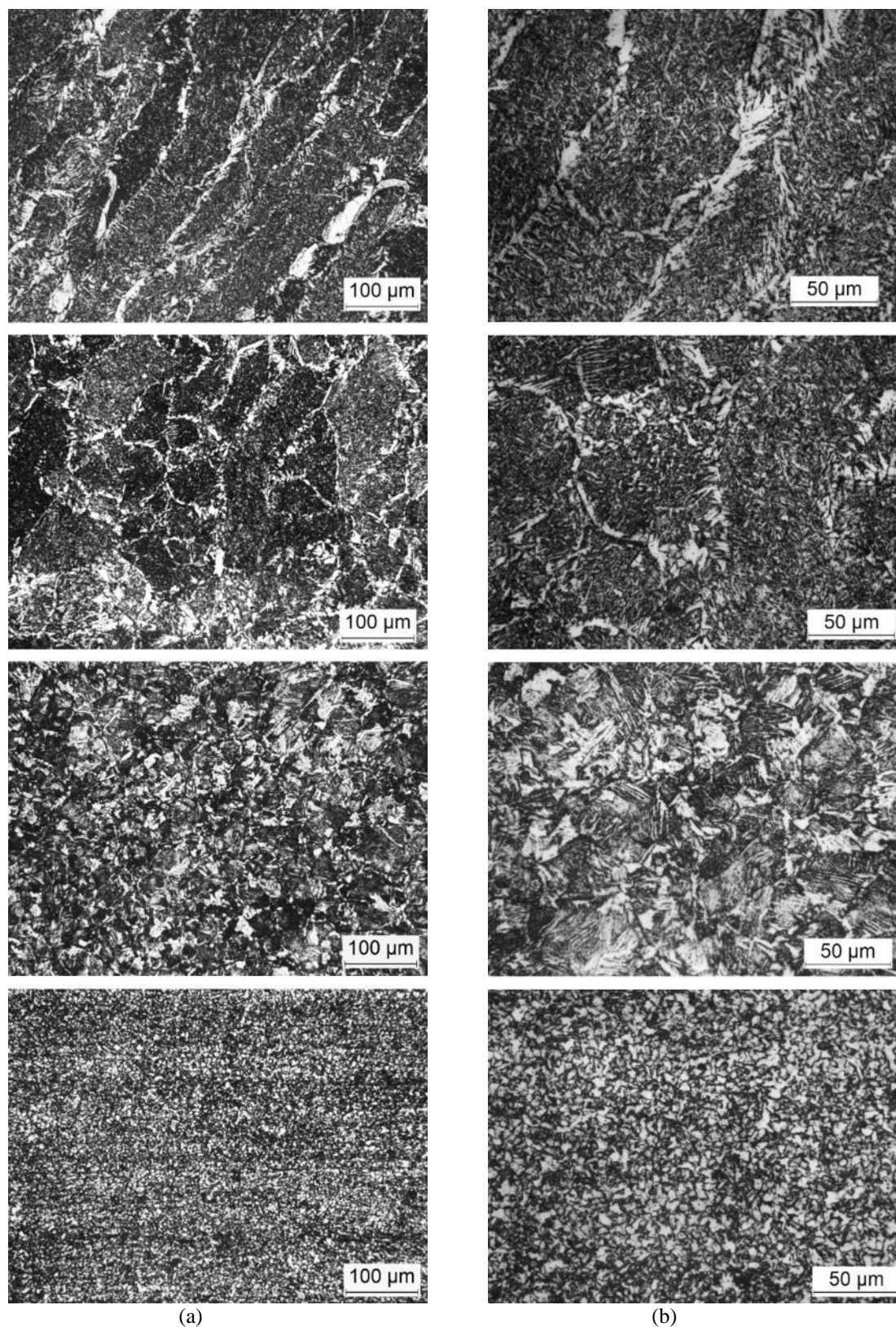


Figura 27 - Amostra 5: aspecto da microestrutura ao longo do perfil C da Figura 8 de baixo para cima para o corte longitudinal. Ataque: nital 2%. (a) 200X (b) 500X.

Na Figura 23 Figura 14 é mostrada a zona de interface com a região da margem da solda (região B) onde se pode visualizar a ZF no canto esquerdo superior, ZTA na faixa do meio e a zona de transição até o MB do lado direito.

Na Figura 24 é mostrada a microestrutura da região C do metal base constituída de ferrita e perlita.

Na Figura 25 é apresentado o perfil C ao longo da amostra onde é notada a alteração microestrutural devido à soldagem. Na região inferior das figuras 26 e 27 pode-se ver ainda essencialmente ferrita e perlita e à medida que vamos subindo vão aparecendo regiões de ferrita acicular (agulhas aleatórias), ferrita de Widmanstatten (agulhas alinhadas) e ferrita com segunda fase alinhada. No entanto a quantidade dessas fases é bem menor que nas demais amostras com solda.

2.6 Microdureza Vickers

Os resultados da medição de microdureza Vickers nas cinco amostras em diferentes regiões estão apresentados nos gráficos das figuras 28 a 35 a seguir.

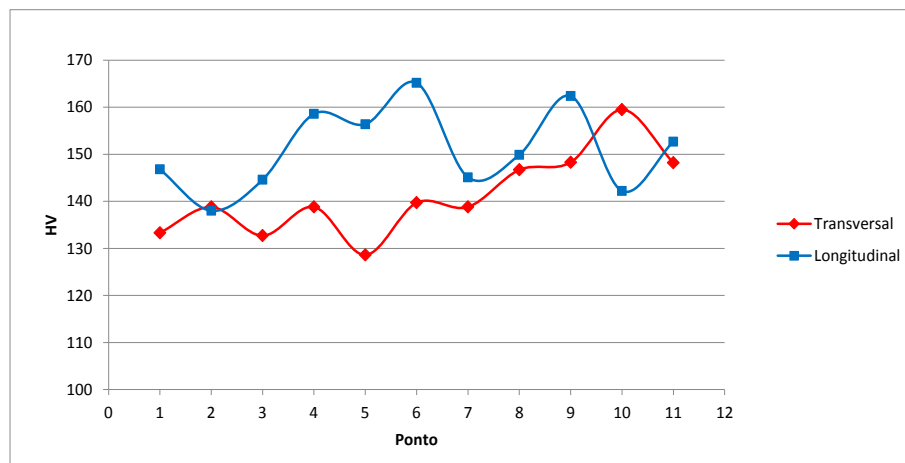


Figura 28 - Dureza da Amostra 1.

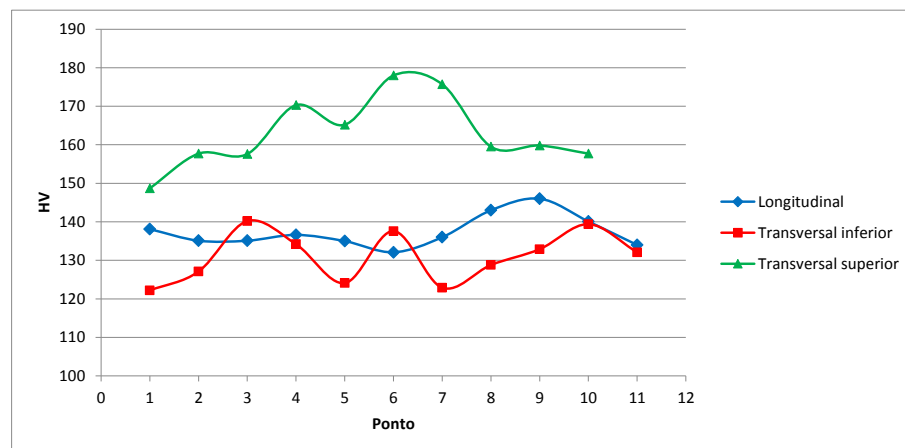


Figura 29 - Dureza da Amostra 2.

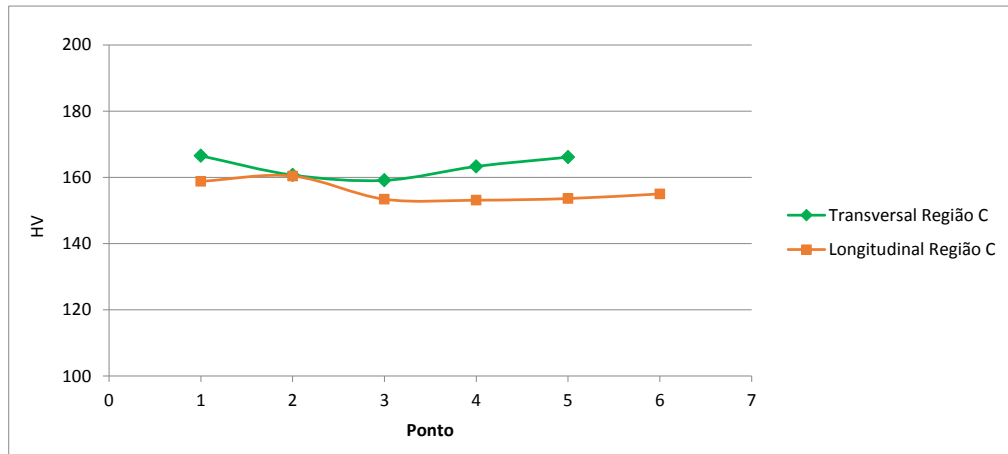


Figura 30 - Dureza da região A (MB) da Amostra 3.

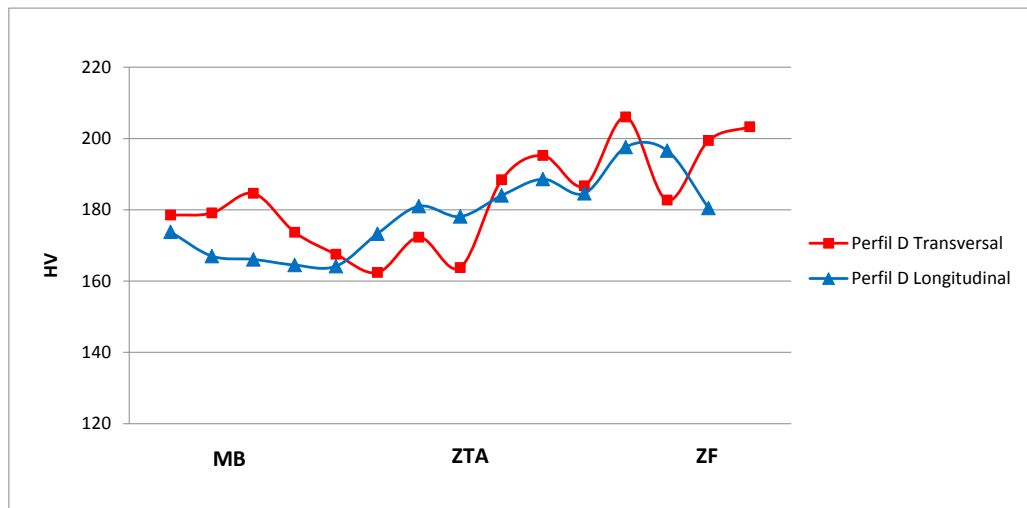


Figura 31 - Dureza ao longo do perfil C da Amostra 3.

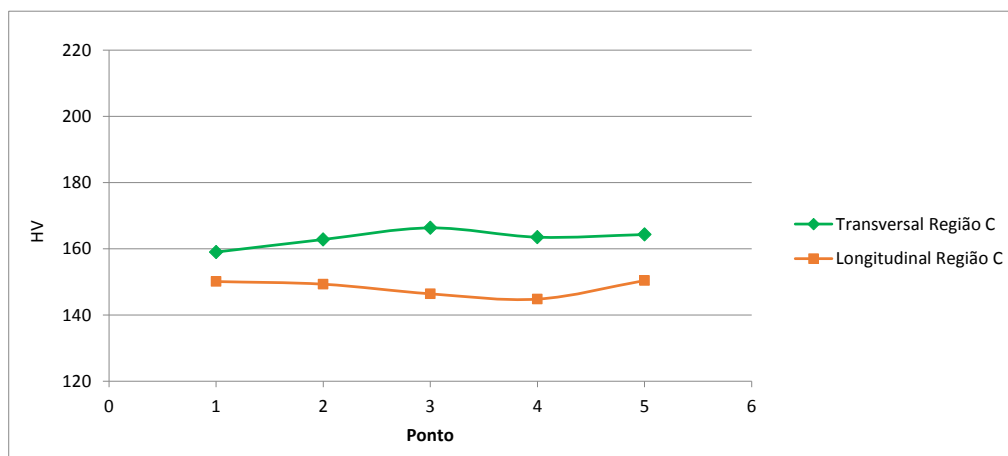


Figura 32 - Dureza da região A (MB) da Amostra 4.

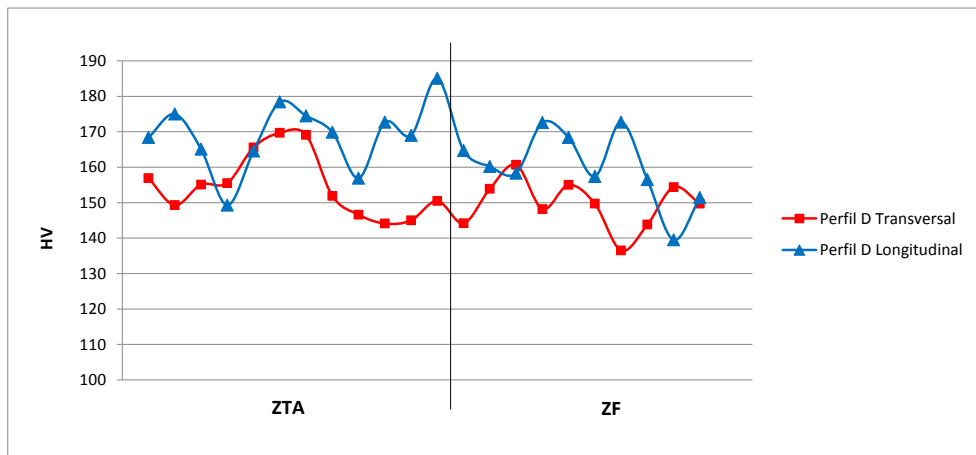


Figura 33 - Dureza ao longo do perfil C da Amostra 4.

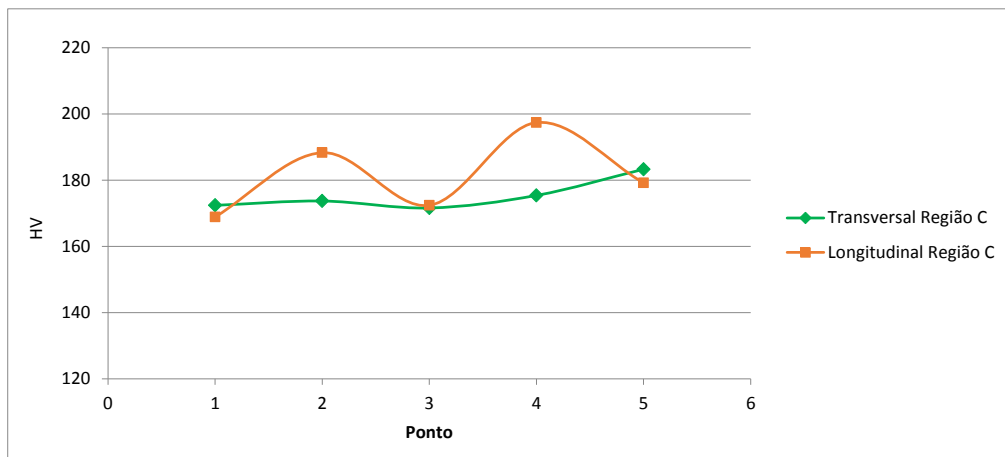


Figura 34 - Dureza da região A (MB) da Amostra 5.

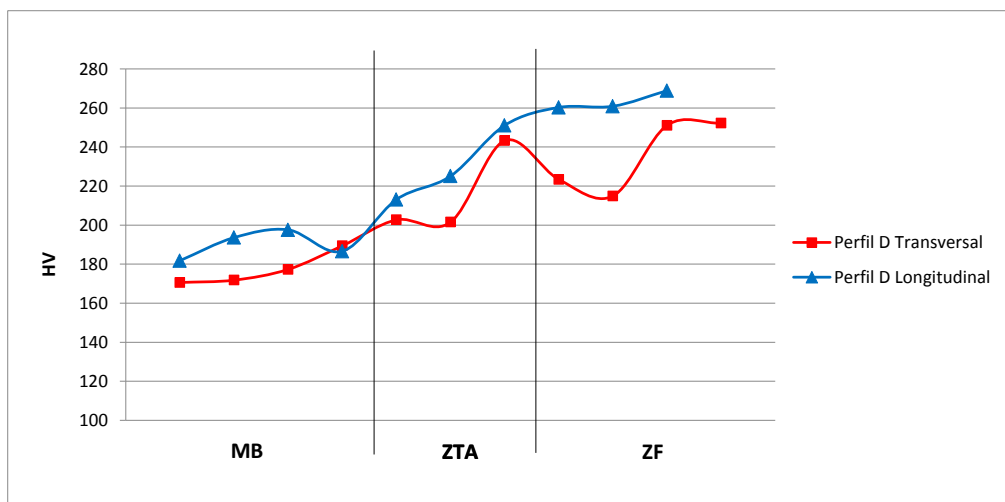


Figura 35 - Dureza ao longo do perfil C da Amostra 5.

Em relação à especificação pela norma ASTM, a dureza do metal base ficou levemente acima do especificado pela norma do material que é 150 HV mas na média atendeu ao requerido.

Ainda para o metal base, representado pelas regiões A nas amostras soldadas e também de forma geral nas demais amostras, a dureza se manteve praticamente constante pois o material é o mesmo e a distância do ponto onde houve a solda nos leva a crer que esse material não sofreu nenhum tipo de alteração e deve mesmo ser semelhante tanto na microestrutura quanto na resistência mecânica.

Nas amostras soldadas os perfis de dureza e de microestrutura mostram um comportamento comum. A dureza aumenta nas regiões que sofreram aquecimento em relação ao MB, sendo maior na ZF e em seguida, na ZTA.

2.7 Ensaio de corrosão

Nas figuras 36 a 43 é mostrado o licor negro forte utilizado assim como as amostras antes e depois de colocada a camada do licor e também após retirada do forno.



Figura 36 - Aspecto do licor negro forte.

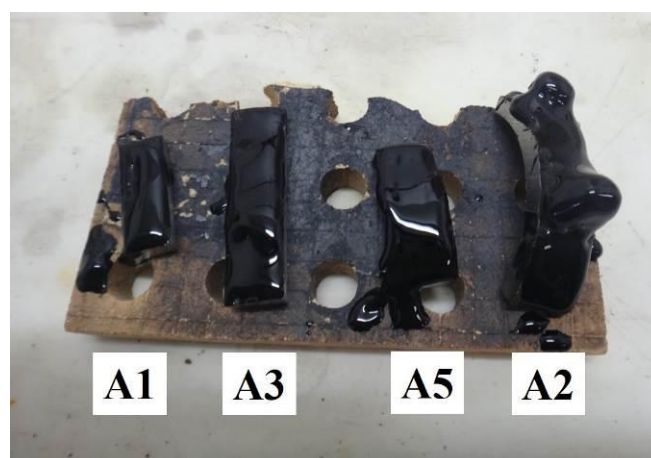


Figura 37 - Amostras com a camada de licor antes de colocar no forno.

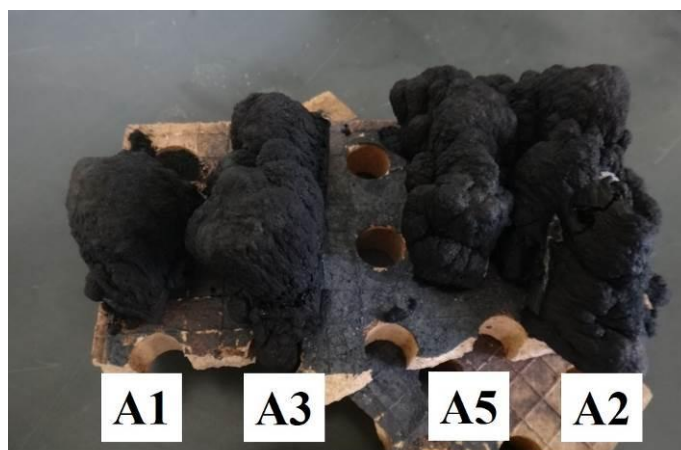


Figura 38 - Amostras após retirada do forno.

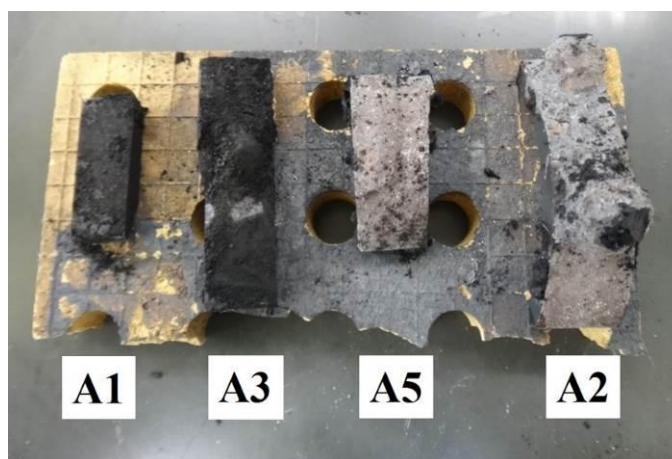
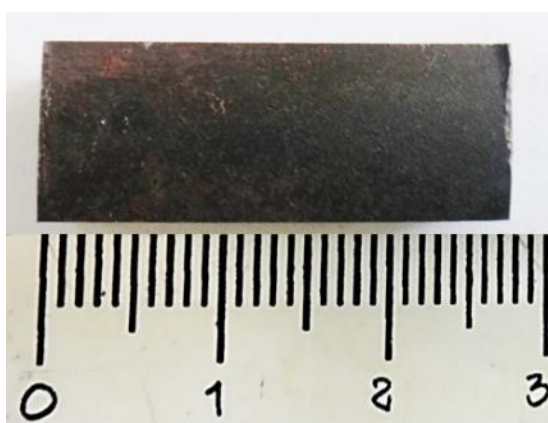
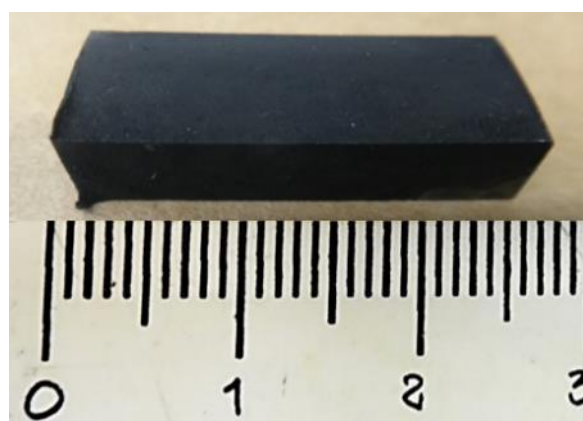


Figura 39 - Amostras após retirada da camada superficial.



(a)



(b)

Figura 40 - Amostra 1: (a) antes do forno (b) depois do forno.

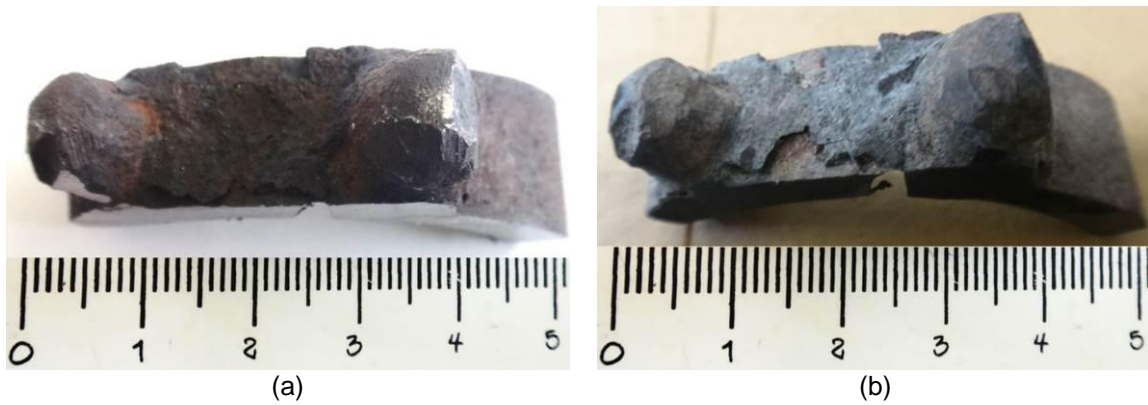


Figura 41 - Amostra 2: (a) antes do forno (b) depois do forno.

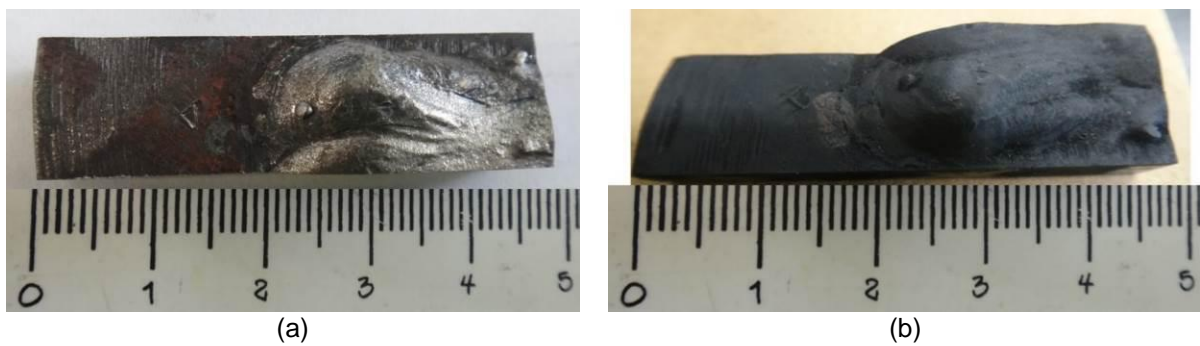


Figura 42 - Amostra 3: (a) antes do forno (b) depois do forno.

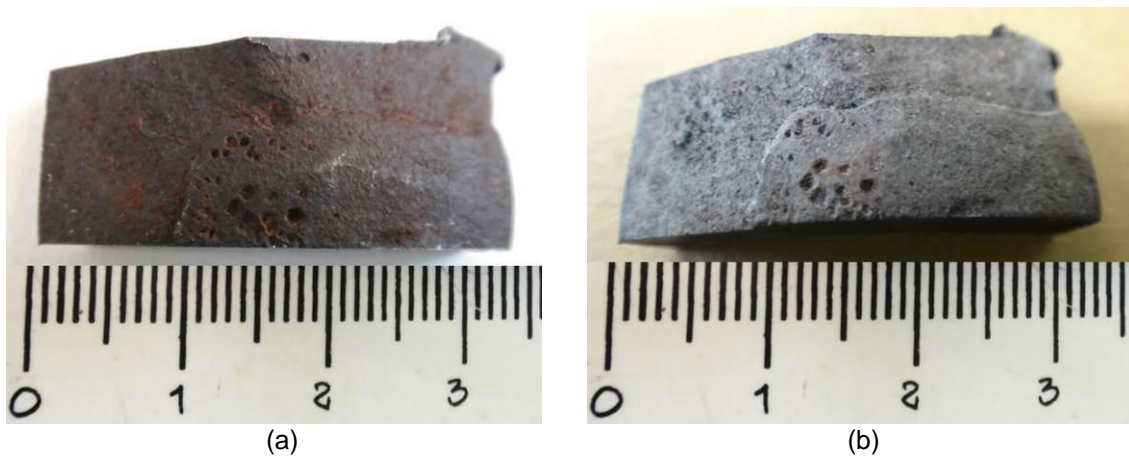


Figura 43 - Amostra 5: (a) antes do forno (b) depois do forno.

Visualmente não foram observadas diferenças relevantes no processo corrosivo em alta temperatura na presença de licor negro entre o metal base e a solda de reposição em nenhuma das amostras.

Conclusões

A microestrutura e a dureza para o metal base não afetado pela reposição por soldagem se praticamente mantiveram inalterados em todas as amostras, conforme já era esperado. A microestrutura obtida após a soldagem também se manteve-se semelhante para três amostras soldadas, no entanto percebe-se que a amostra que operou na caldeira após a reposição apresentou uma microestrutura com maiores quantidades de constituintes típicos de materiais que sofreram alteração provocadas por altas temperatura que as feitas em laboratório. Notou-se um aumento no tamanho de grão para as amostras soldadas na ZTA, relativamente à amostra original de referência, como era esperado. Concluiu-se que a área preenchida com soldagem, resulta numa melhoria das propriedades mecânicas da região reparada. Com relação à corrosão, não foi notada uma diferença relevante no metal base corroído em relação à porção onde foi feita a reposição de espessura com corrosão após operar na caldeira. No entanto ressalta-se que este procedimento de reparo deve ser avaliado com cuidado, devido à presença de outros fenômenos de degradação ativos, como fissuração por fadiga, corrosão pelo lado da água e superaquecimento do material.

Referências bibliográficas

CARDOSO, M., GONÇALVES, C. R. S., OLIBERIA, E. D., PASSOS, M. L. A. *Caracterização do licor negro de eucalipto de indústrias brasileiras*. In: Congresso Iberoamericano de investigación em celulosa e papel, 2000, Iguazú.

DECAIGNY, B. *WBIA Industry Days Recovery Boiler Presentation*. Appleton, WI. Presentation on DSPS - Department of Safety and Professional Services (2013).

DUTRA, J. C., FELIPPE, L. *Desenvolvimento de Tecnologias e de Equipamentos para a Recuperação por Soldagem de Tubos de Parede de Água de Caldeira*. In: IV CITENEL, 2007, Araxá.

FERREIRA, J. P. F. P. *Reposição de espessura por soldadura em tubos de paredes de água de caldeiras de recuperação química*. Lisboa: Universidade Nova de Lisboa, 2012. 103p. (Dissertação, Mestrado em Engenharia de Soldadura).

KUMAR, R. *Smelt Water Explosions*. Indian Institute of Technology Roorkee - Department of Paper Technology (2010). Disponível online em: <<http://pt.scribd.com/doc/25045966/Smelt-Water-Explosions>> Acessado em 31/10/2014.

LAI, G. Y. *Black Liquor Recovery Boilers in the Pulp and Paper Industry*. In: LAI, G. Y. *High-temperature corrosion and materials applications*. Materials Park, Ohio, USA: ASM International, 2007. Capítulo 13, 359-377.

MODENESI, P. J., MARQUES, P. V., SANTOS, D. B. *Introdução à Metalurgia da Soldagem*. Belo Horizonte: 2012. 209p.

PAOLIELLO, F. A., ALVES, A. S., LOVO, A. C., MAESTRI, E., NETO, J. F., TAKAHASHI, J. S. I., ASPGREN, L. P., MENTZ, M. *Guia para inspeção de tubos de aço*

carbono pinados em fornalhas de recuperação. Recomendação do Comitê de Segurança em Caldeiras de Recuperação do Brasil. Sub-comitê de Manutenção, Inspeção e Instrumentação. Belo Oriente, Outubro de 2005.

PAOLIELLO, F. A. Os componentes de segurança das caldeiras de recuperação. *O Papel*, São Paulo, 37, 34-37, dezembro de 2007.

SATHYANATHAN, V. T. *Smelt Water Explosion in Chemical Recovery Boiler*. Atualizado em 18/12/2009. Disponível online em:
<<http://www.brightengineering.com/power-plants/59525-smelt-water-explosion-in-chemical-recovery-boiler/>> Acessado em 30/10/2014.

SATHYANATHAN, V. T. *Understanding Tube Failures in High Pressure Boilers*. Atualizado em 16/11/2010. Disponível online em:
<<http://www.brightengineering.com/power-plants/34265-understanding-tube-failures-in-high-pressure-boilers/>> Acessado em 03/11/2014.

SILVA, A. C. *Reparo por deposição de solda aplicada a tubulações de petróleo e gás em serviço com pequena espessura remanescente*. Florianópolis: Universidade Federal de Santa Catarina, 2004. 106p. (Dissertação, Mestrado em Engenharia Mecânica).

* * *