



AVALIAÇÃO DA CONFIABILIDADE DA RECOMPOSIÇÃO DE ESPESSURA
POR *WELD OVERLAY* EM TUBOS DA FORNALHA DE CALDEIRAS DE
RECUPERAÇÃO QUÍMICA EM INDÚSTRIAS DE PAPEL E CELULOSE

Bruno Ricardo de Jesus Passos

Salvador, 2023



BRUNO RICARDO DE JESUS PASSOS

AVALIAÇÃO DA CONFIABILIDADE DA RECOMPOSIÇÃO DE ESPESSURA
POR *WELD OVERLAY* EM TUBOS DA FORNALHA DE CALDEIRAS DE
RECUPERAÇÃO QUÍMICA EM INDÚSTRIAS DE PAPEL E CELULOSE

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de
Pós-Graduação em Engenharia de Materiais do IFBA,
como parte integrante dos requisitos para a obtenção do
título de Mestre em Engenharia de Materiais.

Orientadora: Prof^a. Dr^a Cláudia Teresa Teles Farias.

Linha de Pesquisa: Caracterização e Integridade
Estrutural.

Salvador, 2023

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELO SISTEMA DE BIBLIOTECAS DO IFBA, COM OS
DADOS FORNECIDOS PELO(A) AUTOR(A)

P289a Passos, Bruno Ricardo de Jesus

Avaliação da confiabilidade da recomposição de espessura por *Weld Overlay* em tubos da fornalha de caldeiras de recuperação química em indústria de papel e celulose / Bruno Ricardo de Jesus Passos; orientadora Cláudia Teresa Teles Farias -- Salvador : IFBA, 2023.

108 p.

Dissertação (Programa de Pós-graduação em Engenharia de Materiais - PPGEM) -- Instituto Federal da Bahia, 2023.

1. Caldeira de recuperação. 2. *Weld overlay*. 3. Confiabilidade. 4. Recomposição de espessura. I. Farias, Cláudia Teresa Teles, orient. II. TÍTULO.

CDU 621.791

INSTITUTO FEDERAL DA BAHIA
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA, PÓS-GRADUAÇÃO E INOVAÇÃO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE MATERIAIS - PPGEM

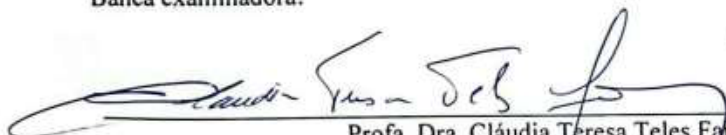
**Avaliação da Confiabilidade da Recomposição de Espessura por Weld Overlay em
Tubos de Fornalha de Caldeiras de Recuperação Química em Indústria de Papel e
Celulose**

Bruno Ricardo de Jesus Passos

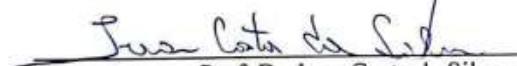
Produto (s) Gerado (s): Relatório Técnico

Orientadora: Profa. Dra. Cláudia Teresa Teles Farias

Banca examinadora:



Profa. Dra. Cláudia Teresa Teles Farias – Orientadora



Prof. Dr. Carlos Otávio Damas Martins – Examinador PPGEM IFBA
Documento assinado digitalmente
gov.br CARLOS OTAVIO DAMAS MARTINS
Data: 06/07/2023 21:40:14-0300
Verifique em <https://validar.itb.gov.br>

Prof. Dr. Carlos Otávio Damas Martins — Examinador Externo UFS

Documento assinado digitalmente
gov.br CARLOS AUGUSTO DE SOUZA
Data: 06/07/2023 21:39:35-0300
Verifique em <https://validar.itb.gov.br>

Dr. Carlos Augusto de Souza — Examinador Externo TRANSPETRO

Trabalho de Conclusão de Curso aprovado pela banca examinadora em 06/07/2023

A memória de meu pai

Edvaldo Rocha Passos

À minha família:

Minha gratidão, meu amor.

*A minha amada esposa Aline Passos
e as minhas filhas, Heloísa e Safira:
minha fortaleza.*

Agradecimentos

A **Deus** pela oportunidade de dar mais um passo importante na minha vida.

A professora **Cláudia Teresa Teles Farias** pela orientação, apoio e disponibilidade no auxílio dos trabalhos e na resolução dos mais diversos problemas.

Aos amigos **Alexandre Brito, Felipe Miranda, José Luiz Paes, Paulo Moura e Ricardo José Rocha**, pelo apoio, sugestões e ensinamentos desde o início do mestrado.

Aos colegas **Enoque Linhares e Guilherme Ribas**, pela disponibilidade nas discussões de temas técnicos.

Ao **Labind, GPEND e PPGEM** pela oportunidade e fomento de uma pós-graduação tão importante para os profissionais da indústria.

Ao **IFBA**, pela oportunidade de mudança de vida desde que ingressei no ensino médio/técnico, passando pela graduação e agora com o Mestrado.

A todos os amigos que estiveram ao meu lado, mesmo à distância.

RESUMO

A caldeira de recuperação química é um dos equipamentos mais importantes na indústria de celulose, sendo ela quem geralmente limita o tempo de operação da unidade. Nestas caldeiras, o licor preto é utilizado como combustível para queima, diferente de outros combustíveis convencionais. A queima deste tipo de combustível, produz um material em fusão, conhecido como *smelt*, o qual será novamente processado para reaproveitamento dos compostos e retorno ao sistema, garantindo assim o ciclo de recuperação química. Este equipamento, possui um alto risco de explosão pela mudança de estado físico da água em caso de contato com o *smelt*, em vazamentos causados por danos nos tubos da fornalha. Processos de soldagem são frequentemente utilizados no reparo desses tubos. Porém, este método de reparo pode provocar alterações nas propriedades mecânicas e metalúrgicas dos materiais de base. Essas alterações, 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 para a continuidade operacional com os tubos reparados, e quais os riscos que esses reparos possam trazer à operação da caldeira de recuperação química em caso de mal executados. Para tal, amostras de tubos novos e tubos que operaram em caldeira de recuperação química foram avaliados. Foram inseridos pontos com desgaste e posterior recomposição do *overlay*, a fim de simular os procedimentos 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. Como resultado, foi observado que os reparos realizados acima dos limites de espessuras residuais mínimas, atenderam aos requisitos de qualidade esperados, podendo ser utilizados com segurança, desde que sejam realizados e acompanhados por profissionais experientes e qualificados para tal atividade.

Palavras-chave: caldeira de recuperação, *weld overlay*, confiabilidade, recomposição de espessura

ABSTRACT

The chemical recovery boiler is one of the most important equipment in the pulp industry, and it is the one that usually limits the unit's operating time. In these boilers, black liquor is used as fuel for burning, unlike other conventional fuels. The burning of this type of fuel produces a melting material, known as Smelt, which will be processed again for reuse of the compounds and return to the system, thus ensuring the chemical recovery cycle. This equipment has a high risk of explosion by changing the physical state of the water in case of contact with the Smelt, in leaks caused by damage to the pipes of the furnace. Welding processes are often used in the repair of these pipes. However, this method of repair can cause changes in the mechanical and metallurgical properties of the base materials. These changes, 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 gather the basic information necessary for reliability for operational continuity with the repaired tubes, and what are the risks that these repairs can bring to the operation of the chemical recovery boiler in case of poorly executed. For this, samples of new tubes and tubes that operated in chemical recovery boiler were evaluated. Points with wear and subsequent recomposition of the overlay were inserted in order to simulate the procedures performed during the equipment maintenance stops. 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. As a result, it was observed that the repairs performed above the limits of minimum residual thicknesses, met the expected quality requirements, and can be used safely, provided that they are performed and accompanied by experienced and qualified professionals for such activity.

Keywords: recovery boiler, weld overlay, reliability, thickness recomposition

Lista de Figuras

Figura 2.1- Exemplo de distribuição mássica típica das principais correntes no processo de polpação. Fonte: GUIMARÃES, 2013.

Figura 2.2- Diagrama esquemático simplificado da polpação *kraft*. Fonte: GUIMARÃES, 2013.

Figura 2.3- Diagrama esquemático dos processos ocorridos na parte baixa da fornalha. Fonte: Adaptada de VAKKILAINEN, 2007.

Figura 2.4- Reação água-smelt e outras reações de grande liberação de energia como explosivos e sódio em água. Fonte: DECAIGNY, 2013, Apud PENA, 2016.

Figura 2.5- Registro de explosões em caldeiras de recuperação ao longo dos anos em indústrias de papel e celulose da América do Norte. Fonte: Adaptada de BLRBAC, 2021.

Figura 2.6- Tubos pinados da fornalha de uma caldeira de recuperação química. Fonte: ISQ BRASIL, 2014, *Apud* Pena, 2016.

Figura 2.7- Diagrama da formação da camada espessa de smelt solidificado mantida sobre os tubos com pinagem protetora. Fonte: PAOLIELLO et al. 2005.

Figura 2.8- Detalhe de aberturas de ar primário com tubos compostos. Fonte: FERREIRA, 2012.

Figura 2.9- Detalhe de tubos com proteção do tipo *weld overlay* na região da fornalha baixa evidenciando as aberturas de ar primário (superior) e abertura de bica de *smelt* (inferior). Fonte: própria.

Figura 2.10- Detalhe de tubos com *weld overlay* após ensaio de líquido penetrante, apresentando desgaste localizado, na região da fornalha. Fonte: própria.

Figura 2.11- Detalhe de tubos com *weld overlay* após ensaio de líquido penetrante, apresentando descontinuidade localizada (trincas), na região da fornalha. Fonte: própria.

Figura 2.12- Efeito do teor de cromo na perda de massa de tubos metálicos e materiais revestidos com *overlay*. Fonte: FARIA, 2012.

Figura 2.13- Exemplo de trinca de fadiga. Fonte: API-571, 2020.

Figura 3.1- Esquema geral dos procedimentos experimentais. Fonte: Própria

Figura 3.2- Identificação dos tubos novos, vista da geratriz não revestida. Fonte: Própria

Figura 3.3- Exemplo dos tubos usados 6, 7 e 8, vista da geratriz não revestida. Fonte: Própria

Figura 4.1- 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.

Figura 4.2- Detalhe das amostras dos tubos usados, 06, 07 e 08. Amostras do tubo 07 e 06 danificadas durante o preparo para a recomposição do *weld overlay*. Foi adicionado o ponto D no tubo 07 (amostra 7D).

Figura 4.3- Detalhe da perda de espessura uniforme ocorrida do lado água (tubos 07 e 08).

Figura 4.4- Imagem do tubo 09, região que foi utilizada para remoção da amostra de referência, para o tubo usado sem reparo de campo.

Figura 4.5- Detalhe da marcação e identificação para corte das regiões com recomposição por *weld overlay*.

Figura 4.6- Detalhe da região de interesse a ser cortada para embutimento.

Figura 4.7- Vista do trecho em que foram realizados os reparos, indicando a região a ser analisada e amostra cortada para embutimento.

Figura 4.8- Macrografia contendo a região do metal base (A), zona de fusão (B) e revestimento *overlay* (C). Ataque Nital 3%. Corte transversal.

Figura 4.9- Macrografia da amostra 1B. Ataque Nital 3%. Corte transversal

Figura 4.10- Macrografia da amostra 2A; Ataque Nital 3%. Corte transversal.

Figura 4.11- Macrografia da amostra 3C; Ataque Nital 3%. Corte transversal.

Figura 4.12- Macrografia da amostra 4C; Ataque Nital 3%. Corte transversal.

Figura 4.13- Macrografia da amostra 5B; Ataque Nital 3%. Corte transversal.

Figura 4.14- Macrografia da amostra 7D; Ataque Nital 3%. Corte transversal.

Figura 4.15- Macrografia da amostra 8A; Ataque Nital 3%. Corte transversal.

Figura 4.16- Macrografia da amostra 9A; Ataque Nital 3%. Corte transversal

Figura 4.17- 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 4.18- Figura 4.18- 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 4.19- 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 4.20- 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 4.21- 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 4.22- 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 4.23- 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 4.24- 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.

Figura 4.25- 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 4.26- Figura 4.26- 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 4.27- 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 4.28- 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 4.29- 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 descontinuidades; Ataque Nital 2%. Corte transversal. 40X e 400X respectivamente.

Figura 4.30- 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 4.31- 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 4.32- 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.

Figura 4.33- Exemplo de morfologia do aço, revelando as regiões da microestrutura perlítica em matriz ferrítica, após revelação com Nital 2% e ampliação 400x. Amostra 9A.

Figura 4.34- 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 4.35- 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 4.36- 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 4.37- 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 4.38- 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 4.39- 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 4.40- 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 4.41- 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.

Figura 4.42- Tubo 01- Perfil de dureza encontrado

Figura 4.43- Tubo 02- Perfil de dureza encontrado.

Figura 4.44- Tubo 03- Perfil de dureza encontrado.

Figura 4.45- Tubo 04- Perfil de dureza encontrado

Figura 4.46- Tubo 05- Perfil de dureza encontrado.

Figura 4.47- Tubo 07- Perfil de dureza encontrado.

Figura 4.48- Tubo 08- Perfil de dureza encontrado.

Figura 4.49- Tubo 09- Perfil de dureza encontrado.

Lista de Tabelas

Tabela 1.1- Registro de vazamentos reportados em caldeiras de recuperação em indústrias de papel e celulose da América do Norte, adaptada de BLRBAC, 2021.

Tabela 3.1- Características gerais especificadas dos tubos de aço baixo carbono sem costura e revestidos com *overlay* em aço inoxidável ferrítico com 18% de Cr.

Tabela 3.2- Identificação das amostras de tubos.

Tabela 3.3- Características dos eletrodos revestidos (Fonte: manual do fabricante).

Tabela 4.1- Controle de espessura residual do aço carbono após desbaste da superfície revestida com *weld overlay*.

Tabela 4.2- Teor de Cromo na superfície do metal de solda depositado (*weld overlay*).

Tabela 4.3- Espessura aproximada do metal de base em aço carbono após recomposição do revestimento (NA=Não aplicável, reparo não realizado).

Tabela 4.4- Resultado das medidas do ensaio de dureza Vickers do Tubo 01:

Tabela 4.5- Resultado das medidas do ensaio de dureza Vickers do Tubo 02.

Tabela 4.6- Resultado das medidas do ensaio de dureza Vickers da Tubo 03.

Tabela 4.7- Resultado das medidas do ensaio de dureza Vickers da Tubo 04.

Tabela 4.8- Resultado das medidas do ensaio de dureza Vickers da Tubo 05.

Tabela 4.9- Resultado das medidas do ensaio de dureza Vickers do Tubo 07.

Tabela 4.10- Resultado das medidas do ensaio de dureza Vickers do Tubo 08.

Tabela 4.11- Resultado das medidas do ensaio de dureza Vickers do Tubo 09.

SUMÁRIO

Capítulo 1 - Introdução.....	19
1.0 - Objetivo geral.....	21
1.1 - Objetivo específicos.....	21
1.2 - Apresentação.....	21
Capítulo 2 - Revisão Bibliográfica.....	23
2.0. Caldeira de recuperação química.....	23
2.1. Tubos da Fornalha.....	29
2.2. <i>Weld overlay</i> em aços inoxidáveis ferríticos e formação de fase sigma.....	36
2.3. Processos de degradação nos tubos das paredes de água das fornalhas de caldeiras de recuperação química.....	40
2.3.1 Corrosão generalizada ou localizada no lado dos gases.....	40
2.3.2 Trincas de fadiga térmica.....	41
2.3.3 Corrosão do lado da água.....	43
2.4. Processos de soldagem.....	45
2.5. A importância do PLH.....	50
Capítulo 3 - Materiais e Metodologia.....	51

3.0. Metal base e amostras.....	51
3.1 Consumível de soldagem.....	54
3.2- Preparo das amostras.....	55
3.2.1- Desbaste.....	55
3.2.2- Medição de espessura.....	55
3.2.3- Recomposição da espessura com <i>overlay</i>	55
3.2.4 Análise de liga da superfície do revestimento.....	56
3.3 Metalografia.....	56
3.4 Microscopia Óptica.....	57
3.5- Ensaio de dureza.....	58
Capítulo 4 - Resultados e Discussões.....	59
4.0. Remoção do revestimento e medição espessura residual.....	59
4.1. Recomposição do revestimento <i>weld overlay</i>	61
4.2. Análise química da superfície do revestimento ferrítico.....	62
4.3. Análise metalográfica.....	63
4.3.1 Caracterização Macroscópica.....	65
4.3.2- Caracterização Microestrutural.....	70
4.3.2.1. Revestimento (<i>overlay</i>).....	70
4.3.2.2. Microscopia da zona de fusão e ZTA.....	75
4.3.2.3. Microscopia do metal base (aço carbono)	79

4.4. Medição de dureza Vickers.....	85
Capítulo 5 - Conclusões.....	90
Capítulo 6 - Sugestões para trabalhos futuros.....	92
Referências Bibliográficas.....	93
Anexos.....	97
Anexo A- Registro Fotográfico complementar.....	98
Anexo B- Procedimento de reparo.....	103
Anexo C- Exemplo de memorial de cálculo de espessura mínima para os tubos.....	108

Capítulo 1 - Introdução

Um dos equipamentos mais importante 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 (PENA, 2016).

Nesse tipo de caldeira, o licor preto é utilizado como combustível, o qual, após queima, produz um material em fusão, conhecido como *smelt*, o qual será novamente processado para reaproveitamento dos compostos e retorno ao sistema, garantindo assim o ciclo de recuperação química (VAKKILAINEN, 2006).

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 descontinuidades 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, sendo assim, reconhecidos por vários códigos e normas de construção e reparo.

Porém, a soldagem pode provocar alterações nas propriedades mecânicas e metalúrgicas dos materiais de base. Essas alterações, 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.

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 da caldeira.

A motivação desta pesquisa, se justifica devido a necessidade de uma abordagem mais ampla, em relação a forma de avaliação e reparo dos tubos por *weld overlay* adotadas em campo atualmente. Esta, apresenta dificuldade devido aos tempos cada vez mais reduzidos de paradas de manutenção, o que impacta na tomada de decisões quanto a tratativa dos danos observados.

Além disso, geralmente, existe dificuldade de acoplamento em algumas imperfeições na superfície que dificultam a medição exata no primeiro momento, por não permitir o acoplamento adequado, necessário ao cabeçote de ultrassom. Por esse motivo, em muitos momentos, ocorre a necessidade do desbaste localizado na tentativa de regularizar a superfície do metal, para então permitir o acoplamento correto do aparelho e posterior definição da realização do reparo.

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 método desenvolvido nesta pesquisa, visa justamente avaliar a confiabilidade da metodologia adotada atualmente, no reparo de campo aplicado aos tubos fabricados com *weld overlay*, utilizados em caldeiras de recuperação química.

Para tal, foi analisada a metalurgia e propriedade mecânica de dureza do material através de ensaios específicos, os quais não são possíveis durante as paradas de manutenção programada, no intuito de demonstrar os parâmetros de segurança necessários para a aplicabilidade do mesmo. A análise também pode servir de base para justificar a escolha pelo reparo ao invés da substituição de trechos, com segurança, levando a uma economia de tempo e dinheiro durante as intervenções de manutenção.

1.0. Objetivo geral

Este trabalho visa 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 e propriedade mecânica de dureza do material através de ensaios específicos, os quais não são realizados nas intervenções de campo.

1.1. Objetivos específicos

Como objetivos específicos têm-se:

- Realizar uma abordagem técnico-científica dos procedimentos de inspeção e reparo de tubos, utilizados em caldeiras de recuperação química;
- Reforçar a importância da utilização de mão de obra qualificada para a execução da soldagem, visando definir os procedimentos e treinamento adequado dos soldadores antes das paradas de manutenção;
- Abordar as metodologias de avaliação e análise quanto a condição do tubo com descontinuidade/defeito, e, se este poderá ser reparado ou deverá ser trocado.

1.2. Apresentação

No capítulo 2, é apresentada uma revisão bibliográfica, necessária ao entendimento da metodologia desenvolvida nesta pesquisa, explicando de forma breve o funcionamento do equipamento, bem como algumas das suas especificidades, em comparação às outras caldeiras convencionais. Também, serão adicionadas informações relativas aos materiais e meios de proteção mais utilizados, alguns mecanismos de danos possíveis, processos de soldagem geralmente aplicados e os métodos de detecção e avaliação das descontinuidades/defeitos presentes nos tubos.

No capítulo 3, será apresentada uma metodologia para avaliar se o tubo poderá ser reparado ou deverá ser trocado. Para tal, amostras de tubos novos e de outros que operaram em caldeiras de recuperação química foram utilizadas. Foram inseridos pontos com desgaste

e posterior recomposição do revestimento, a fim de simular os procedimentos 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 e análise de liga na região reparada com solda para recomposição do revestimento.

No capítulo 4, apresentam-se os resultados e as discussões, mostrando a confecção dos corpos de prova e realizando os ensaios propostos. Além disso, são apresentadas discussões e análise dos resultados encontrados.

No capítulo 5, apresentam-se as conclusões obtidas, e, ratifica a confiabilidade e aplicabilidade futura para o método apresentado neste trabalho

No capítulo 6, apresentam-se sugestões para trabalhos futuros relacionados ao tema.

Capítulo 2 - Revisão Bibliográfica

2.0. Caldeira de recuperação química

As caldeiras de recuperação química são exclusivas do setor de papel e celulose, em uma função combinada de gerador de vapor e reator químico. 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. É responsável por produzir grande parte da energia da planta de celulose funcionando assim como uma caldeira de vapor, além de recuperar os produtos químicos inorgânicos utilizados no processo de produção e de reduzir os efluentes com potencial poluente, sendo o local onde as reações de recuperação ocorrem, fazendo assim 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).

A recuperação química nas fábricas de celulose é um processo de ciclo fechado, e a finalidade principal é a recuperação do máximo possível de químicos inorgânicos carregados no processo e ao mesmo tempo utilizar a energia do material orgânico, principalmente a lignina, no licor residual. Este licor (utilizado como combustível de queima para consequente geração de vapor pelo equipamento), é constituído por uma mistura de compostos orgânicos oriundos da madeira e compostos inorgânicos originários dos produtos químicos utilizados no cozimento ou das cinzas recirculadas da própria caldeira de recuperação, conforme exemplificado nas Figuras 2.1 e 2.2 (GUIMARÃES, 2013).

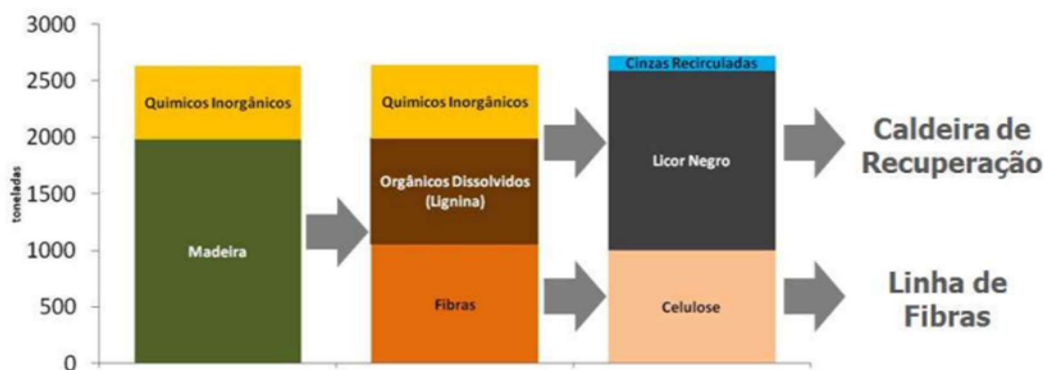


Figura 2.1- Exemplo de distribuição mássica típica das principais correntes no processo de polpação. Fonte: GUIMARÃES, 2013.



Figura 2.2- Diagrama esquemático simplificado da polpação *kraft*. Fonte: GUIMARÃES, 2013.

As paredes da caldeira de recuperação são compostas por tubos em todos os lados, nos quais, internamente passa a água (caldeiras aquatubulares) que será utilizada para geração de vapor, através da absorção do calor da queima do licor preto na parte inferior do equipamento, chamada de fornalha baixa. Externamente, esses tubos estão em contato direto com o *smelt* nesta região (fornalha baixa).

O *smelt* é o produto resultante da combustão do licor preto, sendo uma mistura de sais fundidos (material inorgânico), constituído principalmente de Na_2CO_3 , Na_2S e pequena quantidade de Na_2SO_4 (HUPA, 1997). Isto, em elevadas temperaturas, em torno de 800°C a 850°C e, no decorrer do tempo, geralmente tendem a provocar corrosão e erosão nas superfícies em contato por ser bastante viscoso (VAKKILAINEN, 2006).

Ainda na parte inferior da caldeira (fornalha), o licor preto com cerca de 20% de água é continuamente injetado através de bicos pulverizadores e queimado, gerando o *smelt* que se deposita no fundo do piso (GUIMARÃES, 2013).

O licor preto é pulverizado para a fornalha da caldeira de recuperação através de pulverizadores de licor fixos, distribuídos pelas quatro paredes da fornalha. Os bicos de pulverização formam gotículas que caem para o fundo da fornalha e formam um leito de combustão. A queima ocorre em estágios sobrepostos, de maneira similar a outros combustíveis sólidos e líquidos.

Os quatro principais estágios são a secagem, a desvolatilização (pirólise), a queima do carbono, e as reações do *smelt*, conforme visto na Figura 2.3 (VAKKILAINEN, 2007).

A parte orgânica do licor consiste em produtos degradados de lignina, polissacarídeos e alguns extrativos. Quando a temperatura das gotículas se aproxima de 200°C esses produtos começam a sofrer degradação térmica, liberando CO₂, CO, H₂O, H₂S, NO, NH₃, hidrocarbonetos leves, mercaptanas e outros compostos organossulfurados. Esse processo é chamado desvolatilização. O sólido restante contém material orgânico não volátil, principalmente carbono, juntamente com a maioria do material inorgânico (GUIMARÃES, 2013).

Quando a etapa de desvolatilização é finalizada, parte do carbono presente inicialmente no licor se transforma em compostos voláteis. O sólido orgânico restante passa então à terceira etapa, juntamente com o material inorgânico, onde irá reagir com oxigênio, CO₂ e vapor d'água e se transformará principalmente em CO (monóxido de carbono). No processo, o sulfato reage com o carbono, o CO e o hidrogênio que é reduzido a sulfeto (PENA, 2016).

O fundido, “*smelt*”, é coletado no fundo da caldeira de recuperação e flui através das aberturas do fundido, pelas denominadas “bicas de *smelt*”, na qual escoam para o tanque de dissolução. O licor verde é formado quando o licor branco fraco (lavagem fraca) é adicionado ao fundido “*smelt*” no tanque de dissolução. O licor verde é bombeado para a planta de caustificação onde é convertida em licor branco para o processo de cozimento da pasta. O circuito é então fechado (GUIMARÃES, 2013).

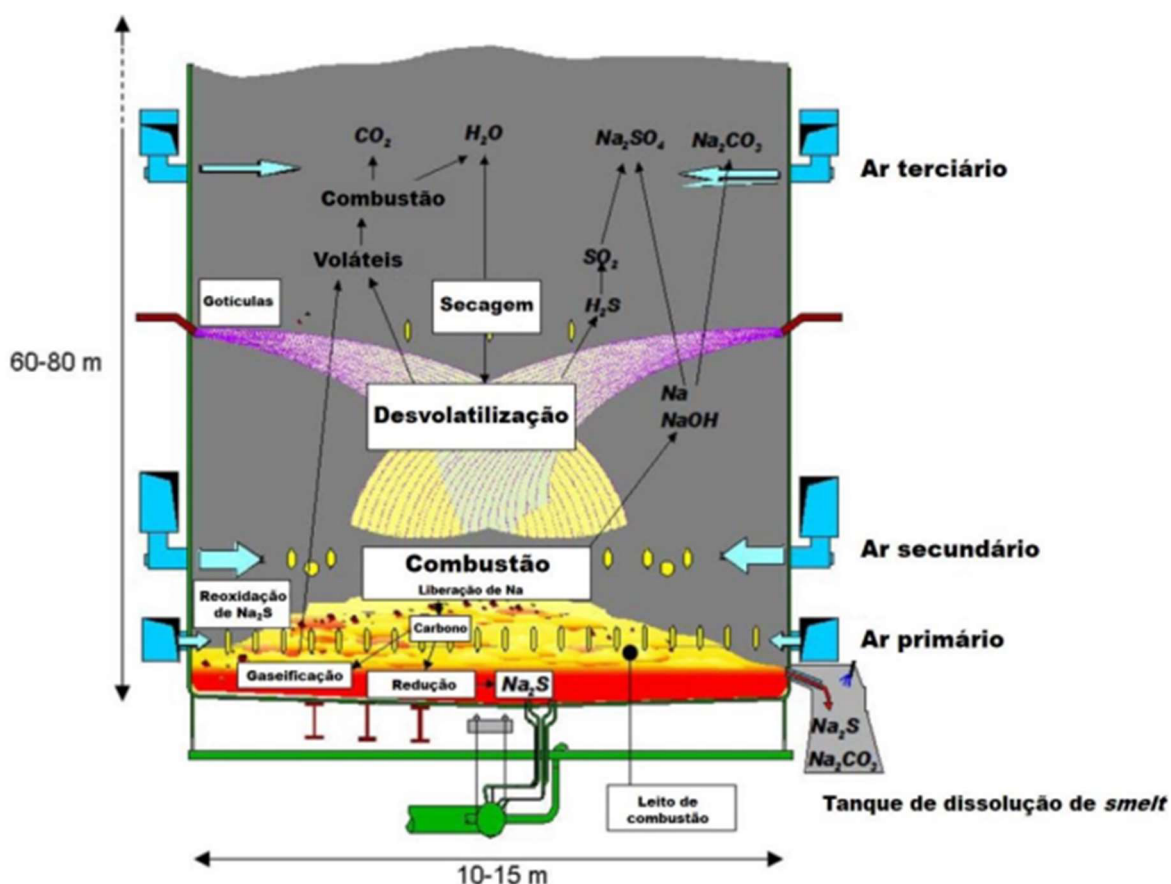


Figura 2.3- Diagrama esquemático dos processos ocorridos na parte baixa da fornalha. Fonte: Adaptada de VAKKILAINEN, 2007.

Em resumo, de uma forma geral, as duas funções principais da caldeira de recuperação são:

- Converter os compostos inorgânicos numa forma que permita a sua regeneração para o processo de produção;
- Queimar as matérias orgânicas no licor negro para gerar calor utilizado nas reações da fornalha, fusão da cinza, secagem do licor negro, ebulição da água, e vapor de sobreaquecimento.

As caldeiras possuem ainda sistemas de queima auxiliares a gás natural ou óleo combustível, utilizados durante a partida, parada ou em flutuações processuais da caldeira de recuperação.

Pelo fato de as 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* é um fenômeno puramente físico, de natureza não combustível, causada pela geração de vapor extremamente rápida que ocorre quando a água e o *smelt* entram em contato. Conforme a Figura 2.4, a expansão abrupta e às altas ondas de pressão de 1000 a 10000 kgf /m², (DECAIGNY, 2013), podem ser suficientes para deformar uma fornalha e os riscos de danos pessoais e fatalidades podem ser consideráveis.

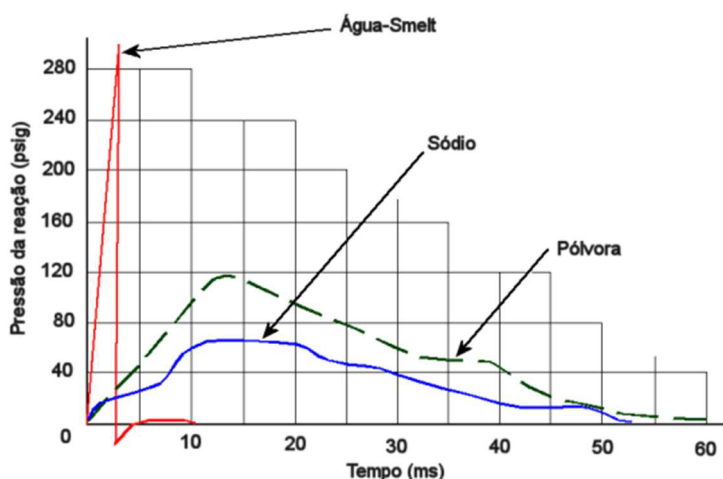


Figura 2.4- Reação água-smelt e outras reações de grande liberação de energia como explosivos e sódio em água. Fonte: DECAIGNY, 2013, Apud PENA, 2016.

A explosão água-*smelt* produz uma pressão muito mais elevada em um tempo muito menor do que as reações provocadas por explosivos (pólvora) e também pela reação entre sódio e água. Esse fenômeno pode ocorrer mesmo com quantidades pequenas de água e tempos de exposição muito curtos, (PAOLIELLO, 2007). Assim, é muito importante tomar medidas eficazes para minimizar a probabilidade de ocorrência de uma explosão de caldeira de recuperação.

A indústria tem feito grandes progressos na redução da frequência das explosões em caldeiras de recuperação, sendo estas muito mais seguras do que eram nas décadas de 60 e 70, por exemplo, conforme demonstrado na Figura 2.5 (BLRBAC, 2021).

A frequência de explosão era de aproximadamente quatro explosões por ano nas décadas de 1960 e 1970 e foi reduzindo até atingir na década passada uma média de 0,4 por ano. Ou seja, houve uma redução significativa nas explosões de caldeiras ao longo dos últimos anos e apenas 04 registros foram feitos entre 2012 e 2020, por exemplo. Conforme já mencionado, o principal tipo de explosão em uma caldeira de recuperação é do tipo água-*smelt* evidenciada na Figura 2.5 pela barra de cor vermelha (BLRBAC, 2021).

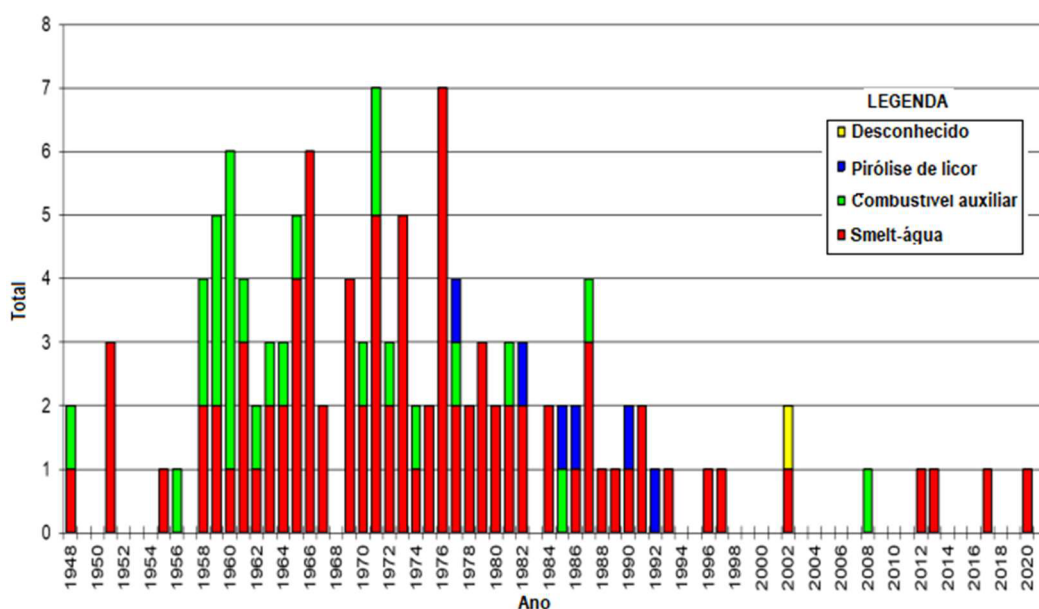


Figura 2.5- Registro de explosões em caldeiras de recuperação ao longo dos anos em indústrias de papel e celulose da América do Norte. Fonte: Adaptada de BLRBAC, 2021.

Em relação a quantidade de vazamentos considerados críticos, pela possibilidade do contato água-*smelt*, conforme reportado (BLRBAC, 2021), ocorreram 97 incidentes na região da fornalha baixa, entre os anos de 2004 e 2020, conforme a Tabela 1.1, sendo que destes, em 04 ocorreram explosão da caldeira.

Tabela 1.1 - Registro de vazamentos reportados em caldeiras de recuperação em indústrias de papel e celulose da América do Norte, adaptada de BLRBAC, 2021.

Localização	Total em 17,5 ano	Média/Ano
Economizador	416	23,8
Fornalha Alta	127	7,3
Superaquecedor	134	7,7
Fornalha Baixa	97	5,5
<i>Boiler Bank</i>	100	5,7
<i>Screen</i>	39	2,2
Bicas de <i>Smelt</i>	29	1,7

A prevenção de explosões água-*smelt* se baseia em manter os dois componentes separados, mas como o *smelt* faz parte do processo e está sempre presente, a prevenção gira em torno de manter a água em estado líquido fora da fornalha. Historicamente os vazamentos de água através dos tubos são os maiores responsáveis por grande parte das explosões água-*smelt* em caldeiras. Sendo assim, existe um consenso de que a integridade mecânica dos mesmos é o fator mais importante na segurança da caldeira (PENA, 2016)

2.1. Tubos da Fornalha

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 estende-se 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*.

A utilização de sistema de tubos pinados, ou pinagem, surgiu como uma solução inicial e durante muitos anos foi uma tendência predominante na indústria como solução para redução do número de danos e de proteção de fornalhas. Ainda são encontrados, atualmente, em um número expressivo de unidades de recuperação em serviço, no caso aquelas mais antigas. A Figura 2.6 mostra um painel de tubos contendo estes pinos. Nas fornalhas de tubos pinados, os pinos favorecem a formação e a fixação de uma camada protetora de *smelt* solidificado sobre os tubos que compõem as paredes, interpondo assim uma barreira contra a incidência direta do licor preto e *smelt* a alta temperatura, cujo contato promoveria a corrosão rápida dos tubos de aço carbono desta zona da caldeira, Figura 2.7.



Figura 2.6 - Tubos pinados da fornalha de uma caldeira de recuperação química. Fonte: ISQ BRASIL, 2014, Apud PENA, 2016.

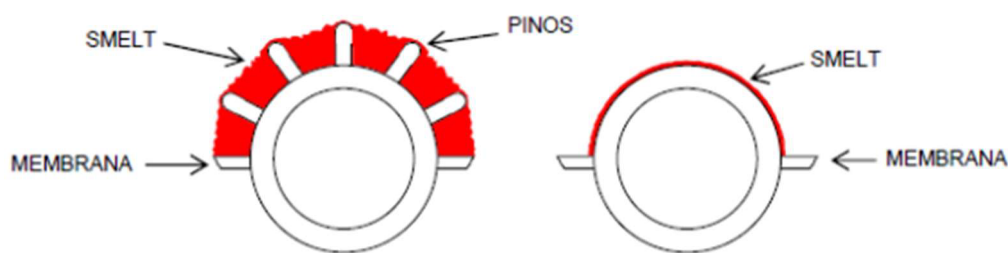


Figura 2.7 – Diagrama da formação da camada espessa de smelt solidificado mantida sobre os tubos com pinagem protetora. Fonte: PAOLIELLO et al. 2005.

Porém, depois de decorrido um certo tempo de campanha operacional, os pinos se desgastam naturalmente por erosão/corrosão e vão tomando formas arredondadas, diminuindo seu tamanho, em comparação aos pinos mais novos. O projeto e a carga da caldeira, assim como as outras variáveis de processo irão definir a sua durabilidade. A temperatura da superfície dos tubos da fornalha durante a operação da caldeira estará diretamente relacionada à camada “isolante” de *smelt* solidificado que se forma sobre eles. A espessura desta camada, por sua vez, é definida pelo comprimento dos pinos, seu diâmetro e o seu padrão de “densidade”, ou seja, a quantidade de pinos aplicada por unidade de área de tubo, na caldeira em questão. Assim, operar uma unidade de recuperação com pinos muito desgastados irá resultar em temperaturas elevadas na superfície dos tubos da fornalha, acelerando o seu desgaste corrosivo. Dependendo das circunstâncias, isso poderá conduzir à falha de tubos, inclusive com consequências catastróficas (PAOLIELLO et al., 2005).

Além do processo de desgaste mencionado anteriormente, um outro ponto negativo deste tipo de solução com tubos pinados, deve-se a dificuldade de controle de espessuras destes, devido à existência dos pinos, que impossibilitam o acesso das sondas de ultrassom convencionais a sua superfície para a realização da medição (FERREIRA, 2012).

A corrosão nas paredes de tubos na fornalha da caldeira é devida principalmente à elevada concentração de sulfeto de hidrogênio no gás de combustão (BAUER e LUNDBERG, 1997). Este mecanismo é definido como sulfetação e é influenciado pela presença de vapores de enxofre e gases como o H_2S , (TRAN et al., 1988). A corrosão é

menor quando o tubo está coberto por uma espessa camada de *smelt*, pois este age como uma camada protetora.

A corrosão em alta temperatura na presença de sais fundidos é outro mecanismo que pode ocorrer nos tubos da caldeira. Os sais responsáveis pela corrosão são formados durante o processo de queima por uma combinação complexa entre as impurezas do combustível e as substâncias agressivas do ar, sendo o principal sal o sulfato de sódio, Na_2SO_4 . Nesse caso, o sal fundido é o próprio *smelt* proveniente da combustão que se deposita nos tubos e o ataque corrosivo nesse caso é muito mais agressivo quando comparado com a oxidação seca (sem deposição de material), (TRINDADE, 2013).

Segundo MEYER (2012), o efeito da corrosão em alta temperatura por sais fundidos não é acentuado nos tubos da fornalha de uma caldeira de recuperação. Isso porque, o fato de passar água internamente aos tubos facilita a solidificação do *smelt*, formando uma superfície protetora sobre o tubo e evitando a rápida corrosão do metal pelos sais fundidos.

Conforme já mencionado, os tubos de aço carbono pinados favorecem a formação de uma camada solidificada mais espessa e o *smelt* solidificado é pouco corrosivo, enquanto ele permanece sólido na superfície do tubo. No entanto, uma vez que esta camada de *smelt* sofre perturbações ou instabilidades localizadas, é possível o contato direto do *smelt* líquido com os tubos, provocando um superaquecimento do mesmo e falhas graves e prematuras podem ocorrer (LAI, 2007).

A corrosão em tubos na região da fornalha baixa está particularmente relacionada com a formação de sulfetos de ferro (FeS) a alta temperatura, em atmosfera redutora, dos tubos das paredes de água, normalmente em aço carbono ou com um revestimento exterior em aço inoxidável. A taxa de corrosão de um determinado material depende em grande parte do nível de estabilização dos óxidos superficiais, que servem para conter o avanço da corrosão, bem como da temperatura. Neste caso, os óxidos são em grande parte substituídos por sulfetos, que formam uma camada porosa na superfície metálica, que não a protege de continuar a reagir com os gases de combustão, resultando na sua permanente desagregação e formação de FeS , promovendo assim o avanço da corrosão e a consequente perda de espessura.

A fim de evitar este fenômeno foram adotadas várias soluções tendo em vista evitar o avanço da corrosão nestes tubos, entre estas a utilização de tubos compostos ou

com um revestimento através de deposição do tipo *weld overlay* até determinada altura da fornalha, visando ter um material mais resistente a degradação nesta região que é vista como a mais crítica em caso de vazamento (FERREIRA, 2012)

Pelas razões anteriormente descritas, nos anos 70, as fornalhas com tubos pinados começaram a ser substituídas por fornalhas com tubos compostos, Figura 2.8, os quais possuem um tubo interno em aço carbono, para resistir às solicitações mecânicas e uma coroa externa, com cerca de 1,5 mm de espessura, em aço inoxidável, inicialmente era um inoxidável austenítico tipo o *AISI 304* (18Cr-10Ni) ou inoxidável ferrítico com 18%Cr para resistir à corrosão. Esta solução foi amplamente adotada pelos principais fabricantes de caldeiras de recuperação química, existindo atualmente uma alteração do material da coroa exterior do *AISI 304* para o *SANICRO38* (19,5-23,5% Cr – 38,0-46,0% Ni) ou do aço inoxidável ferrítico de 18% para 25% de Cr nos projetos novos. A experiência na utilização destes materiais tem vindo demonstrar um melhor comportamento relativamente aos anteriores, sobretudo no que diz respeito a menor susceptibilidade para a nucleação de trincas por fadiga térmica ou de fenômenos de corrosão sob tensão, (SHARP, 2007).



Figura 2.8 – Detalhe de aberturas de ar primário com tubos compostos. Fonte: FERREIRA, 2012.

Uma alternativa aos tubos 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 aplicados também após substituições de trechos e reparos localizados (KEISER, 2016).

A soldagem de *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).

Nas Figuras 2.9 a 2.11, podem ser visualizados tubos com proteção do tipo *weld overlay* na região da fornalha baixa, inspecionados com aplicação da técnica de líquidos penetrantes.



Figura 2.9 – Detalhe de tubos com proteção do tipo *weld overlay* na região da fornalha baixa evidenciando as aberturas de ar primário (superior) e abertura de bica de *smelt* (inferior). Fonte: própria.

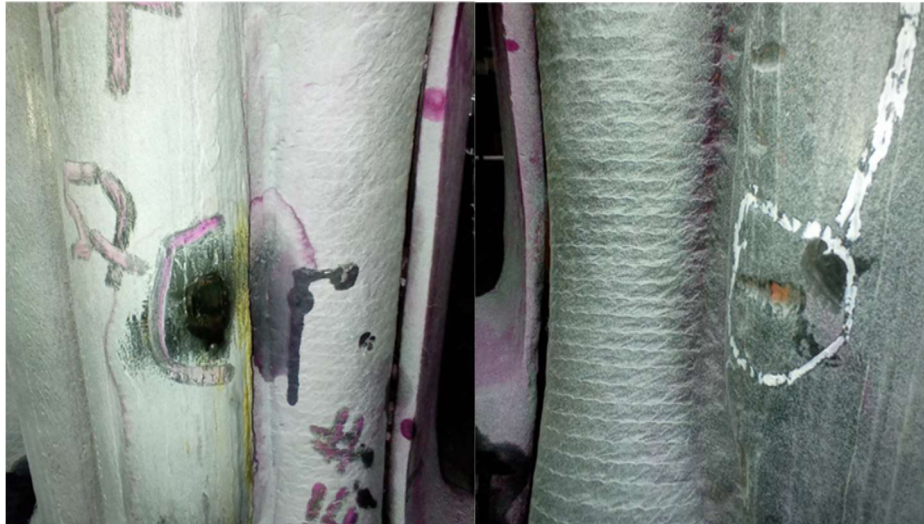


Figura 2.10 – Detalhe de tubos com *weld overlay* após ensaio de líquido penetrante, apresentando desgaste localizado, na região da fornalha. Fonte: própria.



Figura 2.11 – Detalhe de tubos com *weld overlay* após ensaio de líquido penetrante, apresentando descontinuidade localizada (trincas), na região da fornalha. Fonte: própria.

2.2. Weld overlay em aços inoxidáveis ferríticos e formação de fase sigma

Denominam-se, genericamente, de aços inoxidáveis, os aços que não “enferrujam”, mesmo pela exposição prolongada a uma atmosfera normal. Essa característica é conseguida pela adição de, pelo menos, 12% de Cr. O cromo é o elemento de liga básico dos aços inoxidáveis, cuja passivação é conseguida pela formação de uma película de óxidos e hidróxidos de cromo na superfície do metal, a qual é resistente, uniforme, tem excelente plasticidade, aderência, baixa porosidade, volatilidade e solubilidade praticamente nulas (TELLES, 2003).

O aço inoxidável ferrítico é um dos tipos de aço inoxidável geralmente usados em aplicações que exigem boa resistência a corrosão em trabalhos de alta temperatura, sendo magnético e contendo teor de 14 a 30% de cromo, porém devido a sua soldabilidade difícil, devido ao crescimento exagerado e irreversível dos grãos, que ocorre em temperaturas acima de 1150°C e que pode levar a severa fragilização na zona termicamente afetada pela solda, sendo este efeito mais grave para aços com teor de cromo superior a 17% Cr (TELLES, 2003).

Por isso geralmente não são utilizados como materiais de construção para estruturas soldadas, sendo muito utilizados como revestimentos, pois nesse caso, as soldas são não-estruturais. Utilizam-se também como revestimento de materiais de pequena espessura e, por isso, a maior dificuldade de soldar e a possível fragilização na região termicamente afetada não terá grande importância (TELLES, 2003).

Sendo assim, geralmente são utilizados como por exemplo em revestimentos de componentes de aço carbono, devido principalmente a vantagem de ter coeficiente de dilatação próximo a este (TELLES, 2003).

À temperatura ambiente, os aços inoxidáveis ferríticos são formados basicamente por uma matriz de ferrita alfa, isto é, uma solução sólida de Cr e outros elementos de liga em ferro, com estrutura cristalina cúbica de corpo centrado (CCC). O C e o N são elementos que estão presentes nesta fase na forma de precipitados, carbonetos e nitretos de cromo (KUBASCHEWSKI, 1982).

O processo de revestimento de solda de alto cromo é comumente usado em indústrias como petróleo e gás, geração de energia e processamento químico, onde o equipamento é exposto a ambientes hostis que podem causar corrosão, erosão e outros

tipos de desgaste. A sobreposição de alto cromo fornece uma camada protetora que pode aumentar significativamente a vida útil do equipamento e reduzir os custos de manutenção.

A sobreposição de componentes com revestimentos de alto cromo, como no caso do *weld overlay*, refere-se a um processo de soldagem em que uma camada de liga de alto cromo é aplicada na superfície de um metal de base usando uma técnica de soldagem adequada. A liga de alto cromo normalmente contém pelo menos 17% de cromo e é escolhida por sua excelente resistência à corrosão e ao desgaste em ambientes de alta temperatura (TELLES, 2003).

Este tipo de revestimento é utilizado por um dos fabricantes de caldeira de recuperação química para proteger os tubos da parede de água, que são em aço carbono sem costura, utilizados na região da fornalha baixa. Isto é necessário, por ser uma região muito mais agressiva do que o ambiente de outras caldeiras convencionais, principalmente devido à queima do leito carbonizado e ao fluxo de smelt, juntamente com a redução da atmosfera local (FARIA, 2012).

Este revestimento pode ser soldado nos tubos de forma manual, como geralmente ocorre nas soldas de campo, ou de forma semi-automática, como geralmente é feito na fabricação (FARIA, 2012).

O aço inoxidável ferrítico, também contém pequenas quantidades de outros elementos de liga, como o Nb, Ti e Al, para melhorar ainda mais as propriedades da liga ferrítica, quando com teores de 18% a 25% de Cr. Esses elementos de liga (Nb, Ti e Al) se combinam com o carbono, formando carbonetos para estabilizar a estrutura ferrítica do metal de solda do revestimento, e, são úteis para garantir a ductilidade porque contribuem para reduzir o tamanho dos grãos, entretanto, a taxa de corrosão é definida basicamente pelo teor de cromo como mostra a Figura 2.12, (FARIA, 2012).

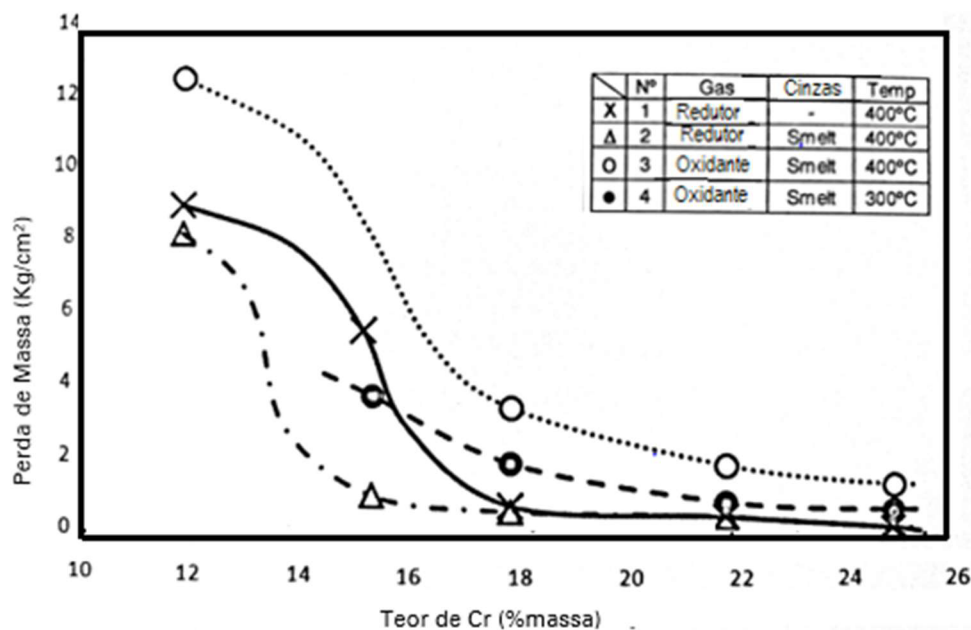


Figura 2.12 – Efeito do teor de cromo na perda de massa de tubos metálicos e materiais revestidos com *overlay*. Fonte: FARIA, 2012.

A técnica de soldagem por sobreposição de revestimento de aços inoxidáveis ferríticos é um processo de fabricação muito utilizado que requer: *know-how*, boas práticas de engenharia, controle de qualidade certificado, bem como a qualificação de procedimentos de soldagem e soldadores para obter a resistência a corrosão necessária. A seleção do metal de adição, seu acondicionamento, juntamente com os parâmetros operacionais de soldagem, tratamento térmico pós soldagem, bem como técnicos treinados são também exigidos para se obter uma soldagem de alta qualidade (FARIA, 2012).

Quanto aos cuidados no processo de soldagem, um dos mecanismos de danos que é relatado em literaturas quando da utilização de aços inoxidáveis ferríticos com 17% de cromo ou mais é a fragilização por fase sigma. Esta fase deletéria, altera o comportamento do material em relação às propriedades mecânicas, resistência à corrosão e soldabilidade (API-571, 2020).

Por se tratar de uma alteração metalúrgica, esse mecanismo não fica aparente e só pode ser confirmado através de exames metalográficos e testes de impacto em amostras submetidas a condições de trabalho específicas. Os danos devido a fragilização por fase

sigma aparecem em forma de trincas, particularmente em soldas ou em áreas de alta restrição (API-571, 2020).

A fase sigma é um composto intermetálico (ferro-cromo) formado em alguns aços inoxidáveis quando expostos determinado período de tempo em elevadas temperaturas, na faixa de 540°C a 925°C, sendo essa tendência maior, quanto maior for a percentagem de cromo no aço. Assim, o tempo de exposição em temperatura elevada é o fator principal que afeta a formação de fase sigma nestes aços. Além disso, a taxa de precipitação desse composto intermetálico aumenta com o teor de cromo e molibdênio contido na liga (API-571, 2020).

Aços inoxidáveis com teores de cromo entre 25% e 76% são mais susceptíveis a formação de fase sigma, e, que esta se forma mais rapidamente a partir da ferrita do que da austenita nos aços inoxidáveis, sendo assim, os aços inoxidáveis austeníticos menos susceptíveis ao mecanismo do que os ferríticos (PELICIONE, 2014).

O aço com fase sigma exhibe ligeiro aumento no limite de resistência e de dureza, porém, dependendo do grau de formação desse composto, este aumento pode ser considerável. A formação desta fase deletéria é acompanhada por redução na ductilidade e na resistência ao impacto, porém o que causa a fragilização é a perda de tenacidade do aço abaixo de 260°C (API-571, 2020).

Segundo alguns autores (HSIEH et al., 2012), é difícil prevenir a formação de fase sigma quando o teor de cromo é acima de 20%, em aços inoxidáveis, e que, a adição de elementos estabilizadores de ferrita (Cr, Si, Mo) no aço inoxidável leva rapidamente a formação de fase sigma. Afirmam ainda que a precipitação desse composto intermetálico leva a uma redução da resistência à corrosão intergranular, por pitting e por frestas.

Embora a formação da fase sigma seja lenta, o trabalho a frio aumenta consideravelmente a taxa de precipitação, e a fase sigma foi encontrada em componentes resfriados ao ar e fundidas em ligas com alto teor de cromo (VENKATRAMAM, 2013).

Felizmente uma liga pode ter essa formação desfeita em caso de tempos relativamente curtos de espera acima de 800°C ou 850°C, por cerca de uma hora por exemplo, seguida de resfriamento a ar (VENKATRAMAM, 2013).

2.3. Processos de degradação nos tubos das paredes de água das fornalhas de caldeiras de recuperação química

Apesar de não terem sido considerados, nesta dissertação, os efeitos das condições de funcionamento e ambientais a que os tubos das paredes de água das caldeiras de recuperação estão sujeitos durante suas campanhas, considera-se, porém, que seja realizada uma abordagem sobre a sua influência no comportamento do material quando em operação. É conveniente explicar que os ensaios laboratoriais realizados não levaram em conta a influência destas condições, designadamente quanto ao seu efeito sobre as propriedades mecânicas e metalúrgicas.

O fato de se pretender estudar isoladamente a influência dos reparos com solda de revestimento *overlay* na propriedade mecânica de dureza e propriedades metalúrgicas do material de base, é a principal razão para não ter sido contemplada a influência direta das condições ambientais, assim, considera-se que estes tubos não tenham sido afetados por qualquer fenômeno de degradação interna de sua microestrutura. Entretanto, conforme já referido anteriormente, as condições de operação têm uma influência significativa no comportamento do material metálico dos componentes da caldeira, especialmente ao nível das paredes de água da fornalha, aspectos estes que deverão ser considerados quando da decisão para a realização de um possível reparo com processo de soldagem.

Posteriormente, serão apresentados alguns dos mecanismos de degradação possíveis e/ou encontrados em tubos das paredes de água das fornalhas de caldeiras de recuperação química e que possam influenciar nas propriedades do material de base ou que eventualmente possam impossibilitar a realização de um reparo localizado com solda.

2.3.1 Corrosão generalizada ou localizada no lado dos gases

A pressão parcial do oxigênio na região da fornalha inferior é muito baixa para permitir a formação de uma camada de óxidos estável nos tubos de aço carbono, porém a atmosfera gasosa redutora rica em enxofre promove a formação de uma camada de sulfeto de ferro na superfície dos tubos. A taxa de corrosão depende sobretudo da temperatura na superfície do tubo, que por sua vez depende da pressão de operação da caldeira. A taxa de corrosão para os tubos em aço carbono não é considerada significativa para as temperaturas de operação correspondentes a uma pressão de até 6,5 MPa. Para caldeiras

que operam com pressões acima deste valor, a taxa de corrosão tem um aumento significativo, por exemplo, para uma caldeira operando na faixa de 7,0 MPa, o aumento da taxa de corrosão é da ordem dos 0,46 mm/ ano (FERREIRA, 2012).

Por este motivo foram adotadas medidas para permitir um aumento da vida dos tubos de aço carbono, inicialmente através da colocação de tubos com pinos que permitem fixar uma camada protetora de *smelt* solidificado, ou através da instalação de revestimentos exteriores resistentes à corrosão, através de revestimento com solda de ligas com elevado teor de cromo (aços inoxidáveis ferríticos) ou através da utilização de tubos compostos. (SHARP, 2007)

Um mecanismo de corrosão conhecido nestes tipos de caldeiras localiza-se nos cantos dos tubos das aberturas de ar primário, devido à liberação de calor originado pela queima de resíduos do licor negro não queimado, dentro da alta taxa de fluxo de ar de combustão que é conduzido para a fornalha através destas aberturas. Os tubos das aberturas virados para o exterior da caldeira, podem igualmente estar sujeitos à corrosão devido à presença de hidróxido de sódio fundido em zonas de estagnação, onde não foi possível ocorrer a reação deste para se transformar em carbonato de sódio. Os produtos de corrosão que de outra forma protegem os tubos em aço carbono, como por exemplo $\text{Fe}_2\text{Na}_2\text{O}_4$, são removidos (dissolvidos) pelo hidróxido de sódio fundido, resultando assim num aumento da taxa de corrosão. Em nenhuma das formas de degradação descritas anteriormente existe uma degradação efetiva das propriedades do material, apenas ocorre uma perda de seção resistente por redução da espessura do material do tubo, devendo-se ser sempre avaliado a espessura residual e quando houver necessidade, recorrer à substituição do trecho corroído ou alternativamente, realizar a reposição de espessura através de enchimento localizado com solda do trecho, isto quando houver espessura suficiente para este tipo de reparo (FERREIRA, 2012).

2.3.2 Trincas de fadiga térmica

Em caldeiras de recuperação química, esse mecanismo ocorre geralmente nos tubos das aberturas de ar primário ou nos tubos das aberturas de saída de *smelt* localizadas na fornalha baixa (SINGH, 2007).

A trinca de fadiga (figura 2.13) ocorre para níveis de tensão muito mais baixos do que a requerida para uma carga constante, quando a atuação destas tensões é realizada de

forma repetida ou está sujeita a variações de intensidade. No caso da fadiga térmica esta variação ocorre em paradas e partidas da unidade, bem como durante a operação, na sequência de gradientes de temperatura transientes. Se estes são repetidos, a diferença de expansão térmica durante cada um dos transientes, resulta na aplicação cíclica de tensões de origem térmica (VAKKILAINEN, 2007).

A extensão do dano provocado por este mecanismo de fadiga depende da natureza e da frequência do transiente, do gradiente térmico do componente e das propriedades do material. Se nas aberturas de ar primário este mecanismo de fissuração fica normalmente confinado aos tubos que formam a porta, já nas saídas de *smelt* essa trinca poderá ocorrer não só nos tubos das aberturas, mas também nos tubos adjacentes a estes. Estes tubos apresentam variações de temperatura quando a camada protetora de smelt solidificado é removida da superfície dos tubos, dando origem a um pico de temperatura (FERREIRA, 2012).

O efeito do aparecimento destes picos de temperatura é agravado pela existência de tensões residuais causadas pelo processo de conformação dos tubos que constituem as aberturas, bem como pelas soldas das membranas e aletas de selagem. Neste contexto, é de primordial importância confirmar a existência de qualquer defeito indicativo de um mecanismo de fadiga térmica ativo, na região onde se pretende efetuar a solda, uma vez que as tensões residuais daí resultantes poderão potenciar os efeitos deste mecanismo, aumentando assim a probabilidade de falha catastrófica do componente. Este exame poderá ser realizado com o recurso de técnicas de ensaio não destrutivo, tais como líquidos penetrantes e partículas magnéticas (API-571, 2020).

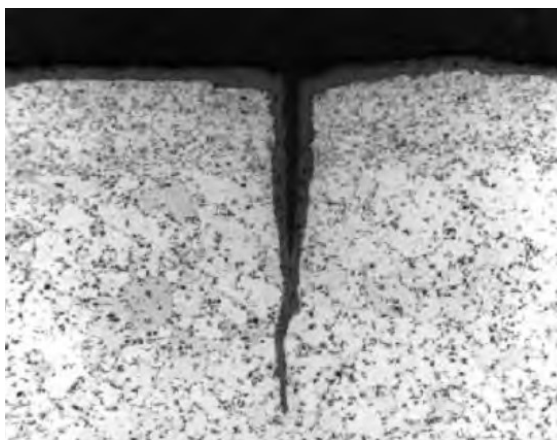


Figura 2.13 – Exemplo de trinca de fadiga na seção transversal de um componente.

Fonte: API-571, 2020.

2.3.3 Corrosão do lado da água

Os mecanismos de danos provocados por corrosão do lado da água, são normalmente gerados por um tratamento inadequado da água de alimentação ou por uma lavagem química deficiente, quando realizada. Um tratamento de água bem especificado e adequadamente monitorado associado a uma boa eficácia do desaerador são essenciais para evitar danos provocados por corrosão. Os principais mecanismos de corrosão passíveis de serem vistos são (FERREIRA, 2012):

- Corrosão sob depósito (danos por hidrogênio, corrosão cáustica e corrosão por ácido fosfórico);
- Corrosão por oxigênio dissolvido;
- Corrosão galvânica por presença de cobre.

Alguns fatores que mais poderão contribuir para a corrosão do lado da água em caldeiras de recuperação são:

- O aumento significativo da carga térmica das caldeiras de recuperação, devido a um aumento do teor de sólidos do licor negro que é utilizado como combustível de forma a melhorar o desempenho das atuais instalações;
- Um aumento da temperatura de ebulição causado pelo aumento da pressão de operação;
- Um aumento do risco de contaminação da água de alimentação utilizada nas caldeiras de recuperação química, pela necessidade de aproveitamento dos condensados recolhidos nas várias áreas da fábrica que consomem vapor.

Pelos motivos descritos anteriormente, existem várias fontes de contaminação do circuito de água/vapor de uma fábrica de produção de pasta de papel de ciclo *kraft*, sendo, por conseguinte, mais expostas à formação de depósitos do lado da água. Um dos mecanismos de corrosão sob depósito que poderá ocorrer é conhecido como danos por hidrogênio. Este fenômeno dá origem a uma falha por ruptura de características frágeis, consequente da deterioração microestrutural do material de base através da formação de microvazios. Neste mecanismo de degradação o hidrogênio atômico penetra no material do tubo e se difunde, onde irá reagir com os carbeto do material de base, resultando na formação de gás metano. Este gás metano vai acumular-se nos limites de grão dando

origem à formação de vários vazios, contribuindo assim para a fragilização do material (BARTHOLOMEW, 2007).

A corrosão cáustica é um outro mecanismo conhecido de corrosão sob depósito, neste caso não existe uma degradação microestrutural, pelo que a falha por ruptura apresenta características dúcteis. Este mecanismo de corrosão pode ocorrer quando, sob o depósito, começa a concentrar hidróxido de sódio a partir dos compostos químicos da água de alimentação. Esta concentração deve-se à ebulição que ocorre sob os depósitos porosos ou na linha de separação água/ vapor. A elevada concentração de hidróxido de sódio aumenta drasticamente o pH nesta região, a camada protetora de magnetita torna-se solúvel, permitindo desta forma a corrosão do material do tubo sob o depósito.

A formação de depósitos do lado da água ocorre sobretudo em zonas onde existe uma transferência de calor mais elevada, geralmente nas paredes de água ao nível do leito de *smelt*, nos tubos das aberturas dos queimadores e nas regiões do tubo sob pinos soldados ou em qualquer outra região onde se encontrem componentes soldados diretamente ao tubo não arrefecidos do lado da fornalha. Como o óxido de ferro é a forma natural do ferro no seu estado estável, os aços têm uma tendência natural para tentar reverter qualquer outro composto de ferro na sua forma original. Esta reversão ocorre sempre que o aço não está protegido por uma camada uniforme constituída por uma forma óxido de ferro estável, como por exemplo a magnetita, e é exposta ao oxigênio contido na água. No interior dos tubos é esperado que estejam continuamente protegidos por uma camada uniforme e estável de magnetita (Fe_3O_4). Contudo, devido a tensões e vibrações resultantes normalmente em condições de partida e paradas da unidade, esta camada de magnetita pode ser quebrada. Em condições normais a magnetita se recompõe, mas na eventualidade de existir um nível de oxigênio dissolvido na água em excesso, poderá se dar a formação de formas de óxidos menos estáveis, permitindo desta forma a progressão da corrosão (FERREIRA, 2012).

As zonas corroídas caracterizam-se pela formação de pites de corrosão dispersos com uma forma praticamente hemisférica. Um aspecto negativo desta forma de corrosão é o fato destes pites serem pontos de concentração de tensões, podendo ser um facilitador no desenvolvimento de outras formas de corrosão, designadamente, fissuração por corrosão fadiga, fissuração em ambiente cáustico e outras formas de falha relacionadas com a atuação de tensões.

A presença de cobre dissolvido na água da caldeira é um fator de elevada relevância, devendo ser mantido sob um rigoroso controle. Este cobre poderá depositar-se no interior dos tubos impedindo a formação de uma camada passiva de magnetita, permitindo através da diferença entre os potenciais de corrosão do cobre em relação ao do aço carbono do tubo, a corrosão localizada do aço carbono por um fenômeno de corrosão galvânica.

2.4. Processos de soldagem

Denomina-se soldagem, ao processo de união entre duas partes metálicas, usando uma fonte de calor, com ou sem aplicação de pressão, tendo a solda como resultado desse processo (WAINER, 1992).

Segundo MODENESI et al. (2012), a soldagem é o mais importante processo industrial de fabricação de materiais, sendo também utilizada na recuperação de peças desgastadas, para a aplicação de revestimentos de características especiais sobre superfícies metálicas e para cortes.

Esse processo é caracterizado por um aquecimento localizado da peça, permanecendo o restante desta em temperaturas muito inferiores à temperatura da região aquecida. As regiões aquecidas tendem a se dilatar, mas esta dilatação é restringida pelas partes adjacentes que são submetidas a temperaturas menores, o que resulta no desenvolvimento de deformações elásticas e plásticas concentradas nas regiões aquecidas (MODENESI et al. 2012).

Devido à deformação plástica localizada, ao final do processo de soldagem, tensões residuais permanecem na junta soldada que ainda tende a apresentar mudanças permanentes de forma e de dimensões (distorções). Estas costumam ser facilmente observadas, devendo ser controladas na fabricação com soldagem. Por outro lado, tensões residuais não são visíveis diretamente, mas afetam o comportamento da junta soldada em diferentes aspectos, a maioria das vezes de forma ainda mais relevante, como, por exemplo, levando à formação de trincas e mudanças na resposta à serviços que tenham possibilidade de fadiga, tendência à fratura frágil e à corrosão (MODENESI et al. 2012).

O processo de soldagem de revestimento *overlay* pode ser usado para reparo e construção de componentes danificados, mas também pode ser usado para aumento da vida útil destes.

Existem diversas maneiras de realizar a recuperação por soldagem de superfícies danificadas. A escolha do melhor método, pode ser baseado na qualidade do depósito desejado, especialmente quando a região a ser recuperada possui dimensões reduzidas. Em situações como esta, a escolha de processos mais produtivos pode não representar ganhos relevantes (DUTRA e FELIPPE, 2007).

Em trechos em que área a ser recuperada tem dimensões consideráveis, e, o processo de soldagem é pouco produtivo, a recuperação das superfícies pode não compensar em relação à substituição por um novo trecho, sendo isto dependente do tipo e intensidade do mecanismo de dano observado (DUTRA e FELIPPE, 2007).

Conforme observado no estudo de FERREIRA (2012), o qual realizou análise da reposição de espessura com solda em tubos de caldeira de recuperação de aço carbono com espessura de 7,1mm (sem revestimento), não existe uma influência significativa entre o aumento da área de enchimento da solda com as suas propriedades mecânicas. Ele utilizou quatro amostras, sendo uma de referência e nas outras três foram feitos rasgos de tamanhos diferentes que depois foram preenchidos com solda utilizando o processo de eletrodo revestido. Nas três amostras em que foram simulados os reparos, a microestrutura obtida após a soldagem se manteve praticamente a mesma. Ele também concluiu que quanto maior a área de enchimento com solda, maior é a tenacidade e que os valores de tamanho de grão apresentaram-se praticamente inalterados entre as amostras soldadas, sem uma diferença evidente.

No estudo realizado por PONTES (2016), foram utilizadas amostras de tubos pinados, com material em aço carbono, e espessura nominal de 5,0mm, com recomposição de espessura através de *weld overlay*, e que continuaram a operar na caldeira, tubos novos e tubos que foram soldados em laboratório. Foi observado que a microestrutura obtida na zona fundida (ZF) e na zona termicamente afetada (ZTA) foi semelhante à comparada com as amostras soldadas em laboratório, indicando que a operação na caldeira não influenciou de forma significativa a estrutura das regiões da solda. Afirmar ainda que o processo de soldagem de reposição alterou a microestrutura dos tubos ao longo de toda a sua espessura.

A Zona Termicamente Afetada (ZTA) é a região compreendida entre a linha de fusão e o metal de base não afetado, isto é, região não fundida do metal base. Na ZTA, a microestrutura e/ou propriedades são alteradas pelo ciclo térmico de soldagem. Na soldagem impõe-se, ao metal de base, ciclos térmicos em que este é submetido a elevadas temperaturas e depois resfriado rapidamente de forma que a ZTA sofre modificações na microestrutura e, por consequência, em suas propriedades mecânicas, (SILVA, 2004).

Segundo FERREIRA (2012), os processos de soldagem mais utilizados nas atividades de manutenção e reparo são o *Tungsten Inert Gas* (TIG) e o *Metal Active Gas* (MAG). O processo TIG e eletrodos revestidos para as partes pressurizadas. O processo semi-automático na variante MAG para as partes não sujeitas à pressão ou na ligação de componentes não sujeitos à pressão a partes pressurizadas, como no caso de aletas de selagem.

O processo de soldagem *TIG* é o mais utilizado para a substituição de tubos ou de componentes sujeitos à pressão. Sobretudo pelo melhor controle que este processo apresenta quando se tem a necessidade de realização de passes de penetração e de enchimento em juntas circunferenciais de tubos com soldas de topo em pequenos diâmetros e em posições de difícil execução e com acesso limitado. A realização deste tipo de soldagem requer, contudo, a utilização de soldadores bem treinados e com uma capacidade de coordenação motora muito apurada. Este processo depende, portanto, muito da qualidade do soldador que executa a junta (SANTOS, 1993).

O processo por eletrodos revestidos é sobretudo utilizado para reposição da camada de proteção exterior em aço liga, reforço da espessura em tubos de aço carbono e na execução de soldas de selagem de aletas. O bom controle da deposição, a possibilidade de ser utilizado em qualquer posição e a simplicidade do equipamento, fazem deste processo, um dos mais utilizados em atividades de manutenção. Este processo apresenta ainda outra vantagem, sobretudo relativamente ao processo *TIG*. Trata-se da baixa entrega térmica que é necessária para o seu funcionamento, particularmente para eletrodos de diâmetros mais reduzidos, o que possibilita a sua utilização em espessuras remanescentes relativamente baixas sem que ocorra o risco de perfuração da parede por ação do arco elétrico. Outra vantagem que advém desta baixa entrega térmica é a menor influência na alteração das propriedades mecânicas e metalúrgicas do material de base (FERREIRA, 2012).

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, 2009).

Eles também podem fornecer as instruções para o soldador usar na produção, de modo a produzir soldas aceitáveis.

Geralmente, os procedimentos de soldagem são desenvolvidos de acordo com um código ou padrão de soldagem e podem exigir que amostras físicas de solda sejam produzidas, inspecionadas e testadas para estabelecer a qualificação.

Os procedimentos de soldagem são geralmente divididos em duas categorias, o Registro de Qualificação de Procedimentos de Soldagem (RQPS) e a Especificação de Procedimento de Soldagem (EPS) (MARQUES, 2009).

Na RQPS, são disponibilizados os valores documentados usados durante o teste de soldagem real e todos os resultados de inspeção e teste obtidos das amostras de teste reais. A EPS é um documento qualificado por escrito, preparado para fornecer orientação para a fabricação de soldas de acordo com as necessidades do código (ASME IX, 2021).

As variáveis a serem documentadas são tipicamente itens como:

- Processo de soldagem usado;
- Dimensão, tipo e classificação da liga de enchimento;
- Tipo e espessura do material de base soldado;
- Tipo e polaridade da corrente de soldagem, amperes e volts registrados.
- Velocidade de deslocamento durante a soldagem, posição de soldagem, tipo e dimensões do projeto da junta;
- Temperatura de pré-aquecimento, detalhes do tratamento térmico pós-solda e outros.

Quanto a qualificação do soldador, pode ser verificada através do Registro de Qualificação de Soldador (RQS), o qual tem a função de informar se um profissional, operador de soldagem, atendeu aos requisitos de uma determinada norma e está qualificado para executar a soldagem no escopo dessa norma (MARQUES, 2009).

Soldadores certificados devem possuir as habilidades necessárias para produzir uma solda sólida, visualmente aceitável e que também atenda aos requisitos de teste. A parte principal do teste do soldador consiste em soldar uma ou mais peças testes, testados usando métodos não destrutivos e destrutivos. A extensão da certificação é descrita por várias variáveis, que incluem o processo específico de soldagem, tipo de metal depositado, espessura, projeto da junta, posição, suporte e outros. Na maioria das vezes, o teste é realizado de acordo com um código específico (N-133, 2015).

No entanto, algumas Qualificações são válidas apenas para um único projeto, enquanto outras são ilimitadas, desde que os soldadores não ultrapassem um período especificado sem realizar esse tipo específico de soldagem (esse período é normalmente de 6 meses). Os soldadores devem manter um registro para demonstrar que mantiveram suas qualificações (INSPESOLDA, 2023).

Dependendo dos requisitos do produto, o teste pode ser administrado sob recomendação de uma organização nacional ou internacional, como a American Welding Society (AWS) ou a American Society of Mechanical Engineers (ASME), mas os fabricantes também podem especificar seus próprios padrões e requisitos.

A maioria das certificações expiram após um certo prazo e têm requisitos diferentes para renovar ou estender a certificação.

Como exemplo, o Registro de qualificação de soldador RQS pode ser realizada conforme os padrões da AWS D1.1, ASME Seção IX e API 1104, que também são usados em outros países.

Outro documento solicitado em alguns projetos específicos, é a elaboração da IEIS que significa, Instrução de Execução e Inspeção de Soldagem, é o documento onde detalhamos todas as etapas da execução da soldagem, desde a preparação até o teste final, selecionando processos e todos os testes aplicáveis para garantir a estanqueidade, integridade, resistência e estética da solda.

Com o intuito de racionalizar os documentos de uso fabril e unir as fases de inspeção e testes, foi criado a Instrução de Execução e Inspeção de Soldagem (IEIS), esse documento não está previsto em nenhum código de construção, e sim, previsto na Norma Petrobrás N-133. (INSPESOLDA, 2023).

2.5. A importância do PLH

No Brasil, o tempo de campanha operacional de Caldeiras de recuperação química é limitado pela Norma Regulamentadora N°13 (NR-13), a qual obriga os empregadores a realizarem uma parada para inspeção e manutenção do equipamento, dentro de um prazo máximo limitado a 18 meses atualmente. (NR-13, 2022)

Por se tratar de uma alteração recente dos prazos limite (passando de 15 para 18 meses), tendo sua última revisão entrado em vigor em novembro de 2022, é necessária uma inspeção ainda mais minuciosa, para garantia da confiabilidade operacional ao longo das campanhas.

Assim, o PLH (Profissional Legalmente Habilitado) tem papel fundamental na definição deste prazo, pois, através da análise dos resultados da inspeção, este deve determinar um prazo limite adequado as condições de conservação e operação atuais do equipamento, reduzindo este prazo quando necessário, visando a segurança e integridade das pessoas e instalações.

Quanto aos reparos discutidos neste trabalho, é também importante salientar a importância do PLH na tomada de decisão, pois este deve possuir capacidade técnica e experiência suficientes para a emissão da recomendação adequada a cada caso, sendo esta, a necessidade de realização de reparo, monitoramento ou substituição do trecho em análise.

Capítulo 3 - Materiais e Metodologia

A figura 3.1 apresenta um fluxograma geral da metodologia adotada neste trabalho.



Figura 3.1 - Esquema geral dos procedimentos experimentais.

3.0. Metal base e amostras

Neste estudo foram utilizados tubos 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. As características gerais especificadas dos tubos estão listadas na Tabela 3.1.

Estes tubos possuem um rígido controle de qualidade na fase de fabricação, para que eles sejam o mais homogêneo possível. Por se tratar de aplicação em alta pressão operacional (na faixa de 82 kgf/cm²), os fornecedores são aprovados apenas, após comprovação de capacidade técnica para atendimento aos requisitos solicitados.

Tabela 3.1 - Características gerais especificadas dos tubos de aço baixo carbono sem costura e revestidos com *overlay* em aço inoxidável ferrítico com 18% de Cr.

Material dos tubos	ASTM A210 Grau A1 (ASTM, 2012) + <i>overlay</i> 18%Cr
Composição química	C _{máx} 0,27%, Mn _{máx} 0,93%, P _{máx} 0,035%, S _{máx} 0,035% e Si _{mín} 0,10%
Limite de resistência à tração	415 MPa (min.)
Limite de escoamento	255 MPa (min.)
Dureza do metal base	máxima 143 HB (151 HV)
Diâmetro	63,5 mm
Espessura de parede	5,0 mm + 2,0mm (min. <i>overlay</i>)
Espaçamento entre tubos	membrana de 12,7 mm (0,5").

Quando em operação, os tubos possuem extensas campanhas operacionais, e, após a substituição de trechos, estes usualmente são enviados para laboratórios de análise de falhas ou são descartados imediatamente pelos responsáveis, o que dificultou a obtenção de um número maior de amostras usadas para a pesquisa.

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, sendo essa uma recomendação técnica.

Dessa forma, foram comparadas as microestruturas de tubos novos utilizados com as de outros retirados de serviço, para que sirvam de parâmetro comparativo, demonstrando se necessário os cuidados adicionais durante a realização de reparos no campo.

Inicialmente foram realizados desbastes em três pontos de cada um dos tubos, gerando assim 03 amostras para cada tubo, conforme detalhados na Tabela 3.2.

Tabela 3.2- 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 na caldeira sem ter tido recomposição de espessura no trecho, e que foi cedido por uma empresa fabricante de celulose.
7 e 8	7A/7B/7C 8A/8B/8C	Usado	Trecho de tubo que operou por 23 anos em uma caldeira similar, sem ter tido recomposição de espessura no trecho. Foram fornecidos por uma empresa fabricante de celulose, apresentando perda de espessura devido a desgaste interno.
9	9A	Usado	Trecho de tubo que operou por 15 anos na caldeira sem ter tido recomposição de espessura no trecho, e que foi cedido por uma empresa fabricante de celulose. Este servirá como referência para a comparação microestrutural entre tubos novos e os que operaram durante um período em caldeiras de recuperação.

Na Figura 3.2 podem ser visualizados os tubos novos 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 3.2 - Identificação dos tubos novos, vista da geratriz não revestida. Fonte: Própria

Na Figura 3.3 podem ser visualizados tubos usados que foram utilizados na produção de amostras. Na imagem, tubos 06, 07 e 08.



Figura 3.3- Exemplo dos tubos usados 6, 7 e 8, vista da geratriz não revestida. Fonte própria

3.1. Consumível de soldagem

Para as soldas de recomposição de espessura do revestimento, foi utilizado o processo de eletrodos revestidos, cujas características do mesmo estão descritas no procedimento de soldagem do Anexo A no final deste documento e resumidas na Tabela 3.3.

Tabela 3.3 - Características dos eletrodos revestidos (Fonte: manual do fabricante).

Designação comercial	CR43 Cbs (Kobestee [®])
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

3.2. Preparo das amostras

3.2.1. Desbaste

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. Na produção do desbaste, foi utilizada uma esmerilhadeira angular Bosch® modelo GWS 850 e disco de corte fino Norton® BNA12, para aço inox.

3.2.2. Medição de espessura

Após a remoção do revestimento, foram realizados testes com sulfato de cobre 10%, prática comum aplicada atualmente durante as inspeções de campo, 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. Para tal, foi utilizado um medidor de espessura Krautkramer®, modelo Dyna Mic com cabeçote duplo cristal com frequência nominal de 5MHz, também da marca Krautkramer® e modelo DA-212.

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 no manual do fabricante do equipamento (valor mínimo do metal de base em aço carbono superior a 3,1 mm). O revestimento em aço inoxidável ferrítico, com 18% de Cr, foi aplicado diretamente sobre o aço carbono independente da espessura medida e posteriormente foram analisados os resultados.

3.2.3. Recomposição da espessura com *overlay*

Dois soldadores profissionais, porém, com nível de experiência diferentes neste tipo de atividade específica, realizaram os reparos, posteriormente foi feita a comparação dos resultados deles. Buscou-se desta forma, verificar a influência dos profissionais

envolvidos nessa atividade considerada crítica nas caldeiras de recuperação, sobretudo quanto a possibilidade de inserção de descontinuidades nas regiões reparadas.

Para a realização da soldagem de recomposição, será adotado o processo de eletrodos revestidos, para isso, foram utilizados os demais equipamentos necessários, tais como: máquina de solda, porta eletrodo, grampo terra, eletrodo revestido e cabos elétricos. Outros acessórios de soldagem são importantes durante o processo, que são: picadeira e escova de aço para remoção de escória, EPI's, antirrespingo e estufa para conservação do eletrodo. Será utilizada a máquina de solda ESAB® modelo LNH 242I, com tensão de 24V e corrente de 74A.

3.2.4. Análise de liga da superfície do revestimento

Será 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®, modelo XL3t Gold.

Esse valor possui grande relevância, pois trata-se de uma referência para a formação da camada passivadora protetiva que terá contato direto com o meio corrosivo durante as campanhas operacionais.

Através dessa medida, também será possível fazer uma avaliação preliminar do comportamento da diluição do metal de solda depositado. Este será menor, quanto menor for a profundidade de penetração no metal de base, o que no caso é algo benéfico em termos de resistência a corrosão.

3.3. Metalografia

Após realização do processo de soldagem para 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 atividades descritas, serão utilizados os seguintes equipamentos: Máquina embutidora STRUERS® modelo Tempopress 2; Lixas da marca NORTON®; Máquina politriz

FORTEL® modelo PLF; Câmara fotográfica contida em aparelho celular marca Readmi® e modelo Note 09.

Para as análises metalográficas e demais exames, as amostras dos tubos foram cortadas na transversal, incluindo a região da solda quando aplicável, através de máquina de corte modelo Arotec®, modelo Arocor 80; Após, 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 será utilizado ataque com solução de Nital 2% e para o aço inoxidável ferrítico a solução de ácido oxálico 10%.

3.4 Microscopia Óptica

No intuito de identificar os constituintes microestruturais presentes nas regiões onde será realizado o reparo com *weld overlay*, a seguinte sequência será realizada:

- As amostras embutidas, lixadas e polidas serão atacadas com solução de ácido oxálico 10% inicialmente, para análise microestrutural do revestimento ferrítico (*overlay*) e, posteriormente, observadas com microscópio óptico;
- Após observação da microestrutura do *overlay*, deve-se efetuar nova preparação das amostras embutidas para remoção do ataque inicial, onde serão realizados os mesmos procedimentos de lixamento, polimento e posterior ataque com solução de Nital 2%, para análise macrográfica e micrográfica do aço carbono. Na sequência, as microestruturas serão também observadas através do uso de microscópio óptico para a identificação dos constituintes presentes.

Essa atividade será realizada em um microscópio óptico Olympus® modelo TH4-200 com lente Olympus® CX31;

O objetivo principal na microscopia óptica será 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.

3.5- Ensaio de dureza

Os ensaios de dureza foram realizados utilizando-se o durômetro de bancada REICHETER[®], modelo BVR 250H. Este ensaio foi necessário para representar a propriedade mecânica do material através da comparação dos valores medidos com as referências encontradas na literatura. Segundo TELLES (2003), a dureza é, em geral, proporcional ao limite de resistência do material.

Capítulo 4 - Resultados e Discussões

4.0. Remoção do revestimento e medição espessura residual

Como exemplo do processo de desbaste na geratriz revestida com weld overlay até atingir espessuras distintas no aço carbono, nas Figuras 4.1 (a) e (b) são visualizadas as amostras.

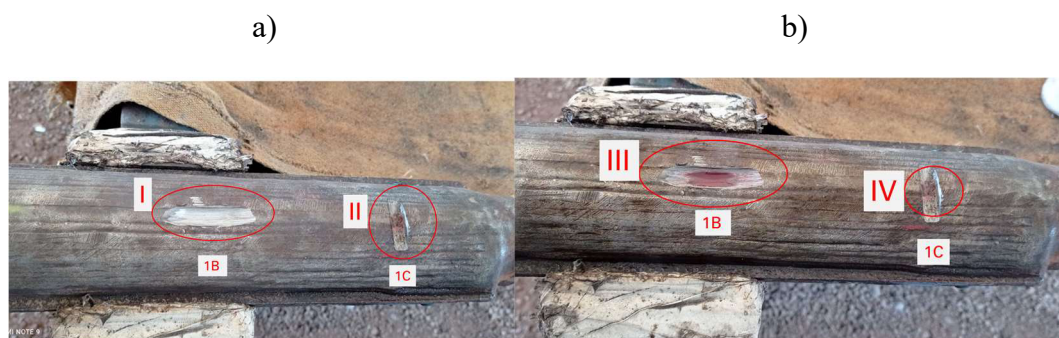


Figura 4.1- Teste com sulfato de cobre no desbaste do revestimento *overlay* em amostras 1B e 1C do tubo 01: (a) Sem exposição do aço carbono em I e iniciando a exposição do aço carbono com coloração marrom avermelhado em II; (b) Após exposição do aço carbono com coloração marrom avermelhado em III e IV.

Nas demais amostras foram realizados desbastes e procedimentos similares, conforme pode-se observar no Anexo.

Posteriormente, foram realizadas medições de espessura nas regiões desbastadas (amostras) dos corpos de prova para determinar a espessura residual de aço carbono. Os resultados são mostrados na Tabela 4.1.

Tabela 4.1- Controle de espessura residual do aço carbono após desbaste da superfície revestida com *weld 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	—	—	—	—	—

Os resultados da medição destacados em vermelho na Tabela 4.1, indicam que não foi possível a realização da recomposição com solda nestes pontos, visto que durante a preparação de superfície ou início do processo de soldagem, os mesmos acabaram sendo “perfurados”. Em algumas amostras previstas (7A, 7B, 7C), a perfuração ocorreu pela redução de espessura precedente ao desbaste do overlay, devido ao desgaste por corrosão interna, enquanto o tubo encontrava-se em operação, ficando com baixa espessura no metal de base, ver Figura 4.2. Por esse motivo, foi adicionado o ponto D no tubo 07 (amostra 7D).

Foi evidenciado a dificuldade na medição de espessura durante a preparação dos corpos de prova, assim como ocorre nas intervenções de campo atualmente, devido dimensão dos cabeçotes de ultrassom convencional em relação a geometria dos tubos com a região deteriorada, as quais geralmente possuem imperfeições superficiais que nem sempre permitem o acoplamento correto dos cabeçotes de ultrassom. Por esse motivo, em muitos momentos ocorre a necessidade do desbaste localizado de uma área maior, na

tentativa de regularizar a superfície do aço para então permitir o acoplamento do medidor de espessura.

4.1. Recomposição do revestimento *weld overlay*

A Figura 4.2 mostra os tubos usados 06, 07 e 08. Durante a preparação das amostras, ocorreu a perfuração dos tubos em alguns pontos, após o desbaste, pela baixa espessura de aço carbono nas amostras, após a remoção do *overlay*. Isso foi devido a remoção excessiva durante o desbaste (tubo 6) ou a presença de corrosão interna do tubo (tubos 7 e 8), oriundo de contato com o lado água durante a operação, ver Figura 4.2 e 4.3. Por isso, uma quarta amostra foi adicionada ao tubo 07.

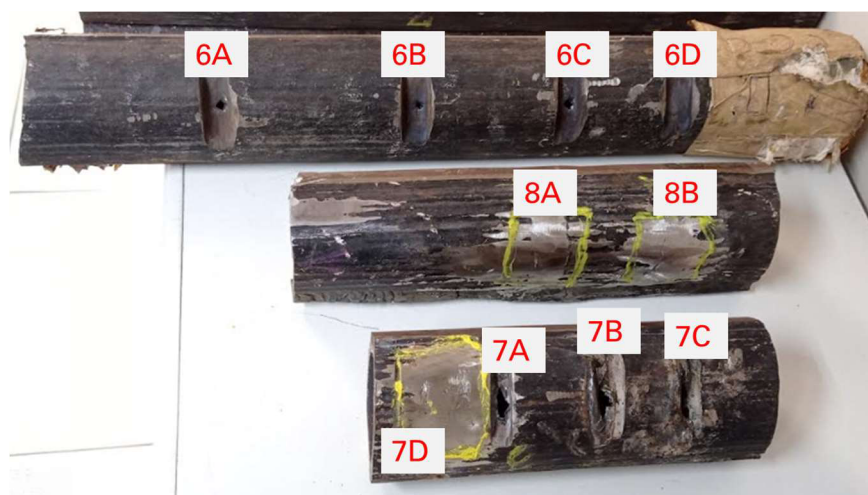


Figura 4.2- Detalhe das amostras dos tubos usados, 06, 07 e 08. Amostras do tubo 07 e 06 danificadas durante o preparo para a recomposição do *weld overlay*. Foi adicionado o ponto D no tubo 07 (amostra 7D).

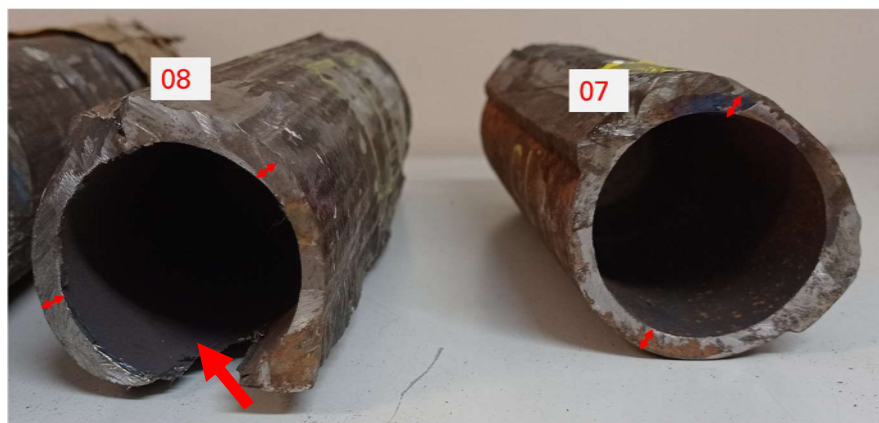


Figura 4.3- Detalhe da perda de espessura uniforme ocorrida do lado água (tubos 07 e 08).



Figura 4.4- Imagem do tubo 09, região que foi utilizada para remoção da amostra de referência, para o tubo usado sem reparo de campo.

4.2. Análise química da superfície do revestimento ferrítico

Foi realizado ensaio de análise de liga na superfície do revestimento soldado das amostras, para verificação do teor de cromo, sendo utilizado para isso um analisador de liga marca Niton[®], modelo XLT3t Gold. Os valores encontrados estão descritos na Tabela 4.2.:

Tabela 4.2- 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%, conforme já demonstrado na Figura 2.12 e no item 2.2.

4.3. Análise metalográfica

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, Figura 4.5. Após o corte, as amostras foram embutidas, lixadas, polidas e atacadas.



Figura 4.5- Detalhe da marcação e identificação para corte das regiões com recomposição por *weld overlay*.



Figura 4.6- Detalhe da região de interesse a ser cortada para embutimento.



Figura 4.7- Vista do trecho em que foram realizados os reparos, indicando a região a ser analisada e amostra cortada para embutimento.

4.3.1 Caracterização Macroscópica

As macrografias foram representadas segundo as regiões destacadas na Figura 4.8:

- 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 4.8- Macrografia contendo a região do metal base (A), zona de fusão (B) e revestimento overlay (C). Ataque Nital 3%. Corte transversal.

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, nas Figuras 4.9 a 4.16 a seguir:

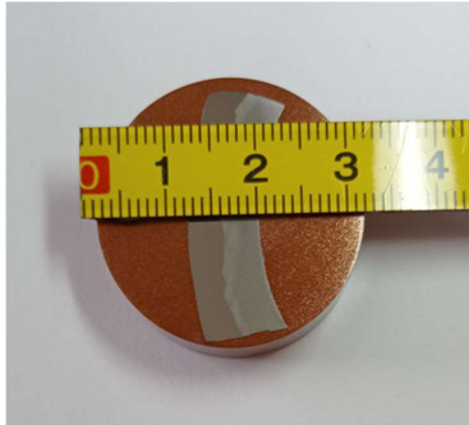


Figura 4.9- Macrografia amostra 1B. Ataque Nital 3%. Corte transversal



Figura 4.10- Macrografia amostra 2A; Ataque Nital 3%. Corte transversal.



Figura 4.11- Macrografia amostra 3C; Ataque Nital 3%. Corte transversal.

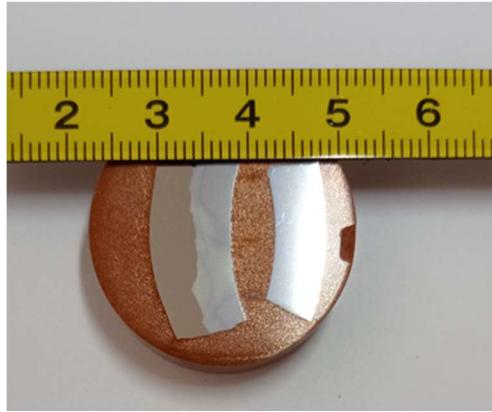


Figura 4.12- Macrografia amostra 4C. Ataque Nital 3%. Corte transversal.



Figura 4.13- Macrografia amostra 5B. Ataque Nital 3%. Corte transversal.

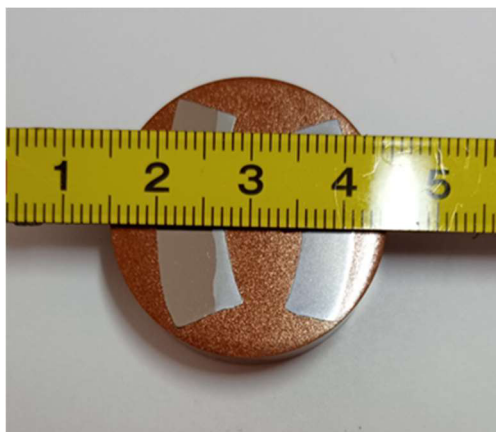


Figura 4.14- Macrografia amostra 7D; Ataque Nital 3%. Corte transversal.

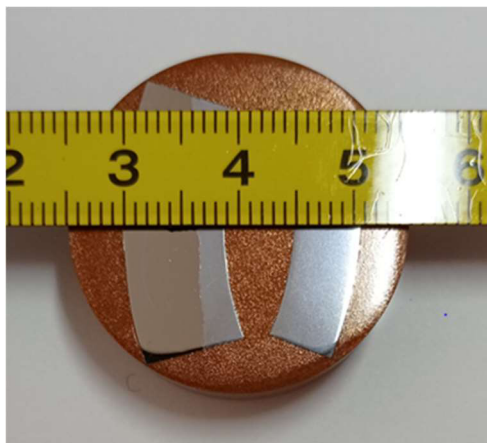


Figura 4.15- Macrografia da amostra 8A; Ataque Nital 3%. Corte transversal.



Figura 4.16- Macrografia da amostra 9A; Ataque Nital 3%. Corte transversal

Na Tabela 4.3 são visualizados os resultados das medições de espessuras obtidas a partir das macrografias. Essas medidas foram realizadas através da escala graduada, conforme demonstrado nas Figuras 4.9 a 4.16.

Tabela 4.3- Espessura aproximada do metal de base em aço carbono 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*	—	—	—	—

*Espessura do metal de base do tubo com revestimento de fabricação.

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.

Conforme visto na figura 4.9 a 4.15 das amostras citadas anteriormente, 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. Já na Figura 4.16, amostra do tubo 09, que possui o overlay de fabricação, é

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.

Dentre os tubos novos, o único que sofreu uma profundidade de penetração um pouco acima do esperado, ficando com a espessura residual de 3,0mm, foi na amostra do tubo 05, a qual, ainda assim, ficou próximo da espessura mínima recomendada (acima de 3,1mm).

As amostras dos demais tubos novos, tubos 01 a 04, ficaram com espessura superior a 3,1 mm, demonstrando que macroscopicamente eles apresentam resultados satisfatórios.

Quanto às amostras dos tubos 07 e 08, as quais possuíam espessura abaixo da mínima requerida antes do procedimento de reparo com overlay realizado para teste, apresentaram baixa espessura do metal de base em aço carbono como era esperado, 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.

4.3.2. Caracterização Microestrutural

4.3.2.1. Revestimento (overlay)

Neste item, as micrografias da região do revestimento são apresentadas, com as devidas observações:

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 4.17 a 4.24.

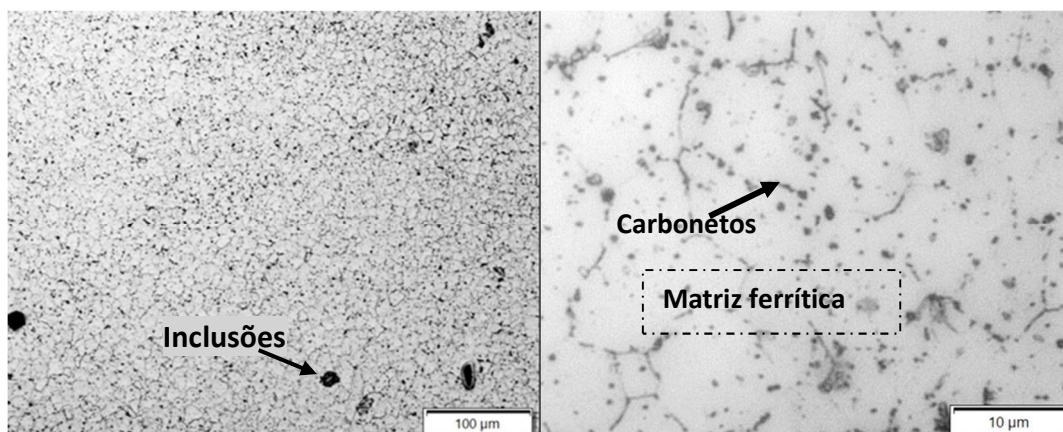


Figura 4.17- Amostra 1A- Micrografia do inox ferrítico (overlay): observada microestrutura de matriz ferrítica com carbonetos dispersos (pequenos pontos escuros), prováveis inclusões não metálicas (pontos escuros maiores) e contornos de grãos levemente desfeitos; Ataque ácido oxálico 10%. Corte transversal. 40X e 400X respectivamente.

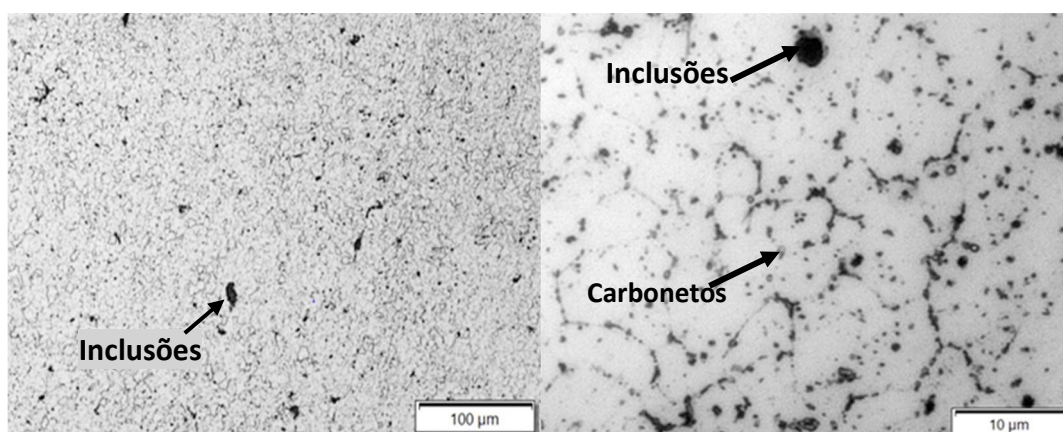


Figura 4.18- Amostra 2B- Micrografia do inox ferrítico (overlay): observada microestrutura de matriz ferrítica com carbonetos dispersos (pequenos pontos escuros), prováveis inclusões não metálicas (pontos escuros maiores) e contornos de grãos levemente desfeitos; Ataque ácido oxálico 10%. Corte transversal. 40X e 400X respectivamente.

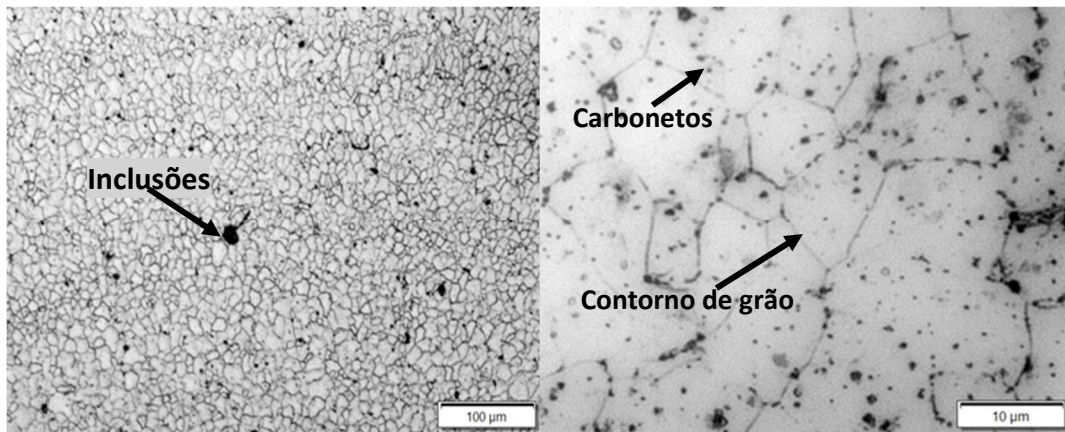


Figura 4.19- Amostra 3A- Micrografia do inox ferrítico (overlay): observada microestrutura de matriz ferrítica com carbonetos dispersos (pequenos pontos escuros); prováveis inclusões não metálicas (pontos escuros maiores) e contornos de grãos apresentam-se mais definidos nessa amostra; Ataque ácido oxálico 10%. Corte transversal. 40X e 400X respectivamente.

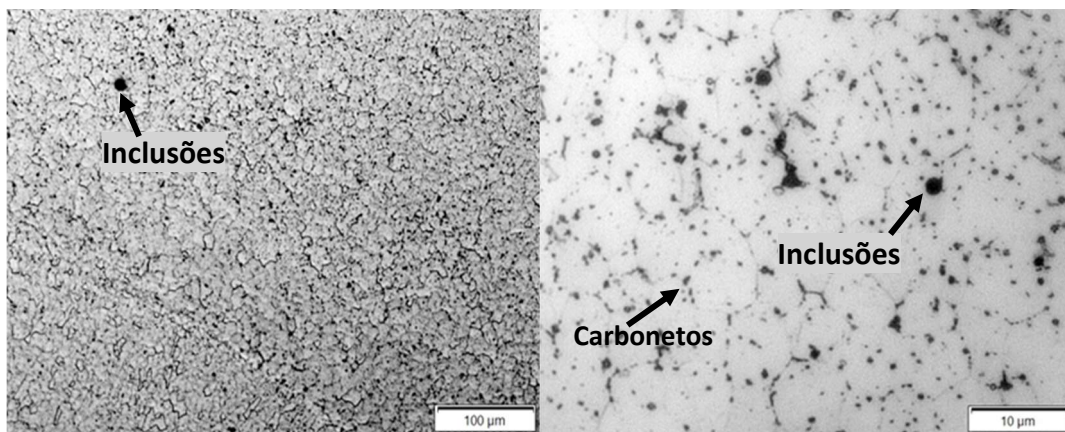


Figura 4.20- Amostra 4B- Micrografia do inox ferrítico (overlay)- observada microestrutura de matriz ferrítica com carbonetos dispersos (pequenos pontos escuros); Ataque ácido oxálico 10%. Corte transversal. 40X e 400X respectivamente.

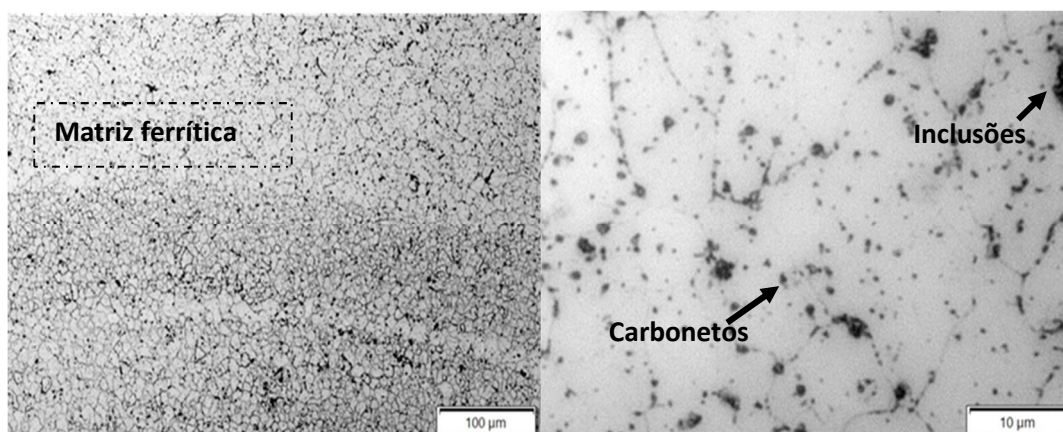


Figura 4.21- Amostra 5C- Micrografia do inox ferrítico (overlay)- observada microestrutura de matriz ferrítica com carbonetos dispersos (pequenos pontos escuros); Ataque ácido oxálico 10%. Corte transversal. 40X e 400X respectivamente.

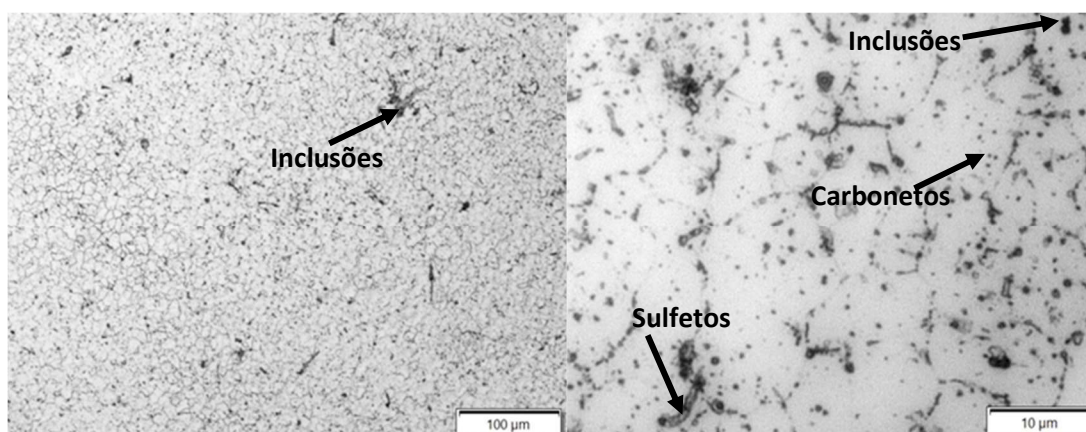


Figura 4.22- Amostra 7D- Micrografia do inox ferrítico (overlay): observada microestrutura de matriz ferrítica com sulfetos (cinza claro), carbonetos dispersos (pequenos pontos escuros) e inclusões não metálicas (pontos pretos maiores); Ataque ácido oxálico 10%. Corte transversal. 40X e 400X respectivamente.

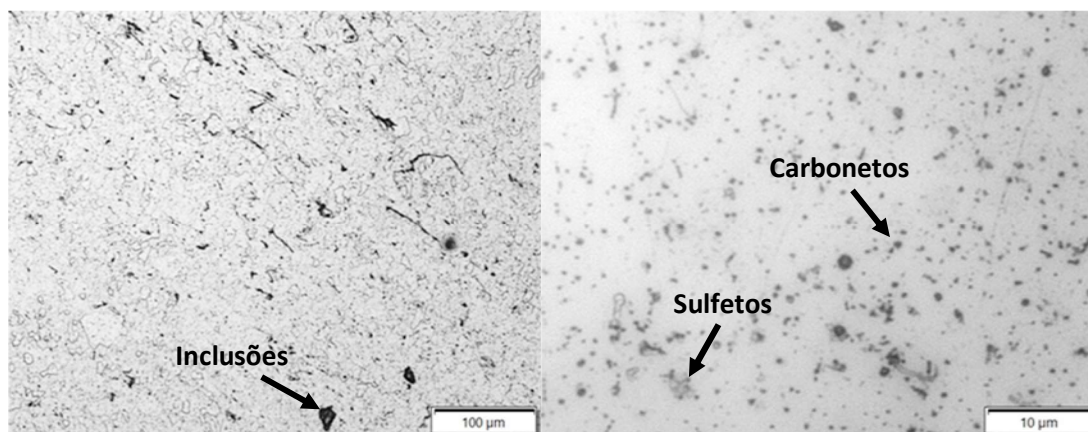


Figura 4.23- Amostra 8A- Micrografia do inox ferrítico (overlay): observada microestrutura de matriz ferrítica com sulfetos (cinza claro), carbonetos dispersos (pequenos pontos escuros) e inclusões não metálicas (pontos pretos maiores); Ataque ácido oxálico 10%. Corte transversal. 40X e 400X respectivamente.

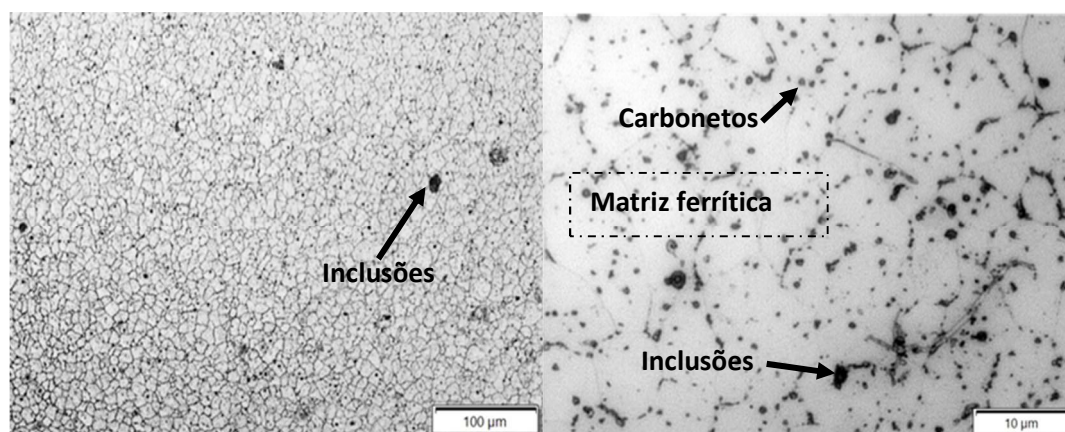


Figura 4.24- Amostra 9A- Micrografia do inox ferrítico (overlay): Observada microestrutura de matriz ferrítica com carbonetos dispersos (pequenos pontos escuros), prováveis inclusões não metálicas (pontos escuros maiores) e contornos de grãos levemente desfeitos; Ataque ácido oxálico 10%. Corte transversal. 40X e 400X respectivamente.

Conforme verificado nas figuras 4.17 a 4.24, 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 (geralmente sulfetos de manganês) (BRAMFITT, 2002). Para as demais

amostras, não foram identificadas diferenças relevantes em relação ao que foi observado nas Figuras 4.17 a 4.24.

4.3.2.2. Microscopia da zona de fusão e ZTA

As micrografias da região da zona de fusão (ZF) e da zona termicamente afetada (ZTA) estão apresentadas nas figuras 4.25 a 4.32, com as devidas observações do que foi verificado na região “B” da Figura 4.8, referentes a ZF e ZTA. O aço carbono foi exposto a solução de Nital 2%, possibilitando a revelação de sua microestrutura, que pôde ser observada em um microscópio óptico, com aumento de até 400X.

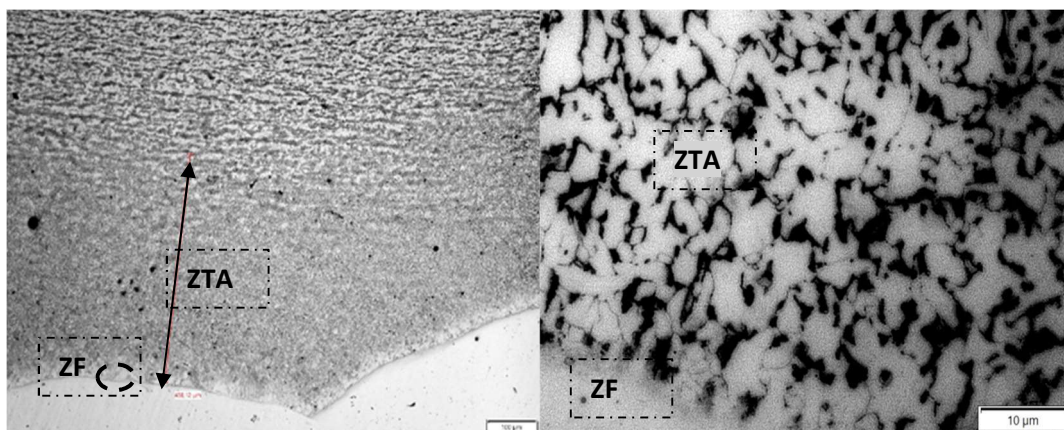


Figura 4.25- Amostra 1A- Micrografia da região da ZF e ZTA: observada microestrutura bruta de fusão na ZF e constituintes típicos de ZTA de alta temperatura próximo a esta. Ataque Nital 2%. Corte transversal. 40X e 400X respectivamente.

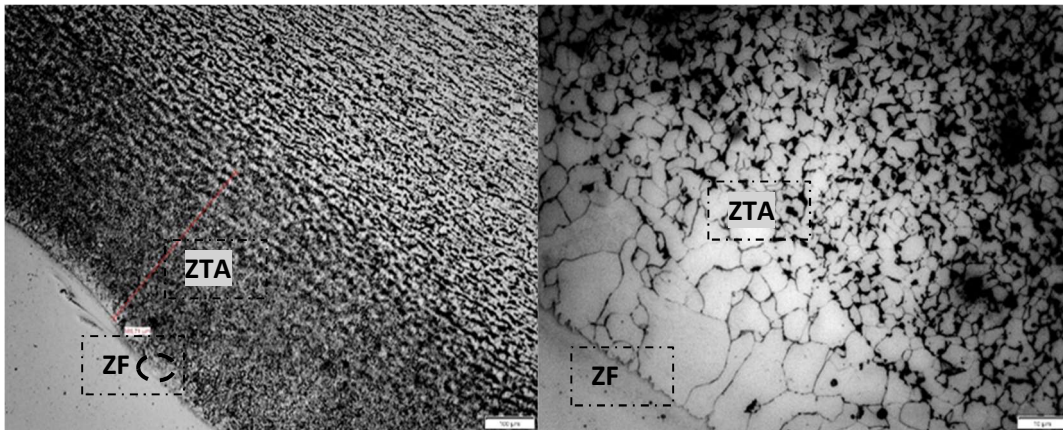


Figura 4.26- Amostra 2B- Micrografia da região da ZF e ZTA: observada microestrutura bruta de fusão na ZF e constituintes típicos de ZTA de alta temperatura ou mesmo de zona fundida próximo a esta, o crescimento de grão neste ponto é um indicativo de deficiência de remoção do overlay antigo; Ataque Nital 2%. Corte transversal. 40X e 400X respectivamente.

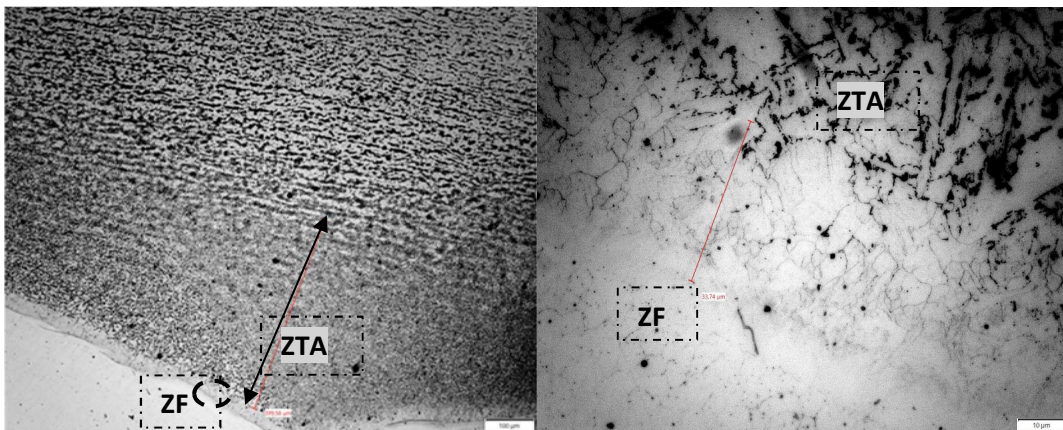


Figura 4.27- Amostra 3A- Micrografia da região da ZF e ZTA: observada microestrutura bruta de fusão na ZF e constituintes típicos de ZTA de alta temperatura próximo a esta. Ataque Nital 2%. Corte transversal. 40X e 400X respectivamente.

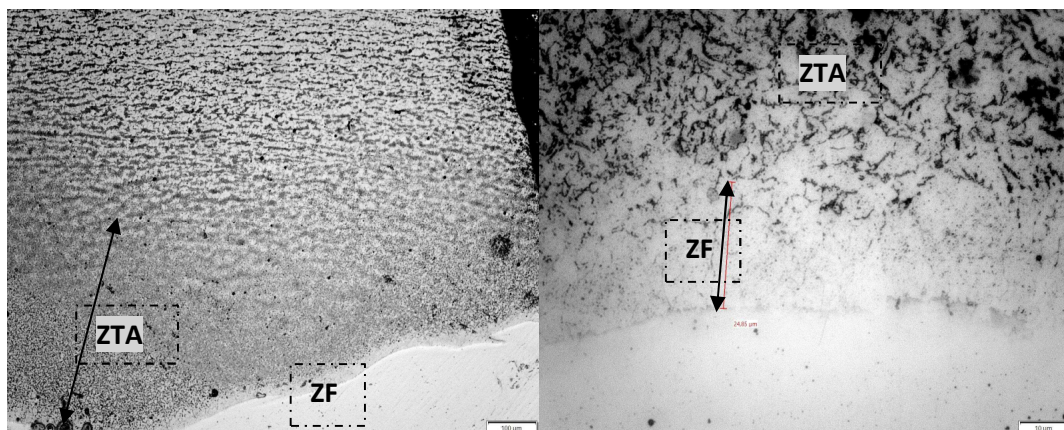


Figura 4.28- Amostra 4B- Micrografia da região da ZF e ZTA: observada microestrutura bruta de fusão na ZF e constituintes típicos de ZTA de alta temperatura próximo a esta. Ataque Nital 2%. Corte transversal. 40X e 400X respectivamente.

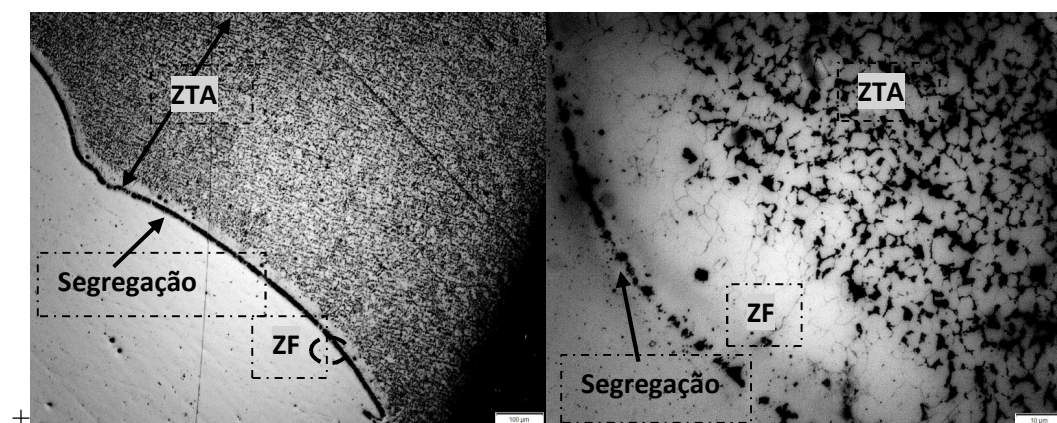


Figura 4.29- Amostra 5A- Micrografia da região da ZF e ZTA; observa-se segregação de elementos na linha de fusão devido a contaminação ou desvio na composição do consumível, indicando uma região com susceptibilidade a ocorrência de discontinuidades; Ataque Nital 2%. Corte transversal. 40X e 400X respectivamente.

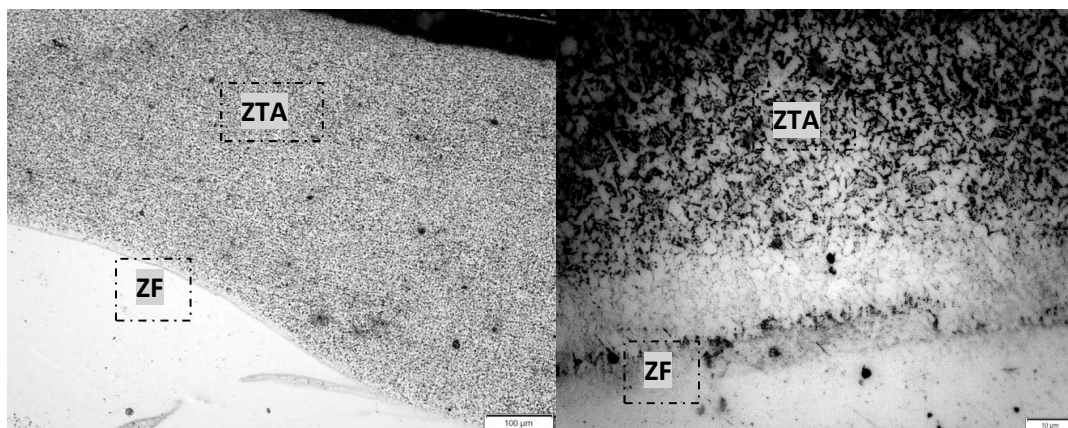


Figura 4.30- Amostra 7D- Micrografia da região da ZF e ZTA: observada microestrutura bruta de fusão na ZF e constituintes típicos de ZTA de alta temperatura. Devido a espessura reduzida neste trecho, durante a soldagem, toda a parede do tubo foi totalmente ou parcialmente austenitizada; Ataque Nital 2%. Corte transversal. 40X e 400X respectivamente.

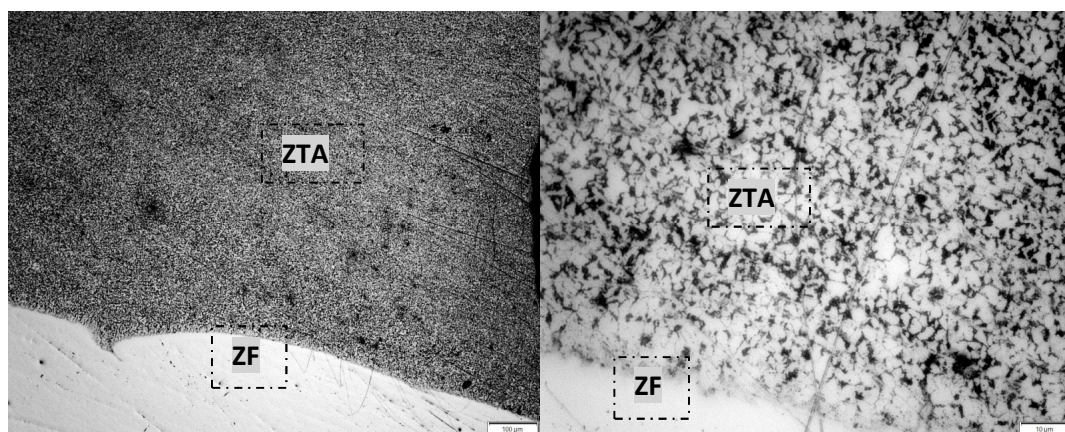


Figura 4.31- Amostra 8A- Micrografia da região da ZF e ZTA: observada microestrutura bruta de fusão na ZF e constituintes típicos de ZTA de alta temperatura ou mesmo de zona fundida próximo a esta. Devido a espessura reduzida neste trecho, durante a soldagem, toda a parede do tubo foi totalmente ou parcialmente austenitizada; Ataque Nital 2%. Corte transversal. 40X e 400X respectivamente.

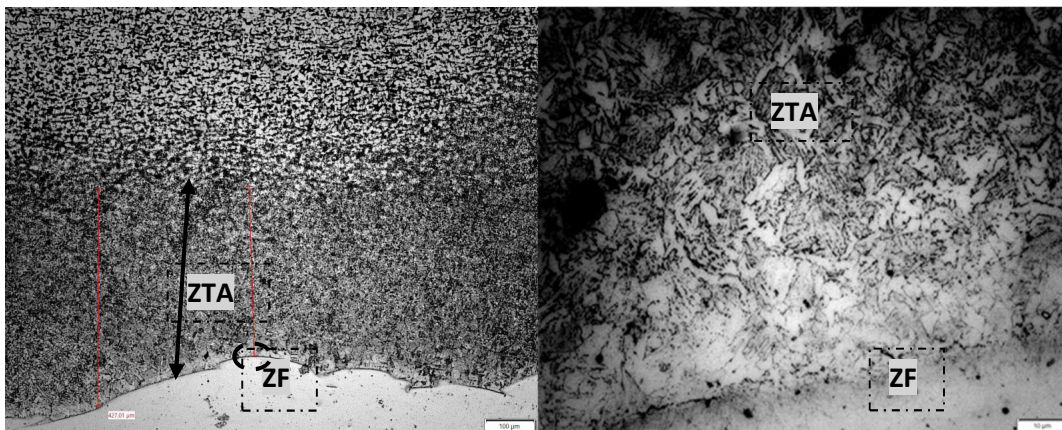


Figura 4.32- Amostra 9A- Micrografia da região da ZF e ZTA- observada microestrutura bruta de fusão na ZF e constituintes típicos de ZTA de alta temperatura. Ataque Nital 2%. Corte transversal. 40X e 400X respectivamente.

As imagens obtidas na maioria das amostras revelam a linha de fusão demarcando o início da ZTA, com pequeno aumento do tamanho dos grãos destas, 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 4.29), 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 evidenciado diferenças significativas entre as amostras.

4.3.2.3. 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), sendo possível observar em sua estrutura grãos de perlita (preto) em matriz ferrítica (branco) (ASM HANDBOOK, 2004), também se observam os contornos de grão do material conforme imagens a seguir (Figuras 4-34 a 4-41) e exemplo indicado na Figura 4.33 (Fonte: Própria).

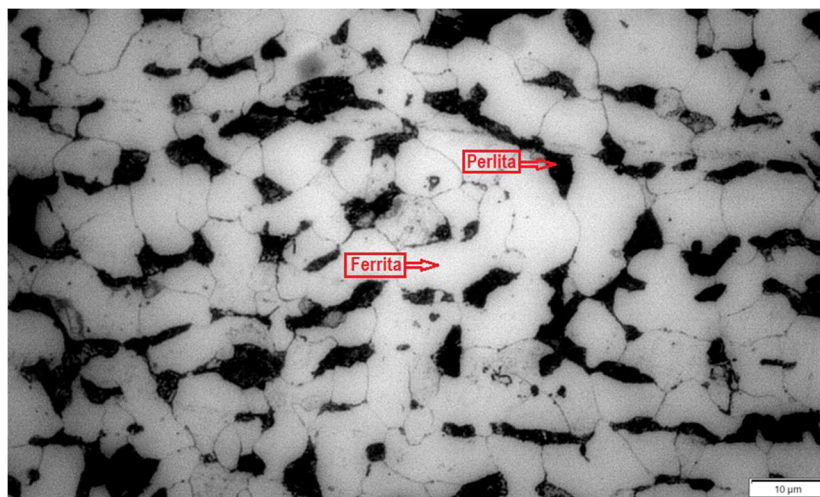


Figura 4.33- Exemplo de morfologia do aço, revelando as regiões da microestrutura perlítica em matriz ferrítica, após revelação com Nital 2% e ampliação 400x. Amostra 9A.

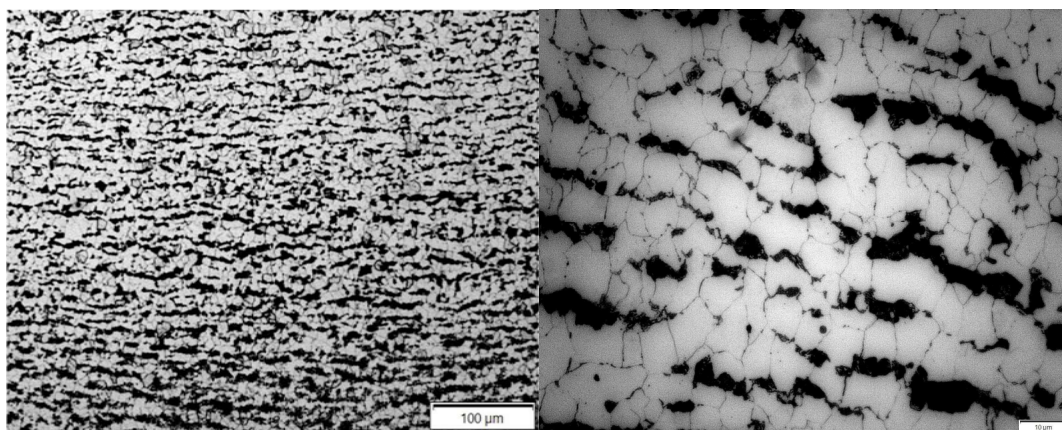


Figura 4.34- Amostra 1A- Micrografia do metal de base em aço carbono: observada microestrutura perlítica em matriz ferrítica, com grãos alinhados. Ataque Nital 2%. Corte transversal. 40X e 400X respectivamente.

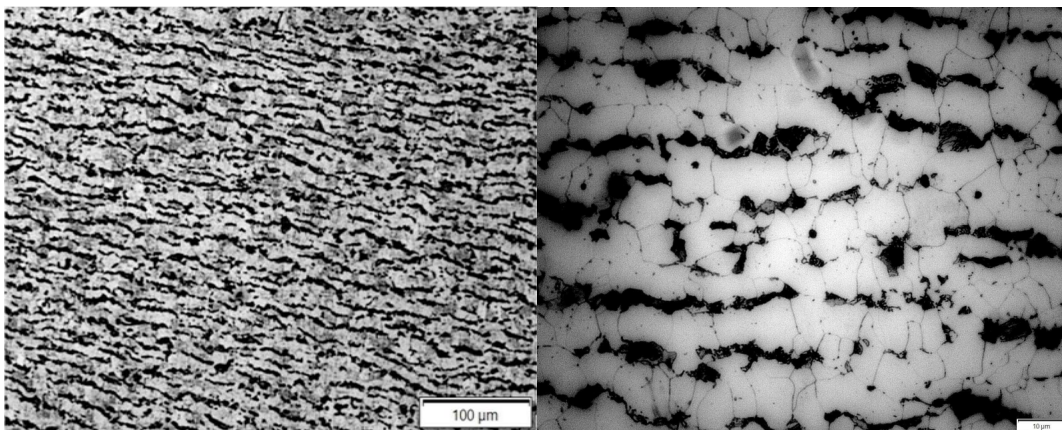


Figura 4.35- Amostra 2B- Micrografia do metal de base em aço carbono; observada microestrutura perlítica em matriz ferrítica, com grãos alinhados. Ataque Nital 2%. Corte transversal. 40X e 400X respectivamente.

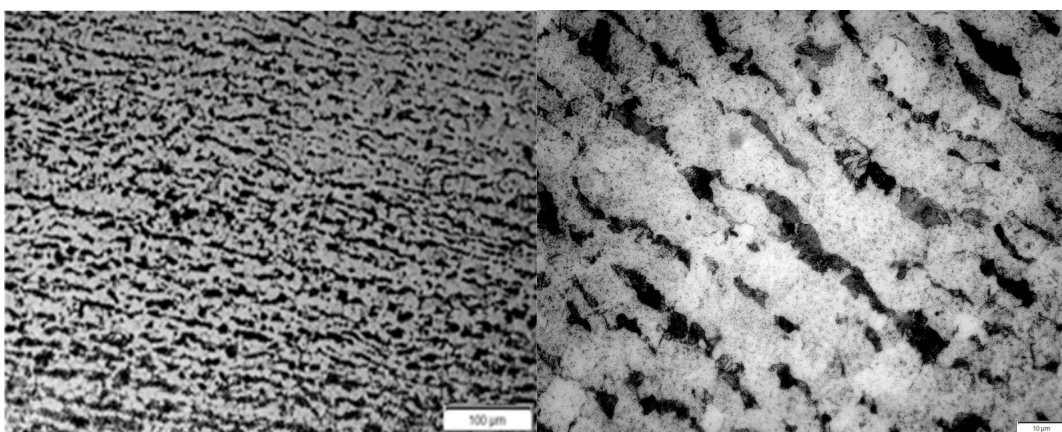


Figura 4.36- Amostra 3B- Micrografia do metal de base em aço carbono; observada microestrutura perlítica em matriz ferrítica, com grãos alinhados. Ataque Nital 2%. Corte transversal. 40X e 400X respectivamente.

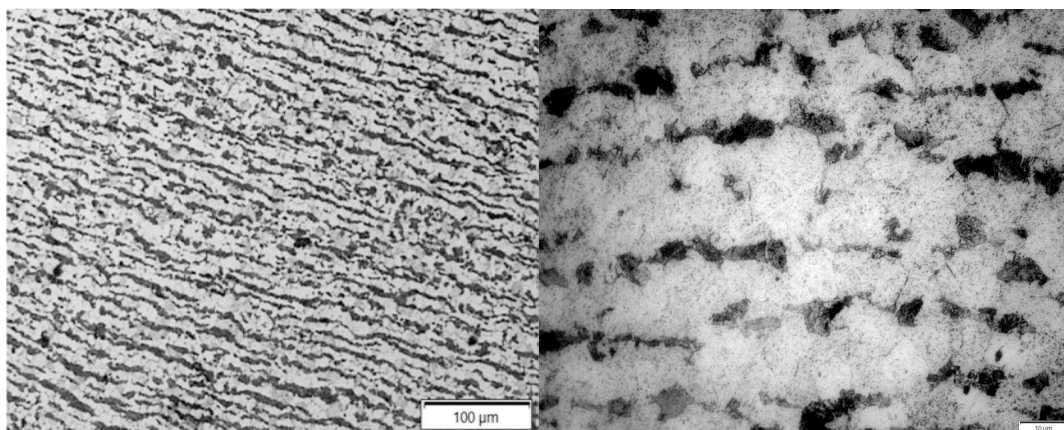


Figura 4.37- Amostra 4B- Micrografia do metal de base em aço carbono; observada microestrutura perlítica em matriz ferrítica, com grãos alinhados. Ataque Nital 2%. Corte transversal. 40X e 400X respectivamente.

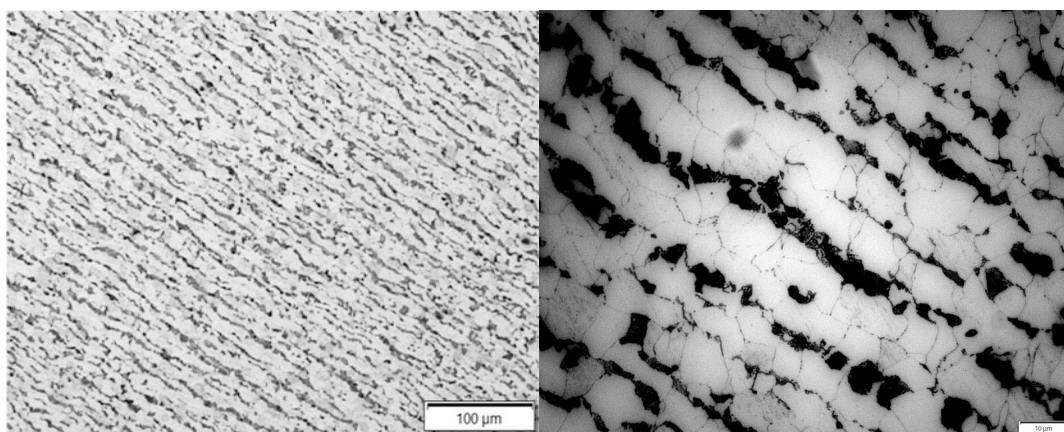


Figura 4.38- Amostra 5A- Micrografia do metal de base em aço carbono; observada microestrutura perlítica em matriz ferrítica, com grãos alinhados. Ataque Nital 2%. Corte transversal. 40X e 400X respectivamente.

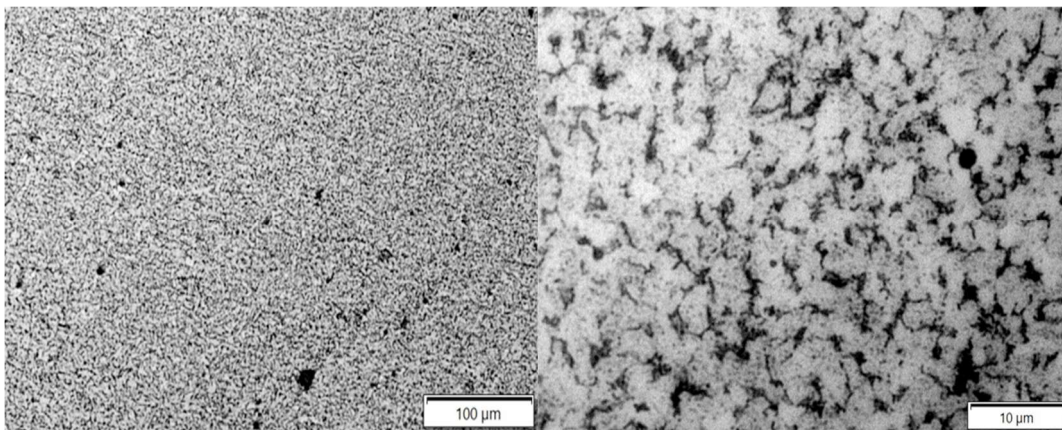


Figura 4.39- Amostra 7D- Micrografia do metal de base em aço carbono: observada microestrutura com granulação grosseira em toda seção transversal, típica de ZTA de alta temperatura. Ataque Nital 2%. Corte transversal. 40X e 400X respectivamente.

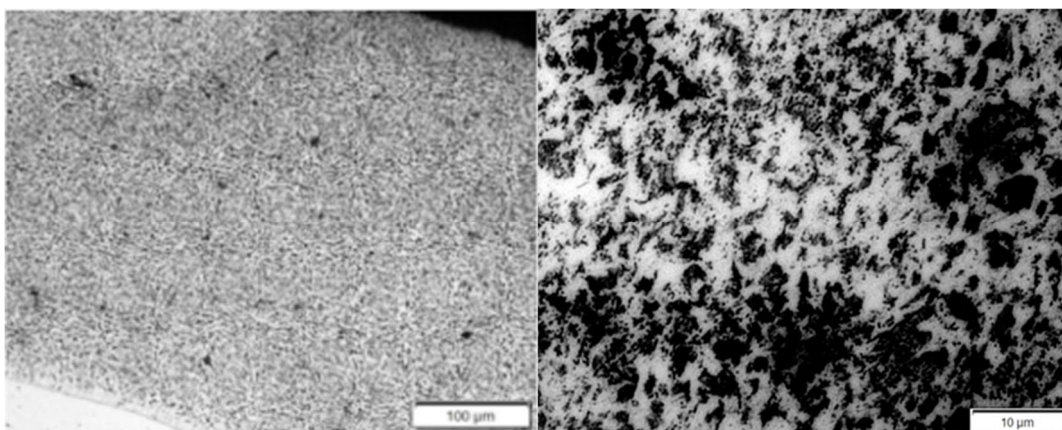


Figura 4.40- Amostra 8A- Micrografia do metal de base em aço carbono: observada microestrutura com granulação grosseira em toda seção transversal, típica de ZTA de alta temperatura. Ataque Nital 2%. Corte transversal. 40X e 400X respectivamente.

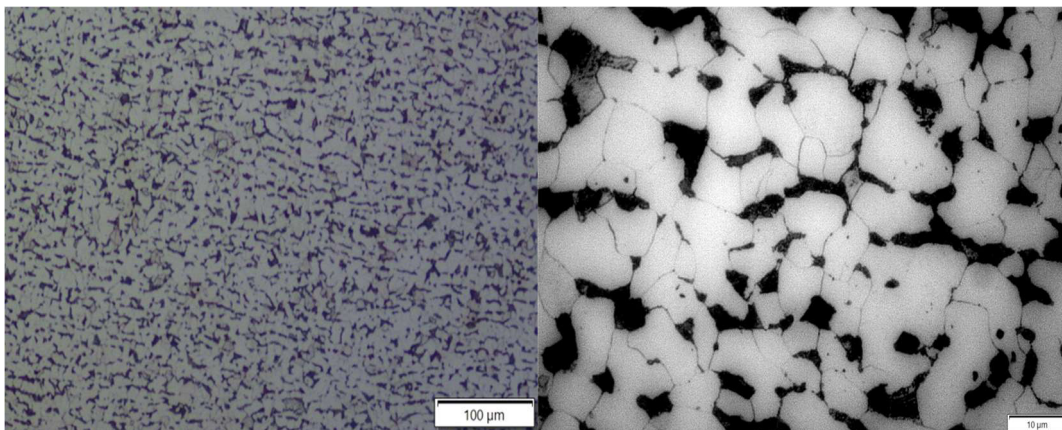


Figura 4.41- Amostra 9A- Micrografia do metal de base em aço carbono: observado grãos de perlita em matriz ferrítica. Ataque Nital 2%. Corte transversal. 40X e 400X respectivamente.

Nas amostras de tubos novos 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 4.39 e 4.40.

Já a microestrutura da amostra do tubo 09, tubo usado, o qual foi utilizado como referência para comparação com as demais amostras feitas a partir de tubos novos, demonstra que ele tem similaridade microestrutural com os outros, sendo notado apenas, pequena diferença em relação a granulação, com menor alinhamento dos grãos. Neste tubo 09, a perlita apresenta-se com leves indícios de esboroamento, o que pode ser explicado, devido a exposição prolongada ao calor, próprio do processo produtivo em que este foi utilizado ao longo das campanhas do equipamento, conforme visto na Figura 4.41.

4.4. Medição de dureza Vickers

A medição da dureza Vickers com carga de 10kgf/cm², foi realizada com o objetivo de avaliar possíveis alterações de resistência mecânica entre as diferentes regiões identificadas, do metal base e do revestimento *overlay*, bem como para comparar propriedades mecânicas entre tubos novos e tubos usados nos testes. Foram realizados três pontos por região, sendo os resultados observados conforme Tabelas 4.4 a 4.11.

Tabela 4.4- Resultado das medidas do ensaio de dureza Vickers do Tubo 01:

AMOSTRA	Metal Base			Média± Desv. Pad.	Overlay			Média± Desv. Pad.
1A	122	122	128	124 ± 3,5	181	181	181	181 ± 0
1B	143	143	135,5	140,5 ± 4,3	170	165	165	166,7 ± 2,9
1C	143	135,5	135,5	138 ± 4,3	143	143	151	145,7 ± 4,6

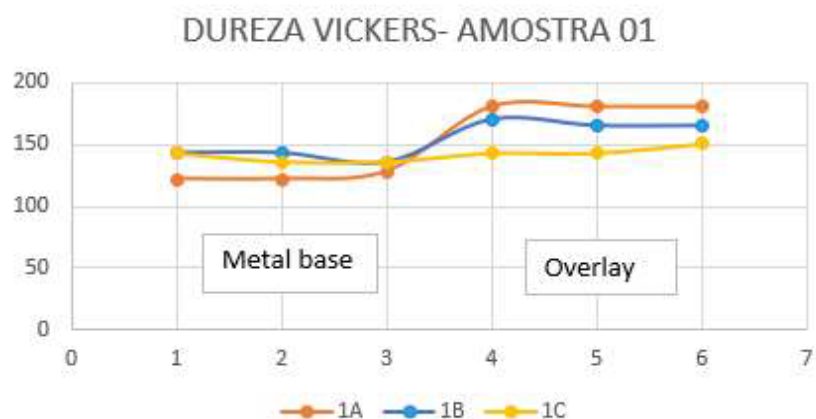


Figura 4.42- Tubo 01- Perfil de dureza medido.

Tabela 4.5- Resultado das medidas do ensaio de dureza Vickers do Tubo 02.

AMOSTRA	Metal Base			Média± Desv. Pad.	Overlay			Média± Desv. Pad.
2A	143	143	151	145,7 ± 4,6	160	165	165	163,3 ± 2,9
2B	128	128	135,5	130,5 ± 4,3	151	151	160	154 ± 5,2
2C	143	135,5	143	140,5 ± 4,3	170	160	170	166,7 ± 5,8

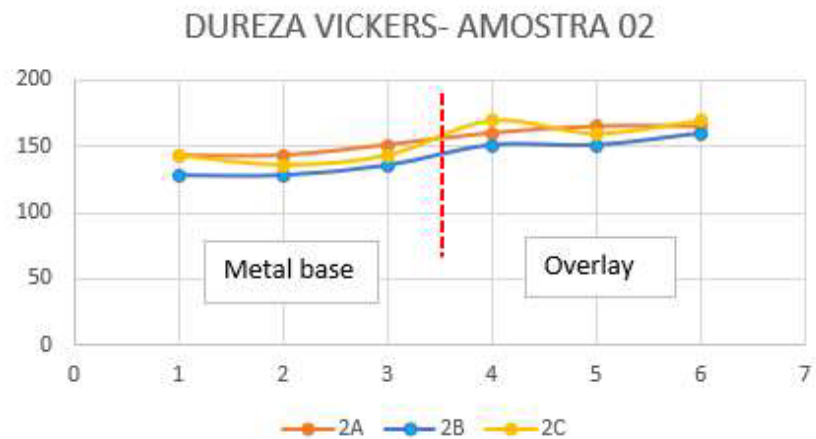


Figura 4.43- Tubo 02- Perfil de dureza medido.

Tabela 4.6- Resultado das medidas do ensaio de dureza Vickers da Tubo 03.

AMOSTRA	Metal Base			Média± Desv. Pad.	Overlay			Média± Desv. Pad.
3A	143	143	151	145,7 ± 4,6	170	170	160	166,7 ± 5,8
3B	160	151	143	151,3 ± 8,5	170	170	160	166,7 ± 5,9
3C	135,5	135,5	144	138,3 ± 4,9	160	160	160	160 ± 0

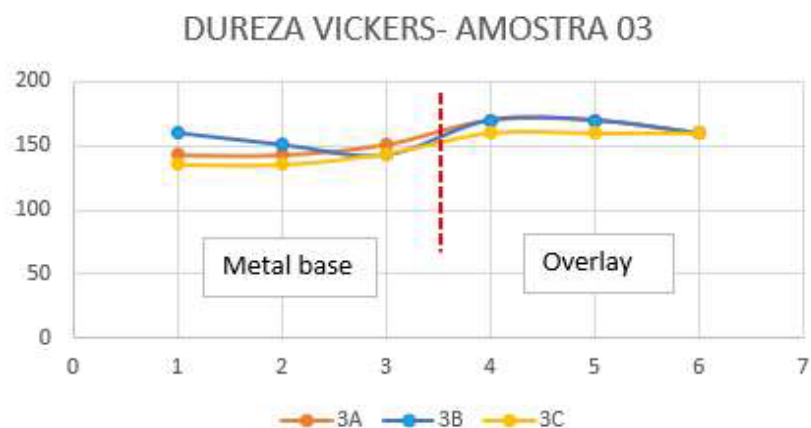


Figura 4.44- Tubo 03- Perfil de dureza medido.

Tabela 4.7- Resultado das medidas do ensaio de dureza Vickers da Tubo 04.

AMOSTRA	Metal Base			Média± Desv. Pad.	Overlay			Média± Desv. Pad.
4A	151	143	143	148,3 ± 4,6	170	170	160	166,7 ± 5,8
4B	135,5	143	143	140,5 ± 4,3	170	170	160	166,7 ± 5,8
4C	143	143	151	145,7 ± 4,6	160	160	160	160 ± 0

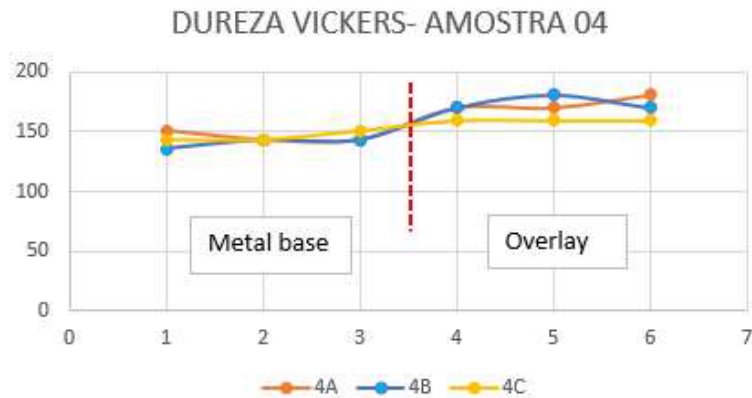


Figura 4.45- Tubo 04- Perfil de dureza medido.

Tabela 4.8- Resultado das medidas do ensaio de dureza Vickers da Tubo 05.

AMOSTRA	Metal Base			Média± Desv. Pad.	Overlay			Média± Desv. Pad.
5A	155	151	151	152,3 ± 2,3	170	170	160	166,7 ± 5,8
5B	143	143	140	142,0 ± 1,7	170	170	160	166,7 ± 5,8
5C	143	151	151	148,3 ± 4,6	160	160	160	160 ± 0

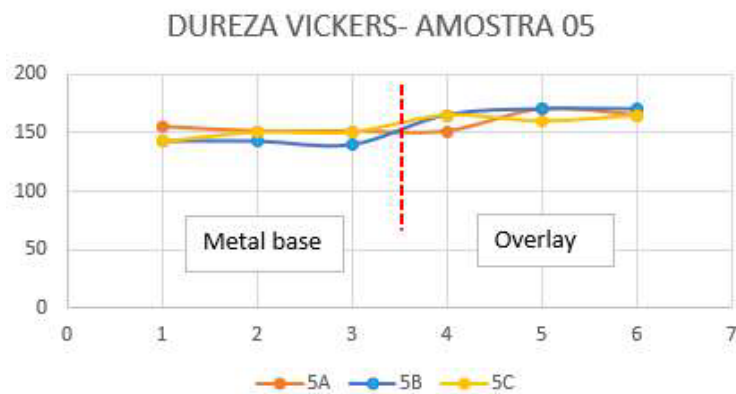


Figura 4.46- Tubo 05- Perfil de dureza medido.

Tabela 4.9- Resultado das medidas do ensaio de dureza Vickers do Tubo 07.

AMOSTRA	Metal Base			Média± Desv. Pad.	Overlay			Média± Desv. Pad.
7C	181	170	170	173,7 ± 6,4	170	170	170	170 ± 0,0

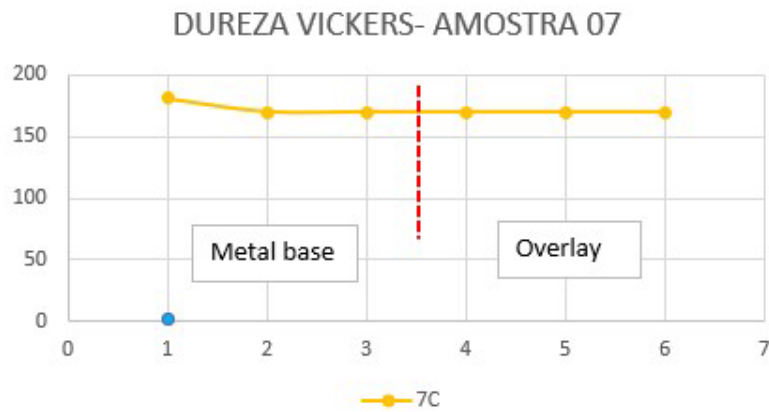


Figura 4.47- Tubo 07- Perfil de dureza medido.

Tabela 4.10- Resultado das medidas do ensaio de dureza Vickers do Tubo 08.

AMOSTRA	Metal Base			Média± Desv. Pad.	Overlay			Média± Desv. Pad.
8A	160	160	170	163,3 ± 5,8	170	170	181	173,7 ± 6,4
8B	160	151	151	154,0 ± 5,2	274	181	181	212 ± 53,7

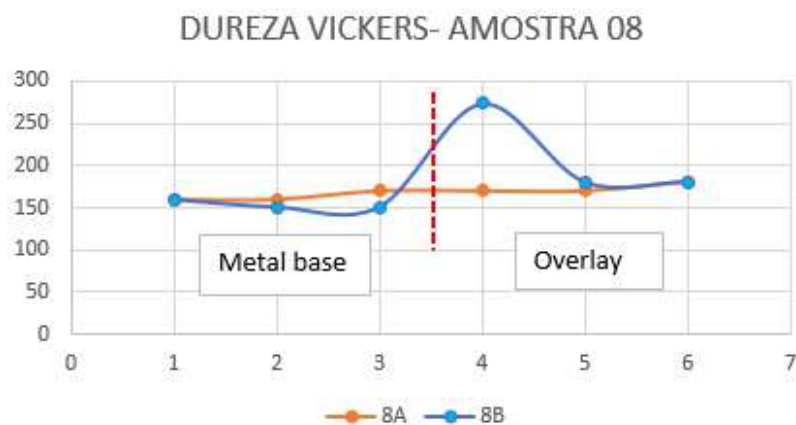


Figura 4.48- Tubo 08- Perfil de dureza medido.

Tabela 4.11- Resultado das medidas do ensaio de dureza Vickers do Tubo 09.

AMOSTRA	Metal Base			Média± Desv. Pad.	Overlay			Média± Desv. Pad.
9A	116	116	116	116,0 ± 0,0	183	183	196	187,3 ± 7,5

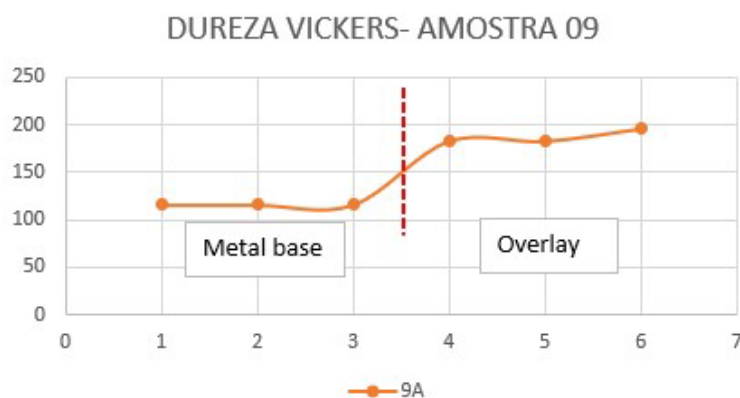


Figura 4.49- Tubo 09- Perfil de dureza medido.

Conforme observado nas tabelas 4.4 a 4.11, 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. Isso pode ser explicado devido ao tempo de operação dele, o qual pode ter ocorrido envelhecimento metalúrgico inerente à temperatura de operação.

Já nos resultados apresentados em relação a região do overlay, observa-se valores muito parecidos para as amostras, estando quase todas abaixo de 190 HV. 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)

Capítulo 5 - Conclusões

Neste trabalho, foi desenvolvido uma metodologia para avaliação da confiabilidade do atual procedimento utilizado pela manutenção, para recomposição de espessura por *weld overlay*, em tubos da região da fornalha baixa de caldeiras de recuperação química. Para isso, foram utilizados tubos novos e usados, onde foram simulados desgastes, através da remoção do *overlay* e exposição do metal de base em aço carbono, onde posteriormente foram realizados a recomposição de espessura das amostras. Por meio de análise metalográfica, de medição de espessura residual e ensaio de dureza, aliado à pesquisa em literaturas diversas sobre possíveis mecanismos de danos, foi possível estabelecer pré-requisitos e sugerir cuidados específicos para a realização dos reparos em tubos com este tipo de revestimento de proteção, em aço inoxidável ferrítico 18%Cr.

A análise dos dados e resultados obtidos, permitiram chegar às seguintes conclusões:

- A dificuldade na medição de espessura de forma adequada existe, porém, pode-se tentar contornar este item através da utilização de possíveis tecnologias de customização dos cabeçotes. Neste ponto, vale reforçar, que a definição quanto a possibilidade do reparo, deve ser feita por equipe técnica experiente e qualificada neste tipo de inspeção. Quando houver dúvidas, o PLH deve manter uma atitude conservadora e recomendar a substituição do trecho em questão, minimizando assim os riscos de problemas durante a campanha;
- Não foram observadas diferenças significativas quanto aos resultados dos dois soldadores, ainda assim, a experiência e qualificação dos profissionais para este tipo de reparo deve ser priorizada, visto a conhecida dificuldade de soldagem do aço inoxidável ferrítico. 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 consequentemente 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.
- A área em que foi realizado o reparo com solda nas amostras, demonstra um pequeno aumento da dureza em relação ao metal base não reparado do tubo usado, porém ainda dentro de valores satisfatórios. Esse menor valor obtido para a amostra do tubo 09, usado como referência comparativa, pode ser explicado pelo tempo de operação em altas temperaturas, o qual leva a um provável envelhecimento metalúrgico no aço carbono do metal de base, porém, como já mencionado, dentro do aceitável;

Os resultados mostraram, que o procedimento atual de recomposição de espessura dos tubos com *overlay*, da fornalha de caldeiras de recuperação, não revelou nenhuma preocupação relevante dentro do que foi estudado (espessura de reparo, microestrutura e dureza) e do que é realizado atualmente. Assim, pode ser considerado seguro, desde que realizado por equipe qualificada, podendo servir de base para justificar a escolha pelo reparo ao invés da substituição de trechos. Assim, existe um ganho na economia de tempo e dinheiro durante as intervenções de manutenção, além da segurança de pessoas e das instalações, pelo menor tempo de exposição destes durante as atividades.

Capítulo 6 - Sugestões para trabalhos futuros

Como sugestão para trabalhos futuros, têm-se:

- Realizar análise microestrutural através do MEV em amostras de tubos removidas da caldeira de recuperação que passaram por reparo semelhante para verificação da microestrutura reparada e possíveis fases secundárias deletérias, devido a exposição prolongada em altas temperaturas;
- Avaliar a viabilidade de realização de ensaio de ultrassom neste tipo de situação, no intuito de melhorar o controle de qualidade das soldas realizadas em campo ou realizar ensaios adicionais em amostras de tubos que operaram com trechos reparados, para avaliar o efeito da reposição de espessura por soldagem em relação a outros mecanismos de dano, como fadiga térmica, fragilização por fase sigma, corrosão sob tensão, corrosão do lado água etc.

Referências Bibliográficas

API RECOMMENDED PRACTICE 571, **Damage Mechanisms Affecting Fixed Equipment in the Refining Industry**, THIRD EDITION, MARCH 2020.

ASM HANDBOOK, Vol. 9, **Metallography and Microstructures**. First printing edition, ASTM International, 2004.

ASME **Boiler and Pressure Vessel Code** - Section IX, 2021.

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

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

BARTHOLOMEW R. D., POWEL S. T., **Kraft Recovery Boilers Short Course - Recovery boiler water treatment**, Maryland, USA: TAPPI, 2007.

BAUER, A. D., LUNDBERG, M. **Choosing materials to solve corrosion problems in the pulp and paper industry. Anti-Corrosion Methods and Materials**, Sandiviken, 44, 3, 161-169, 1997.

BLRBAC - Black Liquor Recovery Boiler Advisory Committee - **Minutes of Meeting, Virtual Teams Presentation April 6 & 7, 2021**. Disponível online em: <https://blrbac.files.wordpress.com/2021/07/2021-april-meeting-minutes-1.pdf> > Acessado em 12/09/2021.

BRAMFITT, B., L., Benschoter, A. O., **Metallographers's Guide, Practices and Procedures for Irons and Steels**, ASTM International, 2002.

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.

FARIA, R. F., FRANÇA, M.A.S., HERMENEGILDO, T.F.C., **Recovery Boiler Advanced Materials, Proceedings of the ABTCP**, 2012.

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).

GUIMARÃES, M. A. **Novo método para determinação da quantidade de recirculação de cinzas nas caldeiras de recuperação**. Viçosa: Universidade Federal de Viçosa, 2013. 53p. (Dissertação, Mestrado Profissional em Tecnologia de Celulose e Papel).

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.

HSIEH, C. C., WU.W., **Overview of Intermetallic Sigma (σ) Phase Precipitation in Stainless Steels**, Taiwan, 2012.

INSPESOLDA, <https://inspesolda.com/qualificacao-dos-procedimentos-de-soldagem/>
Acessado em junho de 2023.

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

KUBASCHEWSKI, O. **Iron-binary phase diagrams**, Springer Berlin Heidelberg, 185 p. 1982.

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.

MARQUES, P. V., MODENESI, P. J., BRACARENSE, A.Q. **Soldagem- Fundamentos e Tecnologia**. 3ª edição, Belo Horizonte: 2011. 141- 142p.

MEYER, J. **Recovery boiler superheater corrosion – solubility of metal oxides in molten salt**. Atlanta: Georgia Institute of Technology, 2012. 133p. (Dissertação, Mestrado em Engenharia e Ciências dos Materiais).

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

N-133, **NORMA TÉCNICA PETROBRAS**, 2015.

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.

PELLICIONE, A. S., MORAES, F.M., GALVÃO, J. L. R., **Análise de falha em equipamentos de processo- Mecanismos de danos e casos práticos**, 2º edição, Editora Interciência, 2014.

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.

R. D. BARTHOLOMEW e S. T. POWEL, **Kraft Recovery Boilers Short Course - Recovery boiler water treatment**, Maryland, USA: TAPPI, 2007.

SANTOS, O., QUINTINO, L. **Processos de Soldadura**, ISQ - Edições Técnicas, 1993.

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

SINGH, P. M. e MAHMOOD, J., **Stress Assisted Corrosion of Waterwall Tubes in Recovery Boiler**, ASM, 2007.

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).

VAKKILAINEN, E. K. **Kraft Recovery Boilers – Principles and Practice, second printing, Helsinki University of technology**, Energy Engineering and Environmental Protection, 2007.

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

VENKATRAMAN, M., PAVITRA, K., VIJAYA, J. **Manufacturing and critical applications of stainless steel- An Overview**, Advanced Materials Research Vol. 794, (2013).

VERHAEGHE, G., RAGHUNATHAN, S., "CRA Weld Overlay," TWI, [Online]. Available: <https://www.twi-global.com/technical-knowledge/published-papers/cra-weld-overlay-influence-of-welding-process-and-parameters-on-dilution-and-corrosion-resistance> . Acessado em janeiro de 2023.

TELLES, Pedro C. Silva. **Materiais para equipamentos de processo**- 6.ed.- Rio de Janeiro- Editora Interciência- 2003.

TRAN, H. N, BARHAM, D, HUPA, M. **Fireside Corrosion in Kraft Recovery Boilers. An Overview**. Environment Treatment and Control, 40-45, July 1988

TRINDADE, V. B. **Corrosão de ligas metálicas em altas temperaturas**. 1ª edição. Vila Velha: Above Publicações, 2013. 192 p.

WAINER, E., BRANDI, S. D., MELLO, F. D. H. **Soldagem- Processos e Metalurgia**. 4ª edição. Editora Edgard Blucher Ltda, 2004.

ANEXOS

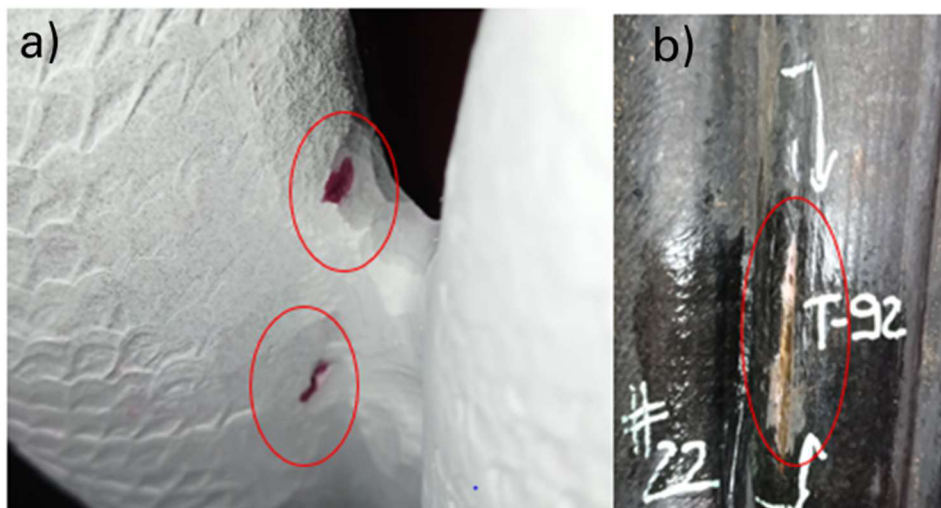
- ANEXO A- REGISTRO FOTOGRÁFICO COMPLEMENTAR
- ANEXO B- PROCEDIMIENTO DE REPARO
- ANEXO C- EXEMPLO DE MEMORIAL DE CÁLCULO DE ESPESSURA MÍNIMA PARA OS TUBOS;

ANEXO A- REGISTRO FOTOGRÁFICO COMPLEMENTAR

- Detalhe de alguns danos encontrados em tubos com overlay na região da fornalha baixa:



A1- Vista de descontinuidade (trinca) no overlay da região da membrana, a qual precisa ser removida para que não propague e atinja o aço carbono.



A2- a) Detalhe de trincas na superfície do tubo. O risco é destas trincas migrarem para o metal de base em aço carbono, daí a necessidade de remoção quando identificadas na inspeção; b) Detalhe de desgaste em ponto que apresentava desgaste por corrosão localizada, não permitindo acoplamento adequado do cabeçote do medidor de espessura, o qual necessita ser avaliado durante as inspeções.



A3- Detalhe do eletrodo utilizado para a realização dos reparos no overlay em campo.



A4- Detalhe da preparação dos corpos de prova.



A5- Detalhe do desbaste e recomposição com solda.



A6- Detalhe de trecho com recomposição do revestimento e posterior identificação para corte das amostras. Fonte: Própria.



A7- Detalhe da identificação para corte das amostras, após recomposição do revestimento.



A8- Idem anterior.



A9- Detalhe de macro nas amostras (4B,5C,1A respectivamente). Fonte: Própria.



A10- Detalhe de macro nas amostras (3B,5A,2A respectivamente). Fonte: Própria.

A11- Resultado da análise de liga superficial das amostras, com os demais elementos encontrados no ensaio.

AMOSTRA	Cr	Mo	Nb	Cu	Ni	Co	Fe	Mn	V	Ti	Si
1A	15,397	0,024	0,687	0,029	< LOD	< LOD	82,572	0,49	0,068	0,343	0,192
1B	15,478	0,042	1,101	0,04	0,141	< LOD	82,287	0,35	0,056	0,145	0,214
1C	15,522	0,044	1,106	0,041	0,142	0,156	82,284	0,343	0,048	0,124	0,182
2A	15,52	0,039	0,956	0,04	0,115	< LOD	82,344	0,415	0,065	0,2	0,177
2B	15,39	0,025	0,702	0,032	0,088	< LOD	82,538	0,509	0,056	0,262	0,197
2C	17,165	0,026	0,838	0,037	0,091	< LOD	80,506	0,503	0,061	0,306	0,24
3A	15,047	0,043	1,061	0,041	0,106	0,158	82,828	0,381	0,064	0,066	0,165
3B	16,131	0,025	0,734	0,022	< LOD	0,172	81,75	0,545	0,072	0,306	0,201
3C	15,538	0,043	1,054	0,057	0,629	< LOD	81,463	0,381	0,053	0,361	0,245
4A	15,172	0,024	0,697	0,026	< LOD	0,182	82,858	0,515	0,07	0,242	0,174
4B	15,31	0,042	1,075	0,021	0,127	< LOD	82,529	0,399	0,055	0,116	0,176
4C	15,223	0,044	1,205	0,041	0,134	0,245	80,92	0,458	0,046	0,238	0,343
5A	15,762	0,037	1,028	0,048	0,137	0,178	81,821	0,429	0,068	0,189	0,225
5B	16,098	0,036	1,036	0,041	0,13	0,169	81,448	0,448	0,071	0,212	0,233
5C	15,525	0,045	1,08	0,034	0,151	< LOD	82,251	0,365	0,06	0,164	0,188
7D	15,358	0,043	1,105	0,032	0,143	0,173	82,135	0,441	0,059	0,218	0,236
8A	15,489	0,003	0,713	0,029	0,103	0,14	82,575	0,435	0,068	0,208	0,176
8B	12,385	< LOD	0,592	0,027	< LOD	< LOD	86,041	0,54	0,075	0,15	0,144
9A	17,176	0,023	0,678	0,023	0,098	< LOD	80,893	0,479	0,068	0,267	0,168

ANEXO B- PROCEDIMENTOS DE SOLDAGEM

- REQUISITOS DE QUALIFICAÇÃO DO PROCEDIMENTO DE SOLDAGEM;

PROCESSO DE SOLDAGEM: Welding Process		ER SMAW	TIPO: Manual Type: Manual
EPS UTILIZADA: WPS utilized	REVISÃO: Revision	0	NORMA: Code
MATERIAL BASE SOLDADO: Welded base metal		A210-A1	ESPESSURA: 5,0 mm Thickness

Variáveis Variables	Parâmetros da qualificação Qualification Parameters	Faixa Qualificada Qualified Range
Cobre Junta Backing	Com With	Com cobre-junta With backing
P número P Number	1	1 a 11, 34 e 41 a 49 1 to 11, 34 and 41 to 49
Espessura - Solda em chanfro Thickness - Groove weld	5,0 mm	≥ 5,0 mm
Espessura - Solda em ângulo Thickness - Fillet weld	N.A.	Todas All
Diâmetro - Solda em chanfro Diameter - Groove weld	63,5 mm	Ø ≥ 25,0 mm
Diâmetro - Solda em ângulo Diameter - Fillet weld	N.A.	Todas All
Especificação (SFA) Specification	5.4	Ver Fnº, abaixo See F number below
Classificação AWS AWS Classification	CR-43CBS	Ver Fnº, abaixo See F number below
F número F number	4	1 a 4
Posição Position	6G	Todas All
Progressão Progression	Ascendente Uphill	Ascendente Uphill
Gás de Proteção Shielding gas	N.A.	N.A.
Gás de Purga Backinng gas	Sem Without	Com ou sem gás de purga With or without backing gas
Tipo e Polaridade da corrente elétrica Electrical current kind and polarity	CC+	CC+CA
Modo de transferência Transfer mode	N.A.	N.A.

Ensaio Visual	Aprovado	Nº do relatório: Report number	1
Ensaio Radiográfico: Radiographic examination	N.A.	Nº do relatório: Report number	N/A
Teste de Dobramento Guiado: Guided bend test	Aprovado	Nº do relatório: Report number	

Observação: Nota	Qualificado para soldagem de Overlay
---------------------	--------------------------------------

Certificamos que o descrito neste registro está correto, e que todos os cupons de teste foram preparados, soldados e testados de acordo com os requisitos da norma ASME Section IX.

- EXEMPLO DE INSTRUÇÃO DE SOLDAGEM APLICADA;

SOLDA DE REVESTIMENTO 18 Cr

PAREDE DA FORNALHA

1 – Esquema:

2 – Procedimento de Soldagem:

Item		Tubo (A-210-A1)	Aleta (A-36)
		Região de solda topo	Região de fenda
Eletrodo	—	—	—
	18 Cr	CR43 Cbs (Kobesteel)	CR43 Cbs
Amperagem	Ø 3,2 mm	Seguir instrução de soldagem	Seguir instrução de soldagem
	Ø 2,5 mm		
Pré Aquecimento		Seguir instrução de soldagem	Seguir instrução de soldagem
Posição de Soldagem		Horizontal	Vertical

3 – Instrução para soldagem:

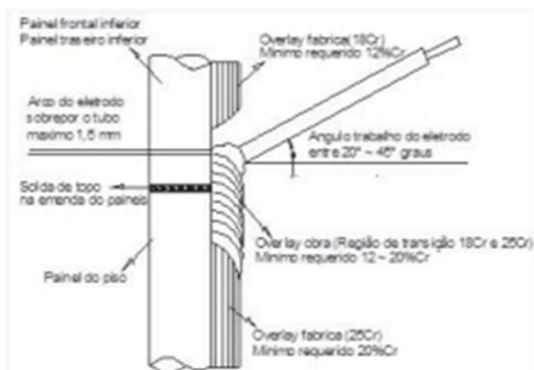
- Como a soldagem do revestimento de overlay é feita pelo lado interno da fornalha, a região da emenda dos tubos tende a empenar para o lado externo. Para minimizar o empenamento seguir a sequência ao lado:

3.1 – Sequência de soldagem de revestimento de overlay:

- Para evitar que surja empenamento localizado, não efetuar solda contínua. Usar a sequência de soldagem intercalada.

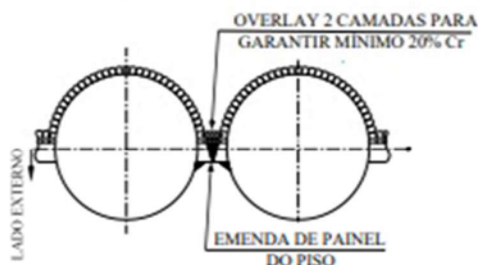
Para as soldas de reparo em campo, adotar as recomendações a seguir:

- Para atingir a espessura de 3,0 mm de overlay seguir os parâmetros abaixo.



Com a corrente de soldagem entre 75 ~ 85 amperes, consegue-se atingir uma porcentagem de cromo maior, entre 16 ~ 20% Cr, porém com correntes maiores que 90 amperes a porcentagem de cromo diminui acentuadamente chegando a 13%Cr, isto é, uma variável de soldador para soldador.

- Revestimento de overlay na emenda dos painéis do piso



3.2 – Espessura de Revestimento:

- Garantir a espessura de revestimento mínimo de 3,0 mm da superfície externa do tubo.

3.3 – Inspeção:

- Executar inspeção por líquido penetrante, critério de aceitação isento de descontinuidade.

● ESPECIFICAÇÃO DO PROCEDIMENTO DE SOLDAGEM (RESUMIDO)

Supporting P.Q.R.	SMAW - MANUAL		
Processos de Welding Process (ES)	SMAW		Tipos: Types (Manual, Automatic, Machine, Semi-Auto)
JUNTAS (QW-402) - JOINTS		METAIS DE BASE (QW-403) - BASE METALS	
Tipo da Junta: Joint Desing	Conforme desenho As drawing	P. n° 1	Grupo n° NA
Detalhe da junta: Detail of joints	Conforme desenho As drawing	P. n° NA(DEP)	Grupo n° NA
Cobre junta: Backing	SMAW - SIM	A. química e prop. mecânicos Chem. analysis and mech. prop.	
Tipo do mat. do cobre junta: Type of backing material		FAIXA DE ESPESSURA - THICKNESS RANGE (mm)	
Outros Others	NA	Metal base Base metal	Chanfro Groove 0,00 - 0,00 Filete ^{NA} Filet NA
ELETRODOS (QW-404) - FILLER METALS		Faixa ø tubo Pipe dia. range	Chanfro Groove NA Filete ^{NA} Filet NA
F. n°	SMAW - NA	Outros Others	NA
A. n°	SMAW - NA	Outros Others	NA
Especificação n° SFA	SMAW - NA	AWS n°	SMAW - NA
Espeçura do metal depositado máximo (mm) Deposited weld metal thickness	SMAW - NA		
Chanfro Groove	SMAW - 2.0		
Filete Filet	SMAW - 2.0		
Classificação do fluxo - eletrodo Electrode flux class	SMAW - NA		
Tamanho da partícula Particle Size	SMAW - NA		
Nome coml. fluxo Flux trade name	SMAW - NA		
Inserto consumível Consumable insert	SMAW - NA		
Marca Mark	SMAW - WEL MW 25Nbs		
Outros Others	NA		
		POSICÃO (QW-405) - POSITION	
		Posição do chanfro Groove position	SMAW - NA
		Progressão da Soldagem Weld progression	SMAW - NA
		Posição do Filete Filet position	SMAW - TODAS
		Outros Others	NA
		PRÉ-AQUECIMENTO (QW-406) - PREHEAT	
		Temp. de Pré-aquecimento (min) Preheat temperature min	16°C
		Temperatura entre passes (max) Interpass temperature	150°C
		Manutenção de Pré-Aquecimento Preheat maintence	NA
		Outros Others	NA
		TRAT. TÉRMICO PÓS-SOLDAGEM (QW-407) POSTWELD HEAT TRATMENT	
		Temperatura Temperature	NA
		Tempo de permanência Holding Time	NA
		Outros Others	NA

GÁS (QW-408) -		CARACTERÍSTICAS ELÉTRICAS (QW-409) - ELECTRICAL CHARACTERISTICS					
Gás(es) de proteção: Shielding gas(es)	SMAW - NA	Corrente CC			Polaridade: INVERSA		
Composição do Gás %: Percent composition	SMAW - NA	Camada Solda	Processo	Diâm. Eletrodo	Amper (A)	Volts (V)	Velocidade de Soldagem
Proporção do Fluxo: Flow rate	SMAW - 0 - 0 V/min	1 E ACIMA	SMAW	2.5 mm	70 a 90	24 a 26	NA
Gás de proteção interna: Gas backing	NA						
Composição do gás de proteção interna %: Gas backing composition	0,000						
Gás auxiliar: Trailing	NA						
Outros: NA Others							
TÉCNICA (QW-410) - TECHNIQUE							
Passo: String or Weave	RETILÍNEO						
Tamanho do orifício ou copa do gás: Orifice or gas cup size	SMAW - NA - NA mm						
Limpeza inicial entre passes: Initial and interpass	ESCOVAMANETO						
Método de escarificação: Back Gouging	NA	Tamanho e tipo do eletrodo de tungstênio: Tungsten el. size and type		NA			
Oscilação: Oscillation	SMAW - NA	Método de transf. de mat. p/ GMAW / FCAW Mode of metal transfer for GMAW / FCAW		SMAW - NA			
Distância do tubo de contato ao trabalho Contact tube to work	NA	Outros: NA Others		CONFORME DESENHO (AS DRAWING)			
Eletrodos: Multipass or Single pass	SIMPLES						
Alívio por martelamento: Multipass or Single pass	NA						
Outros: NA Others							

● ANEXO C- EXEMPLO DE MEMORIAL DE CÁLCULO DE ESPESSURA
MÍNIMA PARA OS TUBOS;

Name: FURNACE LOWER SECTION - FRONT WALL
Draw. no:
Part:

ASME BPVC Section I Edition 2015
WALL THICKNESS OF THE TUBE, INTERNAL PRESSURE, PG-27.2.1.

Maximum allowable working pressure	$P_o =$	111	bar
Hydrostatic head	$P_h =$	0	bar
Design pressure	$P =$	111	bar
Maximum allowable working temperature	$T_o =$	320	°C
Temperature allowance	$dT =$	50	°C
Design temperature	$T =$	370.0	°C

Tube:	Material	Overlay 18%Cr / SA210 Gr. A1
	Allowable stress	$S = 107.40$ N/mm ²
	Outside diameter	$D = 63.5$ mm
	Wall thickness	$s_{N1} = 4.88$ mm
	Undertolerance	$c_1 = 0$ % (=0 mm)
	Corrosion allowance	$c_2 = 0$ mm
	Factor for expanded tube ends	$e = 0$ mm
	Weld strength reduction factor	$w = 1$
	Austenitic steel thickness + allowance	$c_3 = 2.25$ mm
Bend:	Bending radius	$R = 95$ mm
	Bends equal strength (yes=0/no=1)	1 -

Results:

Tube:	Minimum wall thickness w/o allowances	$t = 3.44$ mm	PG-27.2.1
	Chosen wall thickness w/o allowances	$s_n = 4.88$ mm	OK!
	Minimum wall + corrosion allowance c_2	$t+c_2 = 3.44$ mm	
	Chosen wall w/o undertolerance	$s_n+c_2 = 4.88$ mm	
	Excess wall thickness	$s_n-t = 1.44$ mm	

	Maximum pressure (chosen wall)	$P_{max} = 166.3$ bar	PG-27.2.1
	Minimum allowable stress (chosen wall)	$S_{min} = 71.7$ N/mm ²	
	Inside diameter (chosen nominal wall)	$d = 53.7$ mm	
	Inside diameter (chosen wall w/o allowances)	$d = 53.7$ mm	

$$D/2s_n = 9.24 \quad -$$

$$R/s_n = 27.63 \quad -$$

$$R/D = 1.50 \quad -$$

$$s_n/D = 0.05 \quad -$$

$$r/S_n = 27.82 \quad -$$

$$B_o = 0.870 \quad -$$

$$B_i = 1.239 \quad -$$

$$e = 12.0 \quad \%$$

Only Carbon steel layer

$$t_o+c_2 = 2.99 \quad \text{mm}$$

$$t_i+c_2 = 4.26 \quad \text{mm}$$

Combined layers

$$t_o+c_3 = 5.24 \quad \text{mm}$$

$$t_i+c_3 = 6.51 \quad \text{mm}$$

Hydrostatic Test:

$$P_{ht} = 166.50 \quad \text{bar} \quad \text{PG-99}$$

$$Y = 255.00 \quad \text{N/mm}^2$$

$$S_{hyd} = 107.54 \quad \text{N/mm}^2$$

$$S_{max} = 229.50 \quad \text{N/mm}^2 \quad \text{OK!}$$