

---

## Analysis of the recomposition of thickness with welding of tubes coated with overlay of the furnace of chemical recovery boilers

### Análise da recomposição de espessura com solda de tubos revestidos com overlay da fornalha de caldeiras de recuperação química

Received: 2023-06-30 | Accepted: 2023-07-01 | Published: 2023-07-04

---

#### **Bruno Ricardo de Jesus Passos**

ORCID: <https://orcid.org/0009-0004-0840-279X>

Instituto Federal de Educação Ciência e Tecnologia da Bahia, Brasil

E-mail: [brunopassos05@gmail.com](mailto:brunopassos05@gmail.com)

#### **Luiz Antonio Pimentel Cavalcanti**

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4932-9387>

Instituto de Educação Ciência e Tecnologia da Bahia, Brasil

E-mail: [luiz.cavalcanti@ifba.edu.br](mailto:luiz.cavalcanti@ifba.edu.br)

#### **Carlos Augusto de Souza**

ORCID: <https://orcid.org/0009-0003-4998-7184>

Petrobras Transporte S.A., Brasil

E-mail: [carlos.asouza@transpetro.com.br](mailto:carlos.asouza@transpetro.com.br)

#### **Carlos Otávio Damas Martins**

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1418-3226>

Universidade Federal de Sergipe, Brasil

E-mail: [carlosmartinsufs@gmail.com](mailto:carlosmartinsufs@gmail.com)

#### **Ivan Costa da Silva**

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5990-5179>

Instituto de Educação Ciência e Tecnologia da Bahia, Brasil

E-mail: [ivan.silva@ifba.edu.br](mailto:ivan.silva@ifba.edu.br)

#### **Cláudia Teresa Teles Farias**

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3976-613X>

Instituto de Educação Ciência e Tecnologia da Bahia, Brasil

E-mail: [cttfarias@gmail.com](mailto:cttfarias@gmail.com)

---

### ABSTRACT

Welding processes are often used in the repair of furnace tubes of chemical recovery boilers during maintenance interventions. However, this method of repair can cause changes in the mechanical and metallurgical properties of the base materials. These changes in the cross section of the tube, in practice, cannot always be verified immediately, due to the lack of specific methodologies, which are reliable and economically viable versus the need for operational return of the component. This work was carried out in order to collect the basic information necessary for the reliability of this repair procedure, and what risks these can bring to the operation of the equipment. For this, thinnings were performed located in tubes with manufacturing overlay and performed later recomposition of the overlay, in order to simulate the repair procedures performed during the equipment maintenance shutdowns. The evaluation was made through the microstructural analysis, the residual thickness and the mechanical property of hardness in the region repaired with weld to recompose the coating, revealing no relevant concern in view of what is currently carried out in the field.

**Keywords:** Recovery boiler; Overlay; Thickness recomposition;

---

## RESUMO

Processos de soldagem são frequentemente utilizados no reparo de tubos da fornalha de caldeiras de recuperação química durante as intervenções de manutenção. Porém, este método de reparo pode provocar alterações nas propriedades mecânicas e metalúrgicas dos materiais de base. Essas alterações na seção transversal do tubo, na prática, nem sempre podem ser verificadas de imediato, devido à falta de metodologias específicas, que sejam confiáveis e economicamente viáveis versus a necessidade de retorno operacional do componente. Este trabalho foi realizado a fim de levantar as informações básicas necessárias à confiabilidade desse procedimento de reparo, e quais os riscos que esses podem trazer à operação do equipamento. Para tal, foram realizados desbastes localizados em tubos com *overlay* de fabricação e realizado posterior recomposição do *overlay*, a fim de simular os procedimentos de reparos realizados durante as paradas de manutenção do equipamento. A avaliação foi feita através da análise microestrutural, da espessura residual e da propriedade mecânica de dureza na região reparada com solda para recomposição do revestimento, não revelando nenhuma preocupação relevante diante do que é realizado atualmente no campo.

**Palavras-chave:** Caldeira de Recuperação; *Overlay*; Recomposição de espessura;

---

## INTRODUÇÃO

Um dos equipamentos mais importantes em uma fábrica de papel e celulose é a caldeira de recuperação química, pois, geralmente, é este quem limita o tempo de operação entre as campanhas da unidade, além de ter o maior investimento financeiro durante as intervenções de manutenção. Entre as preocupações inerentes a operação deste equipamento, é que existe, um alto risco de explosão pela mudança de estado físico da água, em caso de contato com o *smelt*, como por exemplo, em situações de vazamentos causados por danos nos tubos da fornalha (DECAIGNY, 2013).

Assim, a recomposição da espessura por *weld overlay*, em tubos da parede de água, é necessária quando eles são afetados por mecanismos de perda de espessura ou discontinuidades localizadas. Como por exemplo, corrosão, erosão, trincas e desgaste mecânico induzidos pelo processamento industrial. Os processos de soldagem são frequentemente utilizados no reparo de equipamentos que trabalham pressurizados, porém, a soldagem pode provocar alterações nas propriedades mecânicas e metalúrgicas ao longo da seção transversal dos materiais de base.

Os reparos com solda para reposição de espessura em tubos de caldeiras de recuperação química são geralmente abordados de uma forma muito conservadora, devido ao risco de explosão por contato da água com o *smelt* localizado no fundo da fornalha, em caso de ocorrência de vazamento durante a operação.

Atualmente, após o reparo, o controle de qualidade é realizado apenas na superfície metálica, por meio de inspeção visual e aplicação do ensaio de líquido penetrante. Ou seja, todo esse processo ocorre sem acompanhamento da seção transversal da região do reparo (parede do tubo), a nível das propriedades mecânicas e metalúrgicas.

Assim, em caso de descontinuidades ou danos metalúrgicos inseridos no material durante o processo de soldagem, bem como no caso de penetração excessiva do metal depositado, não seriam possíveis de detectar durante o evento pelas metodologias adotadas atualmente. Daí, a importância de amostras de testes, para análise da prática a ser empregada durante as manutenções.

O trabalho visou avaliar a confiabilidade do processo de reparo com solda, utilizado para recomposição de espessura de tubos com revestimento do tipo *overlay* em caldeiras de recuperação química. Para tal, foi analisada a metalurgia, espessura residual e propriedade mecânica de dureza do material através de ensaios específicos, os quais não são realizados nas intervenções de campo.

## REVISÃO DE LITERATURA

As caldeiras de recuperação química são exclusivas do setor de papel e celulose. É um equipamento complexo no que se refere à sua construção, bem como a operação e a manutenção, esta última, geralmente, envolve um alto custo e define, quase sempre, a limitação de produção das unidades.

Este equipamento funciona como caldeira de vapor, além de recuperar os produtos químicos inorgânicos utilizados no processo de produção, reduzindo os efluentes com potencial poluente, sendo o local onde as reações de recuperação ocorrem, fazendo assim também o papel de um reator químico.

Sua dupla função, faz com que a concepção de uma caldeira de recuperação seja mais complexa e seu funcionamento muito mais complicado do que, por exemplo, o de uma caldeira comum que queima combustíveis convencionais (HUPA, 2012).

O *smelt* é o produto resultante da combustão do licor preto, sendo uma mistura de sais fundidos (material inorgânico), constituído principalmente de  $\text{Na}_2\text{CO}_3$ ,  $\text{Na}_2\text{S}$  e pequena quantidade de  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  (HUPA, 1997). Isto, em elevadas temperaturas, em torno de  $800^\circ\text{C}$  a  $850^\circ\text{C}$  e, no decorrer do tempo, geralmente tendem a provocar corrosão e erosão nas superfícies em contato por ser bastante viscoso (VAKKILAINEN, 2006).

Pelo fato das caldeiras de recuperação serem, ao mesmo tempo, reatores químicos e equipamentos geradores de vapor, sua complexidade operacional e seus riscos potenciais são maiores que os apresentados por caldeiras convencionais. Explosões em unidades de recuperação ocorreram historicamente em número maior que em outros equipamentos de combustão. Isto pode ser creditado ao fato de que as caldeiras de recuperação estão sujeitas não somente a explosões de gases e vapores combustíveis, tal como em outros geradores de vapor, mas também a explosões água-*smelt* (PENA, 2016).

A explosão água-*smelt* produz uma pressão muito mais elevada em um tempo muito menor do que as reações provocadas por explosivos (pólvora), bem como pela reação entre sódio

e água. Esse fenômeno pode ocorrer mesmo com quantidades pequenas de água e tempos de exposição muito curtos (PAOLIELLO, 2007).

A fornalha baixa das caldeiras de recuperação química é a região mais crítica deste tipo de equipamento, devido à sua susceptibilidade à corrosão e ao risco inerente de exposições críticas entre água e *smelt* em caso de perda de contenção no tubo (FERREIRA, 2012).

Essa região da fornalha, que é também a zona em que ocorre a redução dos compostos inorgânicos do licor preto, possui um ambiente de características corrosivas ainda mais acentuadas que as demais regiões. Justamente por esse motivo, a grande maioria das caldeiras de recuperação possui algum tipo de proteção contra corrosão dos tubos nesta parte da fornalha. Usualmente esta proteção se estende do fundo da caldeira até uma altura variável que depende do seu projeto (PAOLIELLO et al., 2005). Esta proteção para os tubos geralmente é de três tipos: tubos pinados, compostos ou com *weld overlay*.

Uma alternativa aos tubos pinados ou compostos, que têm vindo a ser utilizada por um fabricante de caldeiras de recuperação química com relativo sucesso, é o revestimento com solda dos tubos. Nesse caso em específico, o metal de base em aço carbono, geralmente o ASTM A210 Grau A1, é revestido com um aço inoxidável ferrítico com 18% a 25% de Cr. Esse processo é conhecido como *weld overlay*, sendo aplicado também após substituições de trechos e reparos localizados (KEISER, 2016).

A soldagem do *overlay* é um tipo de serviço que visa revestir determinados componentes com materiais especiais, conferindo mais resistência (mecânica ou química) e qualidade de acabamento. A composição do material de adição varia ao longo da altura da fornalha, apresentando um teor de 25% de Cr na zona mais baixa da mesma, ou seja, na região mais susceptível a corrosão (KEISER, 2016).

Para diversas aplicações, as normas relevantes exigem que, antes da execução da soldagem de produção, especificações dos procedimentos que serão adotados para a sua execução sejam preparadas e qualificadas. Este processo visa demonstrar que, através do procedimento proposto, soldas adequadas, de acordo com os requisitos colocados pela norma ou estabelecidos em contrato, podem ser obtidas (MARQUES, 2011).

## METODOLOGIA

### ▪ AMOSTRAS UTILIZADAS

Neste estudo foram utilizados tubos novos e usados de aço baixo carbono sem costura, ASTM A210 Grau A1, revestidos com *overlay* em aço inoxidável ferrítico com 18% de Cr, fabricados para parede de água da fornalha da caldeira de recuperação química da indústria de celulose. Material dos tubos- ASTM A210 Grau A1 (ASTM, 2012) + *overlay* 18%Cr; Dureza do

metal base- máxima 143 HB (151 HV); Diâmetro- 63,5 mm; Espessura de parede- 5,0 mm (aço carbono) + 2,0mm (min. *overlay*); Espaçamento entre tubos- membrana de 12,7 mm (0,5”).

Dependendo da estratégia de manutenção utilizada, os tubos reparados em campo são mantidos em operação por longo período, caso se encontrem em bom estado após a inspeção, durante as paradas de manutenção. No caso em estudo, a espessura mínima calculada pelo ASME I, para os tubos de aço carbono da fornalha da caldeira de recuperação é de 3,1mm. A metodologia utilizada para o trabalho se encontra demonstrada na Figura 1:

**Figura 1** – Esquema geral dos procedimentos experimentais.



Fonte: Autoria Própria (2022)

Inicialmente foram realizados desbastes em três pontos de cada um dos tubos, gerando assim três amostras para cada tubo, conforme detalhados na Tabela 1;

**Tabela 1** – Identificação das amostras de tubos

Tubo	Amostras	Condição do Tubo	Descrição
1 à 5	1A/1B/1C 2A/2B/2C 3A/3B/3C 4A/4B/4C 5A/5B/5C	Novo	-----
6	6A/6B/6C	Usado	Trecho de tubo que operou por 8 anos em caldeira de recuperação sem ter tido recomposição de espessura no trecho;
7 e 8	7A/7B/7C 8A/8B/8C	Usado	Trecho de tubo que operou por 23 anos em caldeira de recuperação, sem ter tido recomposição de espessura no trecho. Observado desgaste interno nos mesmos;
9	9A	Usado	Trecho de tubo que operou por 15 anos em caldeira de recuperação sem ter tido recomposição de espessura no trecho. Este serviu como referência para a comparação microestrutural entre tubos novos e os que operaram durante um período em caldeiras de recuperação.

Fonte: Autoria Própria

Nas Figuras 2 e 3 podem ser visualizados os tubos novos e usados que foram utilizados na produção de amostras. Estes, possuem revestimento protetivo (*weld overlay*) apenas na geratriz que terá contato com o ambiente interno da fornalha da caldeira de recuperação.

**Figura 2** – Identificação dos tubos novos, vista da geratriz não revestida.



**Figura 3** – Tubos usados que foram utilizados na produção de amostras.



Para as soldas de recomposição de espessura do revestimento, foi utilizado o processo de soldagem por eletrodos revestidos, com características: Designação comercial- CR43 Cbs (Kobesteeel®); Diâmetro- 2,5 mm; Tipo de junta- Revestimento de reconstrução; Posição de soldagem- Todas; Intensidade de corrente- 70 a 110 A; Tensão- 18 a 26 V; Tipo de corrente- Corrente contínua polaridade inversa.

Nas amostras utilizadas foram realizados desbastes localizados, com área aproximada de 15 mm x 40 mm, no sentido longitudinal/transversal do tubo, a fim de simular algumas situações que ocorrem durante as intervenções de manutenção, quando são encontradas descontinuidades ou exposição do aço carbono devido a mecanismos de desgaste inerentes a este tipo de equipamento.

Após a remoção do revestimento, foram realizados testes com sulfato de cobre 10%, para verificação e confirmação do aço carbono exposto. Posteriormente, foram realizadas medições de espessura nestes locais, para registro da espessura residual dos pontos a serem recuperados com soldagem do *overlay*.

Algumas amostras sofreram remoção excessiva em pontos localizados, ainda assim foram utilizadas, para que fosse verificado o comportamento quando da realização do processo de soldagem de reparo, em trechos com espessura residual de aço carbono inferior ao limite recomendado para reparo (3,1 mm).

Dois soldadores profissionais, porém, com nível de experiência diferentes neste tipo de atividade específica, realizaram os reparos. Após isto, foi realizado ensaio de análise de liga na

superfície do revestimento soldado para verificação do teor de cromo, sendo utilizado para isso um analisador de liga, marca Niton®<sup>®</sup>, modelo XL3t Gold.

Após realização da recomposição do revestimento, foram marcadas as regiões de interesse para realização de corte transversal dos trechos dos tubos, e posterior embutimento, lixamento, polimento e ataque químico para as análises. Para as análises metalográficas e demais exames, as amostras dos tubos foram cortadas na transversal, incluindo a região da solda do reparo, quando aplicável, através de máquina de corte modelo Arotec®<sup>®</sup>, modelo Arocor 80. Após o procedimento, foram embutidas em resina contendo cobre, lixadas em diferentes granulometrias, 180, 220, 320, 400, 600, 1200 *mesh* e polidas com pasta de diamante.

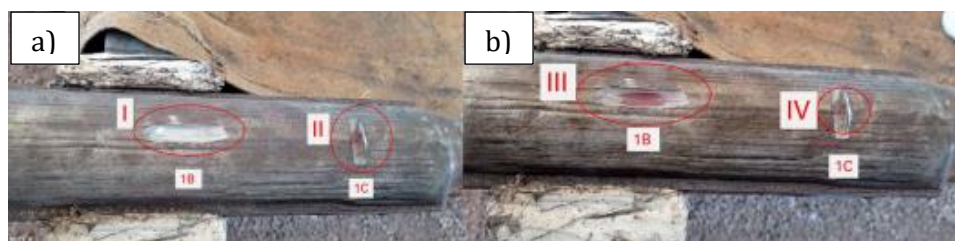
Para a análise macroestrutural e microestrutural do aço carbono foi utilizado ataque com solução de Nital 2% e para o *overlay* 18%Cr a solução de ácido oxálico 10%.

O objetivo principal na microscopia óptica foi avaliar o metal de base (MB), a zona termicamente afetada (ZTA) e a zona de fusão (ZF), para então assim verificar as diferenças entre as microestruturas das diferentes regiões em função da condição de cada amostra. Os ensaios de dureza foram realizados, utilizando-se o durômetro de bancada REICHETER®<sup>®</sup>, modelo BVR 250H. Este ensaio foi necessário para representar as propriedades mecânicas do material.

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

Inicialmente foram realizados os desbastes na geratriz revestida com *weld overlay*, até atingir espessuras distintas no aço carbono, conforme visto na Figura 4:

**Figura 4-** Teste com sulfato de cobre no desbaste do revestimento *overlay* em amostras 1B e 1C do tubo 01: (a) Sem exposição do aço carbono em I e iniciando a exposição do aço carbono com coloração marrom avermelhado em II; (b) Após exposição do aço carbono com coloração marrom avermelhado em III e IV.



Posteriormente, foram realizadas medições de espessura nas regiões desbastadas dos corpos de prova (amostras), para determinar a espessura residual de aço carbono, antes da realização dos reparos. Os resultados são mostrados na Tabela 2.

**Tabela 2-** Controle de espessura residual do aço carbono após desbaste da superfície revestida com *overlay*

TUBO	AMOSTRA				SOLDADOR
	Espessura residual após desbaste (mm)				
	A	B	C	D	
01	5	4,8	4,9	—	A
02	4,5	4,3	4,9	—	A
03	4,7	4,5	5,1	—	A
04	4,3	4,1	4,7	—	B
05	4,3	4,9	4,5	—	B
06	1,8	2,2	1,8	2,5	—
07	2,6	2,6	2,4	2,9	B
08	3,5	2,9	—	—	A
09	—	—	—	—	—

Durante a preparação das amostras, ocorreu a perfuração dos tubos em alguns pontos (destacados em vermelho na Tabela 2), isto devido à baixa espessura de aço carbono nas amostras. Isso foi devido a remoção excessiva durante o desbaste (tubo 06) ou a presença de corrosão interna (tubo 07). Por isso, uma quarta amostra foi adicionada ao tubo 07 (7D).

Foi realizado ensaio de análise de liga na superfície do revestimento soldado das amostras, para verificação do teor de cromo. Os valores encontrados estão descritos na Tabela 3.

**Tabela 3-** Teor de Cromo na superfície do metal de solda depositado (*weld overlay*).

TUBO	AMOSTRA				SOLDADOR
	%CR NA SUPERFÍCIE DO <i>OVERLAY</i>				
	A	B	C	D	
01	15,4	15,5	15,5	—	A
02	15,5	15,4	17,1	—	A
03	15,3	16,1	15,5	—	A
04	15,2	15,3	15,2	—	B
05	15,8	16,1	15,5	—	B
06	—	—	—	—	—
07	—	—	—	15,4	B
08	15,5	12,4	—	—	A
09	17,2	—	—	—	—



Os valores encontrados estão dentro da faixa considerada como aceitável, acima de 12%, e, atende a especificação deste tipo de revestimento. Para se ter a formação da camada protetora em aços inoxidáveis, é recomendado um mínimo de 12% (TELLES, 2003). Após realização do processo de soldagem para recomposição do revestimento, foram então marcadas as regiões de interesse para realização de corte transversal dos trechos dos tubos e seleção do trecho a ser embutido, conforme Figura 5.

**Figura 5-** Detalhe da região removida para embutimento.



### CARACTERIZAÇÃO MICROESTRUTURAL

Para as análises metalográficas, conforme a Figura 6, foram observadas as seguintes regiões: ● Região A: metal base em aço carbono; ● Região B: região da zona de fusão do processo de soldagem; ● Região C: metal base do revestimento protetivo (*overlay*);

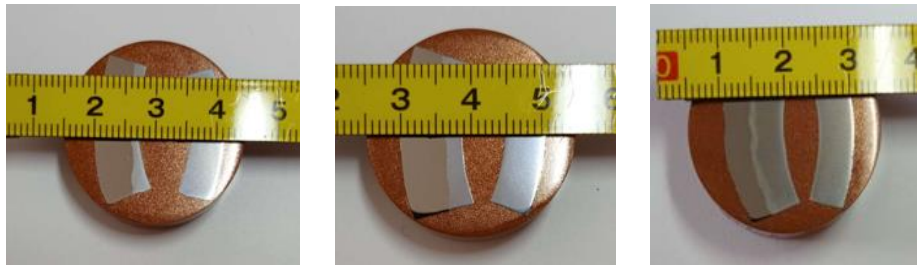
**Figura 6-** Macrografia contendo a região do metal base (A), zona de fusão (B) e *overlay* (C).



A análise macroscópica foi realizada para verificação do perfil da solda de reparo (recomposição do *overlay*) e a visualização da espessura residual do aço carbono nas amostras, sendo usado para isso uma “escala” graduada, conforme exemplos da Figuras 7:

**Figura 6-** Macrografia amostras 1B, 2A, 3C (superior) e 7D, 8A, 9A (inferior); Ataque Nital 3%. Corte transversal.





Na Tabela 4 são visualizados os resultados das espessuras do metal base em aço carbono, após a recomposição do *overlay*, obtidas a partir das macrografias. Essas medidas foram realizadas através de escala graduada, conforme exemplo demonstrado na Figura 6.

**Tabela 4-** Espessura aproximada do metal de base após recomposição do revestimento.

TUBO	AMOSTRA				SOLDADOR
	Espessura aproximada do metal de base (mm)				
	A	B	C	D	
01	4,5	4,0	4,5	—	A
02	4,0	3,5	4,5	—	A
03	4,5	3,5	4,0	—	A
04	3,5	3,5	4,0	—	B
05	3,0	4,0	3,0	—	B
06	—	—	—	—	—
07	—	—	—	1,0	B
08	2,5	2,0	—	—	A
09	5,0*	—	—	—	—

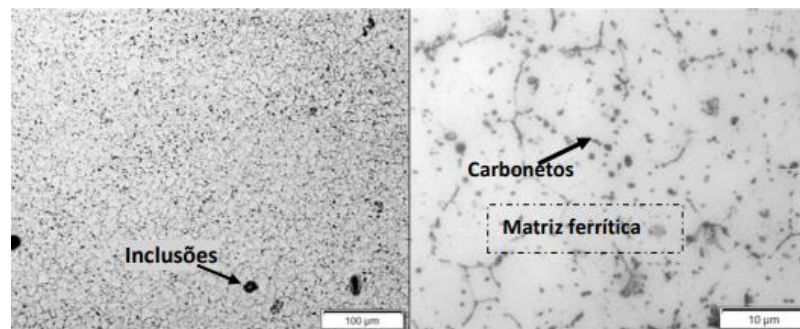
Em relação ao perfil de espessuras observado, não é possível afirmar que a experiência do executante durante a realização do reparo do *overlay* apresentou diferença significativa nos resultados. Por se tratar de regiões com pequena espessura residual, os testes de qualificação que precedem as intervenções de manutenção, tornam-se de grande relevância para a qualidade da execução dos procedimentos de reparo.

A profundidade de penetração do metal de adição é evidenciada apenas próximo à zona de fusão, o que é um indicativo de que os parâmetros do procedimento de soldagem estão adequados. Na amostra do tubo 09, que possuía o *overlay* de fabricação, foi possível verificar uma zona de fusão mais homogênea, distinguindo bem essa região, visto que a soldagem neste caso foi realizada de forma semi-automática durante a fabricação do componente. Ainda é possível afirmar, que, este trecho de tubo possui espessura de revestimento suficiente para o desempenho de sua função protetiva, mesmo após 1,5 década de operação.

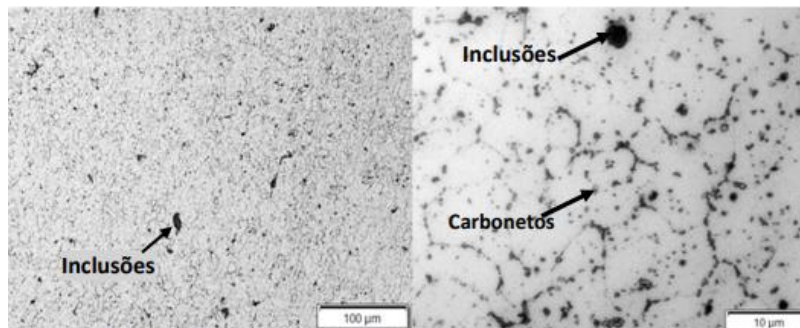
Quanto às amostras dos tubos 07 e 08, as quais possuíam espessura abaixo da mínima requerida antes do procedimento de reparo, ainda assim conseguiram suportar a deposição do revestimento sem demonstrar perfuração nas amostras. Apesar de não ser recomendado reparos em trechos com espessuras residuais abaixo da espessura mínima requerida de projeto, de 3,1mm.

Microscopia do revestimento (*overlay*): O aço inoxidável ferrítico (*overlay*) foi exposto à uma solução de ácido oxálico 10%, possibilitando a revelação de sua microestrutura, que pôde ser observada em um microscópio óptico, com aumento de até 400X, Figuras 7 a 14.

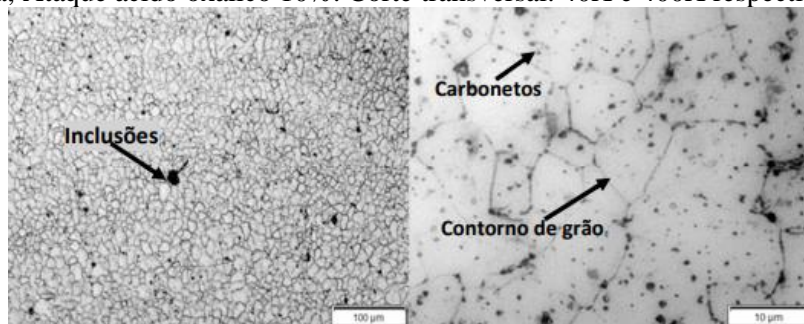
**Figura 7** – Amostra 1A- Micrografia do inox ferrítico (*overlay*): observada microestrutura de matriz ferrítica com carbonetos dispersos (pequenos pontos escuros), prováveis inclusões não metálicas (pontos escuros maiores) e contornos de grãos levemente desfeitos; Ataque ácido oxálico 10%. Corte transversal. 40X e 400X respectivamente.



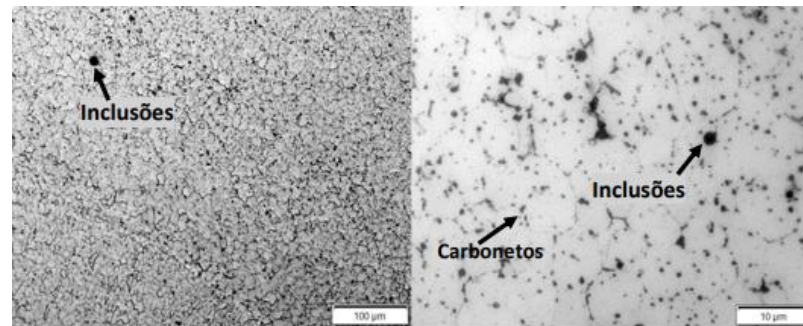
**Figura 8** – Amostra 2B- Micrografia do inox ferrítico (*overlay*): observada microestrutura de matriz ferrítica com carbonetos dispersos (pequenos pontos escuros), prováveis inclusões não metálicas (pontos escuros maiores) e contornos de grãos levemente desfeitos; Ataque ácido oxálico 10%. Corte transversal. 40X e 400X respectivamente.



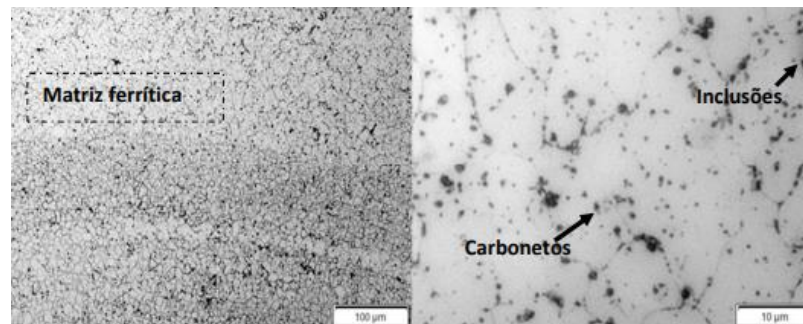
**Figura 9** – Amostra 3A- Micrografia do inox ferrítico (*overlay*): observada microestrutura de matriz ferrítica com carbonetos dispersos (pequenos pontos escuros); prováveis inclusões não metálicas (pontos escuros maiores) e contornos de grãos apresentam-se mais definidos nessa amostra; Ataque ácido oxálico 10%. Corte transversal. 40X e 400X respectivamente.



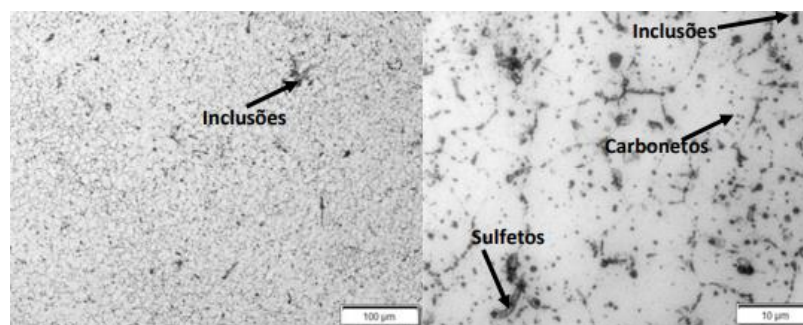
**Figura 10** – Amostra 4B- Micrografia do inox ferrítico (*overlay*)- observada microestrutura de matriz ferrítica com carbonetos dispersos (pequenos pontos escuros); Ataque ácido oxálico 10%. Corte transversal. 40X e 400X respectivamente.



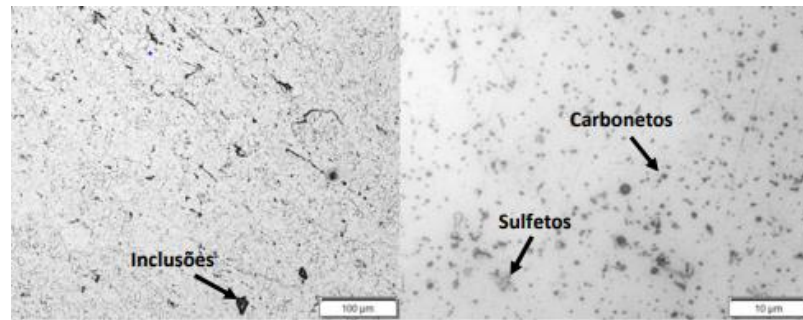
**Figura 11** – Amostra 5C- Micrografia do inox ferrítico (*overlay*)- observada microestrutura de matriz ferrítica com carbonetos dispersos (pequenos pontos escuros); Ataque ácido oxálico 10%. Corte transversal. 40X e 400X respectivamente



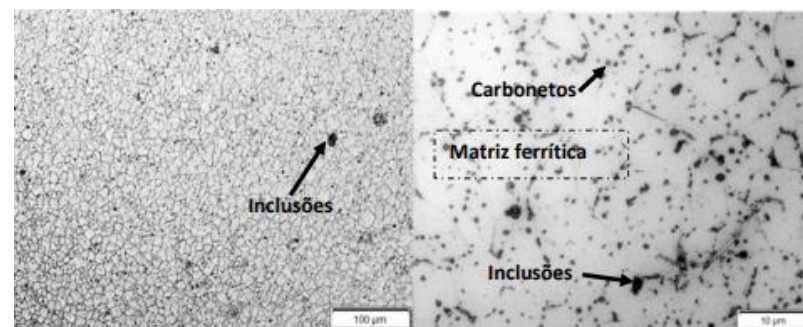
**Figura 12** – Amostra 7D- Micrografia do inox ferrítico (*overlay*): observada microestrutura de matriz ferrítica com sulfetos (cinza claro), carbonetos dispersos (pequenos pontos escuros) e inclusões não metálicas (pontos pretos maiores); Ataque ácido oxálico 10%. Corte transversal. 40X e 400X respectivamente.



**Figura 13** – Amostra 8A- Micrografia do inox ferrítico (*overlay*): observada microestrutura de matriz ferrítica com sulfetos (cinza claro), carbonetos dispersos (pequenos pontos escuros) e inclusões não metálicas (pontos pretos maiores); Ataque ácido oxálico 10%. Corte transversal. 40X e 400X respectivamente.

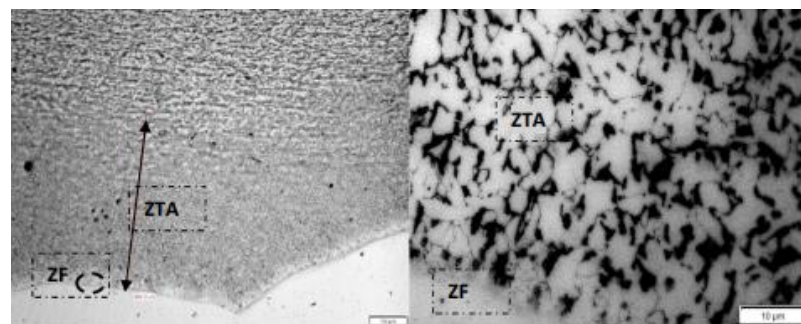


**Figura 14** – Amostra 9A- Micrografia do inox ferrítico (*overlay*): Observada microestrutura de matriz ferrítica com carbonetos dispersos (pequenos pontos escuros), prováveis inclusões não metálicas (pontos escuros maiores) e contornos de grãos levemente desfeitos; Ataque ácido oxálico 10%. Corte transversal. 40X e 400X respectivamente.

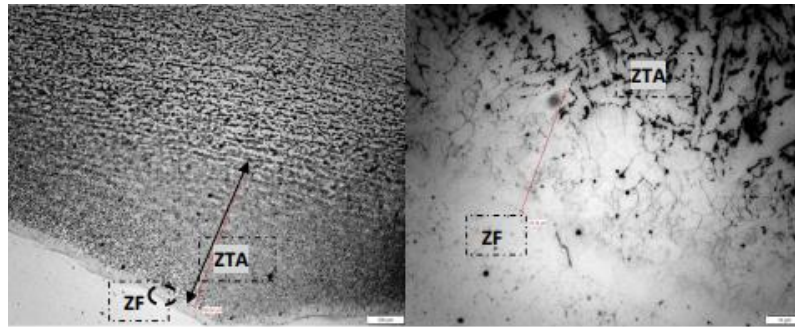


Na região do revestimento *overlay* aplicado, as amostras apresentaram microestrutura de matriz ferrítica com carbonetos dispersos e prováveis inclusões não metálicas. Os contornos de grãos em sua maioria são pouco definidos. Em poucas amostras foram também verificados prováveis sulfetos na matriz ferrítica. Para as demais amostras, não foram identificadas diferenças relevantes em relação ao que foi observado nas Figuras 7 a 14. As micrografias da região da zona de fusão (ZF) e da zona termicamente afetada (ZTA) estão apresentadas nas Figuras 15 a 22.

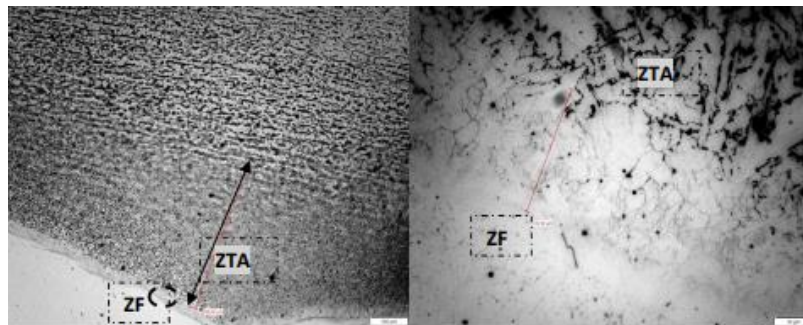
**Figura 15** – Amostra 1A- Micrografia da região da ZF e ZTA: observada microestrutura bruta de fusão na ZF e constituintes típicos de ZTA de alta temperatura próximo a esta. Ataque Nital 2%. Corte transversal. 40X e 400X respectivamente.



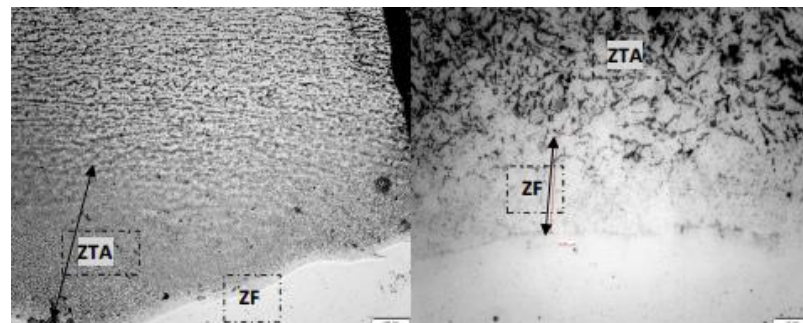
**Figura 16** – Amostra 2B- Micrografia da região da ZF e ZTA: observada microestrutura bruta de fusão na ZF e constituintes típicos de ZTA de alta temperatura ou mesmo de zona fundida próximo a esta, o crescimento de grão neste ponto é um indicativo de deficiência de remoção do *overlay* antigo; Ataque Nital 2%. Corte transversal. 40X e 400X respectivamente.



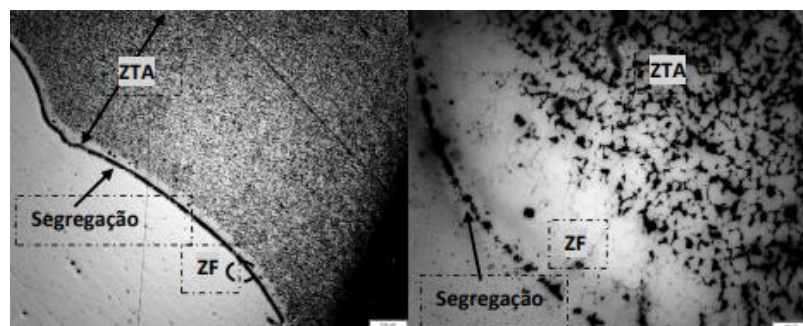
**Figura 17** – Amostra 3A- Micrografia da região da ZF e ZTA: observada microestrutura bruta de fusão na ZF e constituintes típicos de ZTA de alta temperatura próximo a esta. Ataque Nital 2%. Corte transversal. 40X e 400X respectivamente.



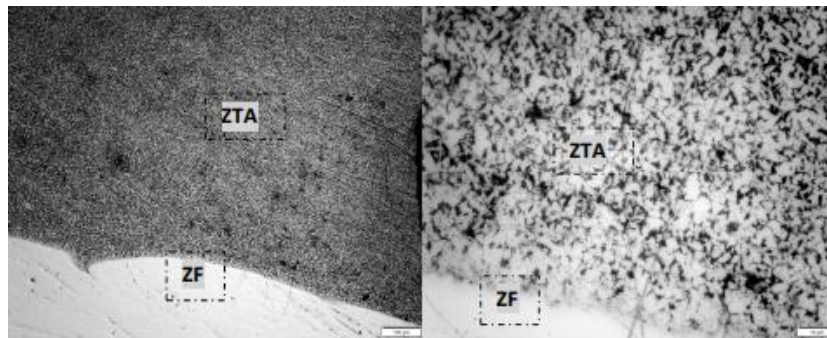
**Figura 18** – Amostra 4B- Micrografia da região da ZF e ZTA: observada microestrutura bruta de fusão na ZF e constituintes típicos de ZTA de alta temperatura próximo a esta. Ataque Nital 2%. Corte transversal. 40X e 400X respectivamente.



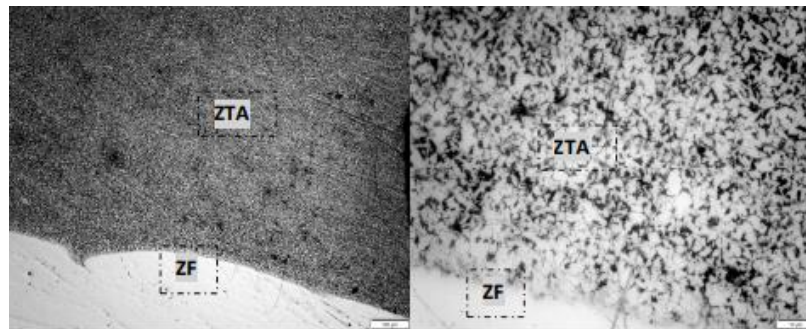
**Figura 19** – Amostra 5A- Micrografia da região da ZF e ZTA; observa-se segregação de elementos na linha de fusão devido a contaminação ou desvio na composição do consumível, indicando uma região com susceptibilidade a ocorrência de discontinuidades; Ataque Nital 2%. Corte transversal. 40X e 400X respectivamente.



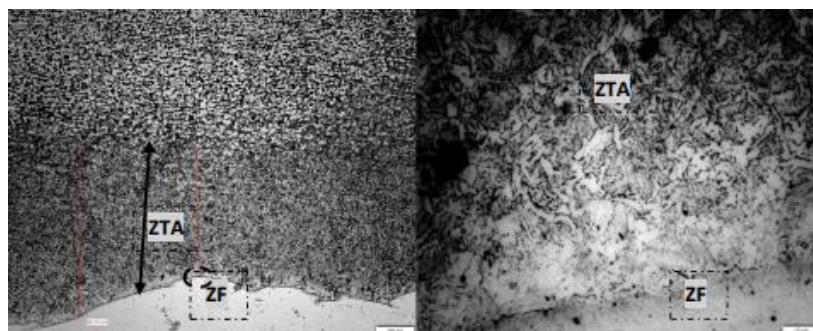
**Figura 20** – Amostra 7D- Micrografia da região da ZF e ZTA: observada microestrutura bruta de fusão na ZF e constituintes típicos de ZTA de alta temperatura. Devido a espessura reduzida neste trecho, durante a soldagem, toda a parede do tubo foi totalmente ou parcialmente austenitizada; Ataque Nital 2%. Corte transversal. 40X e 400X respectivamente.



**Figura 21** – Amostra 8A- Micrografia da região da ZF e ZTA: observada microestrutura bruta de fusão na ZF e constituintes típicos de ZTA de alta temperatura ou mesmo de zona fundida próximo a esta. Devido a espessura reduzida neste trecho, durante a soldagem, toda a parede do tubo foi totalmente ou parcialmente austenitizada; Ataque Nital 2%. Corte transversal. 40X e 400X respectivamente.



**Figura 22** – Amostra 9A- Micrografia da região da ZF e ZTA- observada microestrutura bruta de fusão na ZF e constituintes típicos de ZTA de alta temperatura. Ataque Nital 2%. Corte transversal. 40X e 400X respectivamente



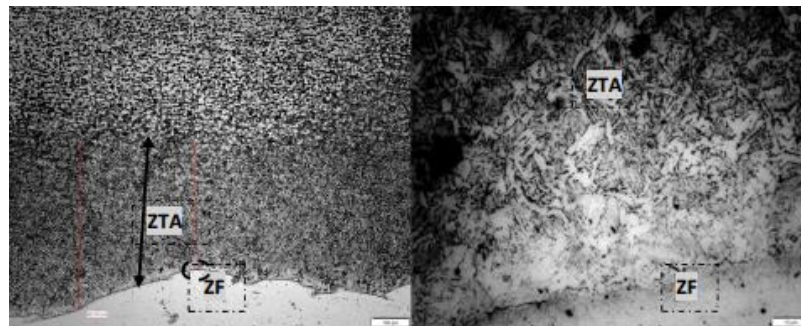
As imagens obtidas na maioria das amostras revelam a linha de fusão demarcando o início da ZTA, com pequeno aumento do tamanho dos grãos próximo a ZF, variando levemente entre as amostras. A estrutura observada na região da ZF tem o aspecto denominado de estrutura bruta de fusão, a qual está bem definida nas amostras.

A exceção observada foi na amostra 5A (Figura 19), onde é visto segregação de elementos ao longo da linha de fusão, a qual, provavelmente seja devido a contaminação durante o processo de soldagem, ou, desvio na composição do consumível utilizado, indicando uma região com

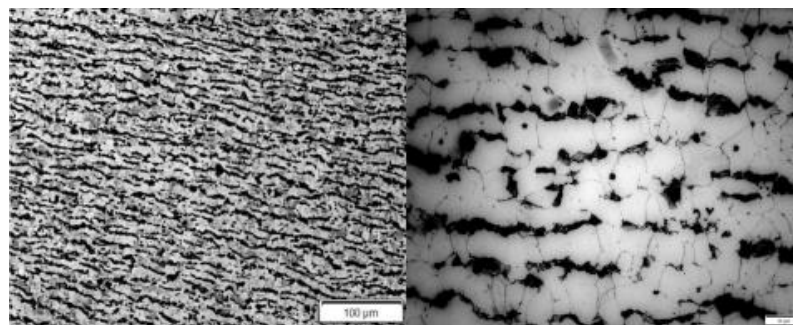
susceptibilidade a ocorrência de discontinuidades. Isto indica que as condições de execução foram distintas, reforçando a necessidade de qualificação dos procedimentos antes das intervenções, visando minimizar a possibilidade de iniciação de danos futuros. Nas demais amostras, a ZTA apresenta granulação grosseira, típica do processo de soldagem, não sendo evidenciadas diferenças significativas entre as amostras.

Microscopia do metal base (aço carbono): O aço carbono foi exposto a solução de Nital 2%, possibilitando a revelação de sua microestrutura, que pôde ser observada num microscópio óptico, com aumento de até 400X. As imagens obtidas na maioria das amostras revelam a composição do aço carbono ASTM A210, aço com baixo teor de carbono, com cerca de 0,27%C (ASTM, 2012).

**Figura 23** – Amostra 1A- Micrografia do metal de base em aço carbono: observada microestrutura perlítica em matriz ferrítica, com grãos alinhados. Ataque Nital 2%. Corte transversal. 40X e 400X respectivamente.

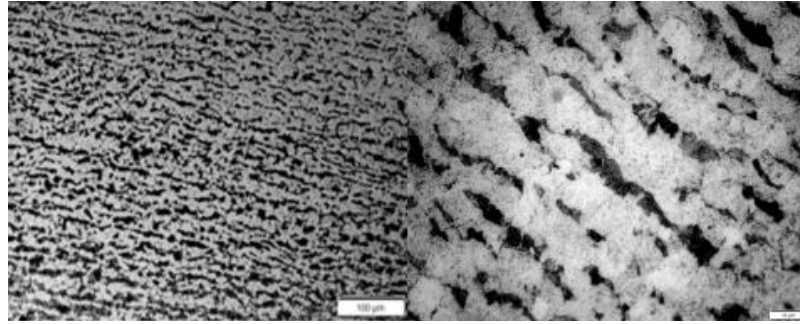


**Figura 24** – Amostra 2B- Micrografia do metal de base em aço carbono; observada microestrutura perlítica em matriz ferrítica, com grãos alinhados. Ataque Nital 2%. Corte transversal. 40X e 400X respectivamente.

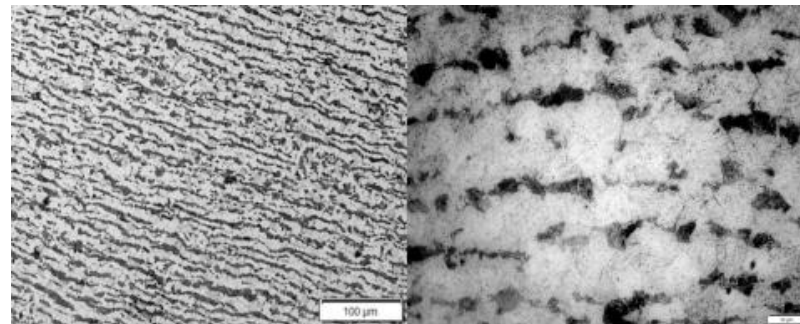


**Figura 25** – Amostra 3B- Micrografia do metal de base em aço carbono; observada microestrutura perlítica em matriz ferrítica, com grãos alinhados. Ataque Nital 2%. Corte transversal. 40X e 400X respectivamente.

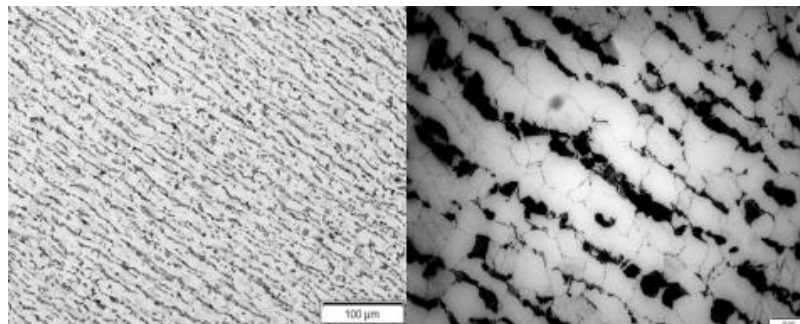




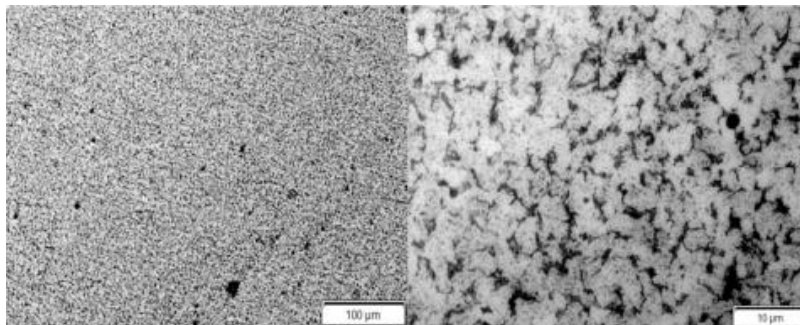
**Figura 26** – Amostra 4B- Micrografia do metal de base em aço carbono; observada microestrutura perlítica em matriz ferrítica, com grãos alinhados. Ataque Nital 2%. Corte transversal. 40X e 400X respectivamente.



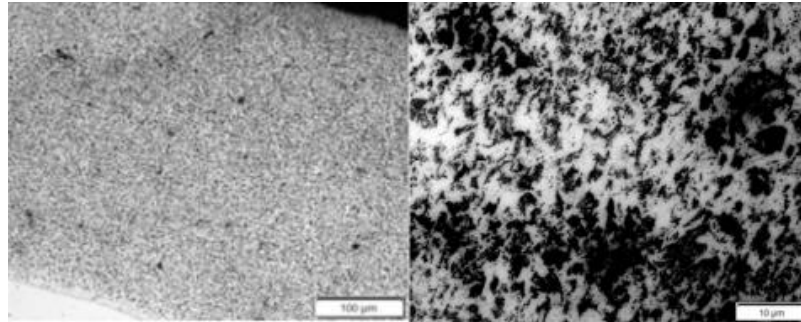
**Figura 27** – Amostra 5A- Micrografia do metal de base em aço carbono; observada microestrutura perlítica em matriz ferrítica, com grãos alinhados. Ataque Nital 2%. Corte transversal. 40X e 400X respectivamente.



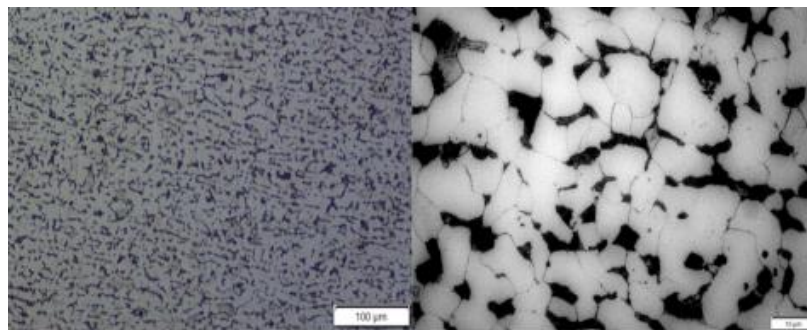
**Figura 28** – Amostra 7D- Micrografia do metal de base em aço carbono: observada microestrutura com granulação grosseira em toda seção transversal, típica de ZTA de alta temperatura. Ataque Nital 2%. Corte transversal. 40X e 400X respectivamente.



**Figura 29** – Amostra 8A- Micrografia do metal de base em aço carbono: observada microestrutura com granulação grosseira em toda seção transversal, típica de ZTA de alta temperatura. Ataque Nital 2%. Corte transversal. 40X e 400X respectivamente.



**Figura 30** – Amostra 9A- Micrografia do metal de base em aço carbono: observado grãos de perlita em matriz ferrítica. Ataque Nital 2%. Corte transversal. 40X e 400X respectivamente.



Nas amostras de tubos novos, Figuras 23 a 27, foram observados microestrutura perlítica em matriz ferrítica, com grãos alinhados em sua maioria, não sendo verificados indícios de qualquer tipo de dano em sua microestrutura.

Os tubos 07 e 08 apresentavam perda de espessura interna, conforme mencionado anteriormente, possuindo assim menor área útil para dissipação do calor oriundo da soldagem. Desse modo, a microestrutura do metal base das amostras desta região foi mais afetada pelo aporte térmico gerado no processo de soldagem do revestimento, gerando uma microestrutura mais próxima do que foi verificado na ZTA das outras amostras conforme visto nas Figuras 28 e 29.

**Medição de Dureza Vickers:** A medição da dureza Vickers com carga de 10kgf/cm<sup>2</sup>, foi realizada com o objetivo de avaliar possíveis alterações de resistência mecânica entre as diferentes regiões identificadas, do metal base e do *overlay*, bem como para comparar propriedades mecânicas entre tubos novos e tubos usados nos testes. Foram realizados três pontos no metal base e no revestimento, sendo os resultados observados conforme Tabela 05. A amostra de tubo usado (amostra 9A), que foi utilizada como referência para a comparação das propriedades mecânicas, obteve valores de dureza um pouco inferior na região do metal base (aço carbono) do que as demais amostras de tubos novos que passaram pelo processo de recomposição de espessura do *overlay*. No caso do aço inoxidável ferrítico com 18% de cromo, a dureza *Vickers* geralmente varia de aproximadamente 150 HV a 190 HV (ASME HANDBOOK, 1954).

**Tabela 5** – Resultado das medidas do ensaio de dureza Vickers do Tubo 01 a 09.

Amostra	Metal Base			Média ± $\sigma$	Overlay			Média ± $\sigma$
1A	122,0	122,0	128,0	124,0 ± 3,5	181,0	181,0	181,0	181,00 ± 0,0
1B	143,0	143,0	135,5	140,5 ± 4,3	170,0	165,0	165,0	166,7 ± 2,9
1C	143,0	135,5	135,5	138,0 ± 4,3	143,0	143,0	151,0	145,7 ± 4,6
2A	143,0	143,0	151,0	145,7 ± 4,6	160,0	165,0	165,0	163,3 ± 2,9
2B	128,0	128,0	135,5	130,5 ± 4,3	151,0	151,0	160,0	154,0 ± 5,2
2C	143,0	135,5	143,0	140,5 ± 4,3	170,0	160,0	170,0	166,7 ± 5,8
3A	143,0	143,0	151,0	145,7 ± 4,6	170,0	170,0	160,0	166,7 ± 5,8
3B	160,0	151,0	143,0	151,3 ± 8,5	170,0	170,0	160,0	166,7 ± 5,8
3C	135,5	135,5	144,0	138,3 ± 4,9	160,0	160,0	160,0	160,0 ± 0,0
4 <sup>a</sup>	151,0	143,0	143,0	148,3 ± 4,6	170,0	170,0	160,0	166,7 ± 5,8
4B	135,5	143,0	143,0	140,5 ± 4,3	170,0	170,0	160,0	166,7 ± 5,8
4C	143,0	143,0	151,0	145,7 ± 4,6	160,0	160,0	160,0	160,0 ± 0,0
5A	155,0	151,0	151,0	152,3 ± 2,3	170,0	170,0	160,0	166,7 ± 5,8
5B	143,0	143,0	140,0	142,0 ± 1,7	170,0	170,0	160,0	166,7 ± 5,8
5C	143,0	151,0	151,0	148,3 ± 4,6	160,0	160,0	160,0	160,0 ± 0,0
7C	181,0	170,0	170,0	173,7 ± 6,4	170,0	170,0	170,0	170,0 ± 0,0
8A	160,0	160,0	170,0	163,3 ± 5,8	170,0	170,0	181,0	173,7 ± 6,4
8B	160,0	151,0	151,0	154,0 ± 5,2	274,0	181,0	181,0	212,0 ± 53,7
9A	116,0	116,0	116,0	116,0 ± 0,0	183,0	183,0	196,0	187,3 ± 7,5

## CONCLUSÕES

A análise dos dados e resultados obtidos, permitiram chegar às seguintes conclusões: Não foram observadas diferenças significativas quanto aos resultados dos soldadores, ainda assim, a experiência e qualificação dos profissionais para este tipo de reparo deve ser priorizada. A qualificação do procedimento de soldagem deve ser a base utilizada para realização dos reparos, sendo necessário a realização de testes e o conhecimento prévio dos procedimentos de execução pelos envolvidos na atividade. O teor de cromo na superfície do revestimento ficou dentro do resultado esperado para garantir a formação da camada protetora, ficando acima de 15%Cr em quase todas as amostras, demonstrando que a diluição foi adequada e que o *weld overlay* aplicado tenderá a cumprir a função de resistência à corrosão desejada nesta região do equipamento;

A espessura residual mínima adotada para reparo, acima de 3,1 mm, é válida e deve ser seguida visando a segurança deste tipo de equipamento, visto que os testes realizados em menores espessuras que esta, demonstraram diferenças significativas na microestrutura e conseqüentemente nas propriedades mecânicas do material; A microestrutura obtida no revestimento (*overlay*) e metal base (aço carbono) foi semelhante para as amostras novas e usadas,

indicando que a exposição às condições de serviço do equipamento não influenciou de forma significativa a estrutura destas regiões.

## REFERÊNCIAS

ASTM A210/A210M. Standard Specification for Seamless Medium-Carbon Steel Boiler and Superheater Tubes, ASTM International, 2012.

ASME HANDBOOK, Metals properties. First Edition, Mc Graw-Hill Book company, Inc, New York, 1954.

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

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.

HUPA, M. Recovery boiler chemical principles. Department of Chemical Engineering - Åbo Akademi University. Turku, Finland. TAPPI Kraft Recovery Course (2012).

HUPA, M. Recovery Boiler Chemical Principles, Kraft Recovery Boilers, Capítulo 2, Tappi Press, Atlanta, Georgia, USA (1997).

KEISSER J.R., SINGBEIL, D. L. Current Understanding Of Cracking Of Recovery Boiler Primary Air Port Composite Tubes, Oak Ridge, TN, USA, 2016.

MARQUES, P. V., MODENESI, P. J., BRACARENSE, A.Q. Soldagem- Fundamentos e Tecnologia. 3ª edição, Belo Horizonte, 2011.

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

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.

PENA, C. P. Reposição de espessura por soldagem em tubos de caldeira de recuperação e seu efeito nas propriedades mecânicas, metalúrgicas e de corrosão. Belo horizonte, UFMG, 2016.

SHARP, W. B. L. S. Corrosion and Cracking in Recovery Boilers, Sharp Consultant, Maryland, USA, 2007.

VAKKILAINEN, E. K. Kraft Recovery Boilers - High dry solids firing - Helsinki, 2006.