

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS - UFMG
ESCOLA DE ENGENHARIA UFMG
Especialização em Engenharia de Soldagem

Vitor Garcia Milholi

ESTUDO DE CASO: REPARO DE TUBULÃO DE CALDEIRA AQUATUBULAR
POR PROCESSO DE SOLDAGEM.

Belo Horizonte
2025

Vitor Garcia Milholi

**ESTUDO DE CASO: REPARO DE TUBULÃO DE CALDEIRA AQUATUBULAR
POR PROCESSO DE SOLDAGEM.**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Especialização em Soldagem da Universidade Federal de Minas Gerais como requisito para a obtenção do título de Engenheiro de Soldagem.

Orientador: Reginaldo Matias Nunes

Belo Horizonte
2025

M644e

Milholi, Vitor Garcia.

Estudo de caso [recurso eletrônico] : reparo de tubulão de caldeira aquatubular por processo de soldagem / Vitor Garcia Milholi. - 2025.
1 recurso online (31 f.: il., color.) : pdf.

Orientador: Reginaldo Matias Nunes.

“Monografia apresentada ao Curso de Especialização em Engenharia da Soldagem da Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais”

Inclui bibliografia.

1. Soldagem. 2. Testes não-destrutivos. 3. Caldeiras a vapor.
4. Inspeção. I. Nunes, Reginaldo Matias. II. Universidade Federal de Minas Gerais. Escola de Engenharia. III. Título.

CDU: 621.791



Universidade Federal de Minas Gerais
Escola de Engenharia
Departamento de Engenharia Mecânica
Programa de Pós-Graduação
Curso de Especialização em Soldagem



ATA DE DEFESA DE MONOGRAFIA DE ESPECIALIZAÇÃO

No dia **16/01/2026**, às **15:00 h**, a Comissão Examinadora se reuniu remotamente para avaliar o trabalho:

Título: Estudo de Caso: Reparo de Tubulão de caldeira aquatubular por processo de Soldagem.

Nome Completo Aluno: Vitor Garcia Milholi

Nº da Matrícula na UFMG: 2024672323


Local: Remotamente via plataforma "TEAMS".

Parecer:


A Comissão Examinadora, após a apresentação pelo (a) candidato (a) durante 30 minutos e após ter argüido o(a) candidato(a) por 20 minutos, é de parecer **FAVORÁVEL** à aprovação do trabalho de monografia com a nota final de **80 pontos** e **com** sugestões de modificação.

Sugere-se o prazo de 30 dias para efetuar-se as modificações sugeridas com revisão final acompanhada e homologada pelo orientador **Reginaldo M. Nunes**.


Assinaturas:

Documento assinado digitalmente
 **REGINALDO MATIAS NUNES**
Data: 28/01/2026 22:05:35-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Orientador: Reginaldo Nunes Matias
DEMEC/UFMG - Orientador

Documento assinado digitalmente
 **REGINALDO MATIAS NUNES**
Data: 28/01/2026 22:07:16-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Orientador: Reginaldo Nunes Matias
DEMEC/UFMG – Avaliador

Documento assinado digitalmente
 **VITOR GARCIA MILHOLI**
Data: 29/01/2026 09:55:35-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Aluno: Vitor Garcia Milholi
CPF: 130.123.027-86

AGRADECIMENTO

Agradeço primeiramente, a Deus, pela força, sabedoria e perseverança concedidas ao longo desta jornada. Agradeço também ao meu orientador, Reginaldo Nunes, pela orientação e apoio constante durante todo o processo. Expresso também minha gratidão à UFMG pelo suporte acadêmico e pela oportunidade de aprofundar meus conhecimentos na área de soldagem. Por fim, agradeço à minha família e amigos pelo incentivo e compreensão ao longo desta jornada.

RESUMO

Este trabalho tem como objetivo apresentar uma análise técnica de um projeto de alteração e reparo realizado em um tubulão de vapor de uma caldeira modelo CBC-VU60, com foco nos processos de soldagem empregados e nos ensaios não destrutivos aplicados antes e após os reparos. A pesquisa foi motivada pela identificação de trincas passantes em pontos críticos do componente, comprometendo a integridade estrutural para a operação segura e eficiente da caldeira a vapor. Em seguida, foi realizado os ensaios não destrutivos por líquido penetrante nas regiões indicadas pelo ensaio de emissão acústica, com o objetivo de identificar possíveis trincas no equipamento. Os resultados desse ensaio indicaram a presença duas áreas de atividade acústica, sendo delimitadas as áreas de interesse, uma vez que se trata de um ensaio qualitativo. Em seguida, foi realizado outro ensaio qualitativo por líquido penetrante nas regiões indicadas pelo ensaio de emissão acústica, com o objetivo de identificar possíveis trincas no equipamento. A etapa de reparo envolveu o desbaste mecânico das trincas, pré-aquecimento controlado das regiões afetadas e soldagem com o processo SMAW, utilizando eletrodos E7018-H4. Para validação dos reparos, foram aplicados novos ensaios de líquido penetrante, inspeção visual e ultrassom Phased Array. Todos os processos foram registrados em relatório técnico e incluídos no prontuário do equipamento. Conclui-se que os procedimentos adotados atenderam aos requisitos das normas ASME Seções I e VIII, bem como à Norma Regulamentadora nº 13, assegurando a confiabilidade dos reparos e prolongando a vida útil operacional do tubulão de vapor. Este estudo reforça a importância da integração entre técnicas de inspeção e práticas de soldagem na manutenção de componentes críticos de caldeiras a vapor.

Palavras-chave: Soldagem; trincas, inspeção; tubulão de vapor; ensaios não destrutivos.

ABSTRACT

This work aims to present a technical analysis of a modification and repair project carried out on a steam drum of a CBC-VU60 boiler, focusing on the welding processes employed and the non-destructive tests applied before and after the repairs. The research was motivated by the identification of through-thickness cracks in critical areas of the component, compromising the structural integrity required for the safe and efficient operation of the steam boiler. Subsequently, non-destructive testing using liquid penetrant was performed in the regions indicated by the acoustic emission test, with the objective of identifying possible cracks in the equipment. The results of this test indicated the presence of two areas of acoustic activity, delimiting the regions of interest, since it is a qualitative test. Another qualitative liquid penetrant test was then carried out in the regions indicated by the acoustic emission test, again aiming to identify possible cracks in the equipment. The repair stage involved mechanical grinding of the cracks, controlled preheating of the affected regions, and welding using the SMAW process with E7018-H4 electrodes. To validate the repairs, new liquid penetrant tests, visual inspection, and Phased Array ultrasonic testing were applied. All processes were documented in a technical report and included in the equipment's records. It is concluded that the procedures adopted met the requirements of ASME Sections I and VIII, as well as Regulatory Standard No. 13, ensuring the reliability of the repairs and extending the operational service life of the steam drum. This study reinforces the importance of integrating inspection techniques and welding practices in the maintenance of critical components of steam boilers.

Keywords: welding; welding; cracks; inspection; steam drum; non-destructive testing.

LISTA DE FIGURAS

| | |
|--|----|
| Figura 1 - Áreas com atividade acústica identificadas no Tubulão Superior de Vapor | 17 |
| Figura 2 – Aplicação de revelador em parte dos tubos do banco | 18 |
| Figura 3 - Mapeamento dos danos identificados e recuperados no tubulão, destacados em vermelho. | 18 |
| Figura 4 - Trincas identificadas entre os orifícios 14, 15, 16, 17 e 19 da parede lado esquerdo parede lado esquerdo do banco. | 19 |
| Figura 5 – Detalhe da trinca entre os orifícios 15 e 16. | 19 |
| Figura 6 - Detalhe do andamento da remoção das trincas identificadas nos orifícios da parede lado esquerdo do banco de tubos. | 20 |
| Figura 7 – Pinos de travamento dos furos | 20 |
| Figura 8 - Disposição dos pinos de travamento dos furos. | 21 |
| Figura 9 - Disposição dos pinos de travamento dos furos para os reparos sequenciais. | 21 |
| Figura 10 – Aquecimento por resistência elétrica no tubulão de vapor. | 22 |
| Figura 11 - Pré-aquecimento a 175 °C por meio de resistência elétrica | 22 |
| Figura 12 - Sequência de soldagem ascendente e remoção do reforço. | 22 |
| Figura 13 - Desenho esquemático de uma soldagem com eletrodo revestido. | 23 |
| Figura 14 – Visual da solda logo após o processo de soldagem. | 26 |
| Figura 15 – Resultado do processo de acabamento. | 26 |
| Figura 16 – Realização do ensaio por partícula magnética. | 27 |
| Figura 17 – Realização do ensaio por ultrassom phased array. | 27 |
| Figura 18 – Replica metalográfica no material de base, geratriz inferior esquerda. | 28 |
| Figura 19 – Replica metalográfica feita na geratriz inferior a 1500mm da boca de visita. | 28 |
| Figura 20 – Replica metalográfica realizada na região do reparo. | 29 |

LISTA DE SÍMBOLOS

| | |
|---------------------|---|
| CBC-VU60 | Modelo da caldeira aquatubular estudada. |
| SMAW | Shielded Metal Arc Welding |
| EPS | Especificação de Procedimento de Soldagem. |
| RQPS | Registro de Qualificação de Procedimento de Soldagem. |
| ASME | American Society of Mechanical Engineers |
| NR-13 | Norma Regulamentadora nº 13 Brasil |
| ENDs | Ensaio Não Destrutivo. |
| LP | Líquido Penetrante. |
| UT | Ultrassom Phased Array. |
| PM | Partículas Magnéticas. |
| EA | Emissão Acústica. |
| ZTA | Zona Termicamente Afetada. |
| MPa | Megapascal |
| kgf/cm ² | Quilograma-força por centímetro quadrado. |
| °C / °F | Graus Celsius / Fahrenheit. |
| P-No. 1, Gr 2 | Classificação de materiais segundo ASME Seção IX. |

SUMÁRIO

| | |
|--|-----------|
| 1. INTRODUÇÃO | 11 |
| 2. OBJETIVO | 13 |
| 3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA | 13 |
| 4. METODOLOGIA | 15 |
| 4.1. INSPEÇÃO EXTERNA | 15 |
| 4.2. ENSAIOS NÃO DESTRUTIVOS INICIAIS | 16 |
| 4.3. PREPARAÇÃO PARA O REPARO..... | 20 |
| 4.4. PROCESSO DE SOLDAGEM..... | 21 |
| 4.5. INSPEÇÃO FINAL..... | 26 |
| 4.6. ENSAIO DE METALOGRAFIA | 27 |
| 5. RESULTADOS E DISCUSSÕES | 29 |
| 6. CONCLUSÕES | 30 |
| 7. REFERÊNCIAS | 30 |

1. INTRODUÇÃO

Conforme relatado pelo Moschini (2022) “Nas caldeiras aquatubulares a água e o vapor circulam pela superfície interna dos tubos enquanto o fogo e os gases quentes estão presentes na superfície externa. As caldeiras aquatubulares são utilizadas preferencialmente em grandes complexos Industriais já que necessitam de água com tratamento muito apurado, são complexas de serem operadas e não permitem paradas frequentes. As caldeiras aquatubulares são projetadas para produzir vapores com pressão bastante elevadas (entre 1,96 MPa e 39,27 MPa) em vazões muito altas (entre 10 ton/h e 1,800 ton/h). O vapor produzido pode ser saturado, mas geralmente é superaquecido podendo superar temperaturas de 600 °C”.

Nesse tipo de caldeira, a água circula por tubos expostos à fonte de calor, que geralmente utiliza combustíveis fósseis ou biomassa. Ao absorver energia térmica, a água se transforma em vapor, que é direcionado e coletado no tubulão de vapor, foco deste estudo, segundo Moschini (2022) “O tubulão ou tambor de vapor é um vaso de pressão cilíndrico onde se dá a separação das fases água-vapor e onde é feita a injeção de água na caldeira. O tubulão superior normalmente possui internos para facilitar a separação da água e vapor. O tubulão normalmente possui milhares de orifícios onde são fixados por mandrilhamento (expansão) os tubos da caldeira”, tornando suscetível a esforços mecânicos, fadiga térmica e processos de degradação ao longo do tempo. A integridade estrutural desses componentes é essencial para a operação segura da caldeira. Por isso, técnicas de soldagem e ensaios não destrutivos (ENDs) são essenciais em reparos e inspeções.

A integridade estrutural de caldeiras a vapor e seus componentes são periodicamente inspecionadas segundo os prazos estabelecidos pela norma regulamentadora de nº13 (2022), visando a segurança operacional, e saúde dos trabalhadores.

Entre os diversos danos que podem acometer esses componentes, destacam-se o desgaste por corrosão e o surgimento de trincas, causados por fatores como variações térmicas, presença de umidade, agentes químicos, tensões mecânicas e ciclos de pressão. Esses mecanismos de danos podem comprometer a estanqueidade e a resistência estrutural do equipamento, tornando essencial a adoção de estratégias eficazes de inspeção e reparo.

Este estudo técnico trata do processo de identificação, análise e reparo de danos em um tubulão de caldeira de uma planta industrial situada em Timóteo/MG. A motivação deste trabalho consiste na necessidade crescente de métodos confiáveis de inspeção e correção aplicados a equipamentos pressurizados industriais, especialmente em ambientes sujeitos a intempéries e elevadas exigências operacionais. Casos recentes de defeitos observados durante inspeções

visuais e ensaios de líquidos penetrantes revelaram pontos de fragilidade que, se negligenciados, poderiam gerar sérios acidentes e paralisações.

Nesse contexto, justifica-se a realização de um estudo detalhado, baseado em um caso real, com o objetivo de aprimorar práticas de manutenção e reforçar os protocolos de segurança. A escolha pela correção por soldagem foi fundamentada em premissas técnicas como a localização e extensão dos danos, a viabilidade de acesso ao componente, a compatibilidade metalúrgica entre o material base e o material de adição, e a possibilidade de garantir a integridade estrutural após o reparo. Diversos autores exploram as melhores práticas em inspeção, diagnóstico e recuperação de equipamentos pressurizados. Segundo Silva et al. (2020), “os ensaios não destrutivos, como o método de líquidos penetrantes, têm se consolidado como ferramentas eficazes na detecção de trincas superficiais em materiais ferrosos e não ferrosos”. Já Silva (2010) destaca que “a aplicação de técnicas de soldagem em reparos exige conhecimento detalhado das propriedades dos materiais e das tensões envolvidas, sendo essencial a análise estrutural para garantir a integridade do componente recuperado.”

2. OBJETIVO

O objetivo principal deste estudo é apresentar a metodologia aplicada na identificação dos danos presentes no tubulão de vapor da caldeira modelo CBC-VU60, com base nos ensaios realizados, bem como analisar tecnicamente os procedimentos de inspeção, os reparos executados, os processos de soldagem utilizados e os ensaios não destrutivos aplicados após a intervenção.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

I. Caldeiras Aquatubulares e Tubulões de Vapor

As caldeiras aquatubulares são amplamente utilizadas em ambientes industriais de grande porte devido à sua capacidade de operar em altas pressões e vazões de vapor. Segundo Moschini (2022), esses equipamentos podem atingir pressões entre 1,96 MPa e 39,27 MPa e temperaturas superiores a 600 °C, exigindo rigoroso controle operacional e manutenção preventiva. O tubulão de vapor, componente central dessas caldeiras, atua como vaso de pressão responsável pela separação das fases água-vapor e pela injeção de água no sistema, sendo constantemente submetido a esforços mecânicos e térmicos que favorecem o surgimento de trincas e processos de degradação.

II. Mecanismos de Degradação em Vasos de Pressão

A integridade estrutural de tubulões e caldeiras é comprometida por diferentes mecanismos de dano, como corrosão, fadiga térmica e tensões mecânicas. Silva (2010) destaca que variações térmicas e ciclos de pressão podem induzir trincas passantes, comprometendo a estanqueidade e a resistência do equipamento. Esses danos, se não tratados, podem levar a falhas catastróficas e paralisações operacionais. A Norma Regulamentadora nº 13 (2022) estabelece inspeções periódicas obrigatórias para vasos de pressão, reforçando a importância de métodos confiáveis de detecção e reparo.

III. Ensaio Não Destrutivo (ENDs)

Os ensaios não destrutivos são ferramentas essenciais para a avaliação da integridade estrutural sem comprometer o funcionamento do componente. Entre os métodos mais utilizados, destacam-se o ensaio de líquidos penetrantes e a emissão acústica. Silva et al. (2020) ressaltam que os líquidos penetrantes são eficazes na detecção de trincas superficiais, enquanto a emissão acústica, conforme a ABNT NBR NM 339 (2014), permite identificar regiões críticas durante o carregamento do vaso de pressão. A combinação desses métodos qualitativos e quantitativos aumenta a confiabilidade dos diagnósticos e orienta intervenções corretivas.

IV. Processos de Soldagem em Reparos

A soldagem é uma técnica amplamente aplicada na recuperação de componentes pressurizados. Villani et al. (2021) descrevem o processo SMAW (Shielded Metal Arc Welding) como versátil e eficiente, especialmente em ambientes industriais adversos. O uso de eletrodos E7018-H4, com baixo hidrogênio difusível, reduz o risco de trincas induzidas por hidrogênio e garante boa tenacidade ao cordão de solda. Carvalho (2017) complementa que a técnica da meia camada (“half bead”) contribui para o controle microestrutural, favorecendo o revenimento da Zona Termicamente Afetada (ZTA) e aumentando a confiabilidade do reparo.

V. Normas e Regulamentações Aplicáveis

Os reparos em caldeiras e vasos de pressão devem seguir rigorosamente normas internacionais e nacionais. A ASME Seções I e IX (2021) estabelecem parâmetros para pré-aquecimento, soldagem e tratamentos térmicos pós-soldagem, assegurando a integridade estrutural dos componentes. Já a Norma Regulamentadora nº 13 (2022) reforça a obrigatoriedade de inspeções periódicas e registros técnicos, garantindo rastreabilidade e segurança operacional.

4. METODOLOGIA

Este artigo baseia-se em um estudo de caso, focado nos reparos realizados em um tubulão de vapor de uma caldeira aquatubular modelo CBC-VU60, instalada em Timóteo/MG. A escolha pelo estudo de caso se justifica pela apresentar todo o desenvolvimento da manutenção corretiva, em ambiente real, utilizando processos de soldagem que foram analisados através do databook das atividades realizadas, permitindo assim a observação detalhada dos processos de inspeção, manutenção e aprovação dos reparos no equipamento. A pesquisa apresentada é aplicada a um estudo de caso, voltado em apresentar um problema prático e os meios empregados para identificar defeitos e as tratativas para retornar à operacionalidade e segurança do equipamento. Adotou-se um método descritivo, com levantamento de dados técnicos e operacionais obtidos diretamente dos relatórios de inspeção e reparo.

Foram utilizados como fonte primária os seguintes documentos técnicos, relatórios de inspeção periódica da caldeira (ensaios LP, Ultrassom e Emissão Acústica), procedimentos soldagem (RQPS, EPS), Registros fotográficos e ensaios e intervenções.

A análise dos dados foi conduzida de forma qualitativa, com foco na comparação dos ensaios realizados e os reparos. Os reparos foram avaliados com base nos resultados dos ensaios não destrutivos pós-soldagem e nos parâmetros dos tratamentos térmicos utilizados para alívio de tensões. A análise incluiu, mapeamento das trincas e descontinuidades, avaliação das condições pre e pós-intervenção, verificação da eficácia dos procedimentos conforme os padrões normativos.

A abordagem utilizada é multidisciplinar, integrando conhecimentos de engenharia mecânica, metalurgia e controle de qualidade. Essa escolha se justifica pela complexidade de todos os processos aplicados, que exige interação entre diferentes áreas para garantir a segurança, desempenho e conformidade técnica do equipamento após os reparos.

4.1. Inspeção Externa

Durante a inspeção externa do componente, foram observadas condições gerais satisfatórias. A superfície acessível foi partir da câmara superior da caldeira onde se concentram os coletores de vapor e instrumentação técnica e das regiões localizadas no invólucro traseiro que apresentava oxidação leve e uniforme, sem evidências de perda de massa significativa. Nas áreas onde o isolamento térmico (refratário e lã mineral) foi removido, constatou-se a presença de carepas de corrosão e resíduos de material refratário, compatíveis com o ambiente operacional.

Os tampos externos, que se projetam para fora do invólucro, exibiram o mesmo padrão de oxidação superficial leve, sem comprometimento estrutural aparente. De modo geral, a avaliação não identificou danos relevantes à superfície do componente, indicando bom estado de conservação para as condições de operação observadas.

4.2. Ensaio Não destrutivo Iniciais

Os ensaios não destrutivos (ENDs) são técnicas de inspeção aplicadas a materiais, componentes ou estruturas com o objetivo de avaliar sua integridade sem comprometer suas propriedades funcionais. Esses métodos permitem identificar descontinuidades internas e superficiais, analisar características físicas e monitorar possíveis processos de degradação ao longo do tempo, mantendo o item inspecionado em sua condição original.

Dentre os ensaios não destrutivos (ENDs), destacam-se os métodos qualitativos, cuja principal função é identificar a presença de falhas ou irregularidades sem a necessidade de mensuração precisa de suas dimensões ou características. Esses procedimentos oferecem uma avaliação preliminar da condição estrutural do componente, permitindo a identificação de áreas críticas que podem requerer inspeções complementares por meio de técnicas quantitativas. Assim, os ensaios qualitativos funcionam como uma etapa inicial eficaz na triagem de regiões com potencial comprometimento estrutural.

Nesse contexto, para a caldeira modelo CBC-VU60, foi aplicado o ensaio de emissão acústica em conjunto com o teste de estanqueidade, ambos classificados como ensaios não destrutivos qualitativos.

Segundo a ABNT NBR NM 339 (2014) “O ensaio de emissão acústica consiste na detecção de sinais gerados por fontes de emissão causadas por descontinuidades, durante a aplicação de carga em vasos de pressão metálicos, sendo esses sinais captados por sensores piezoelétricos e analisados para avaliação qualitativa da integridade estrutural.”

O ensaio de emissão acústica no tubulão superior da caldeira CBC-VU60 seguiu os parâmetros definidos em norma e procedimento técnico. Sensores piezoelétricos foram instalados nos tampos e no costado do componente e testados conforme especificações.

O ensaio foi realizado durante o teste de estanqueidade, sendo aplicado três ciclos com patamares intermediários de 50%, 65% e 85% da pressão máxima (26, 34 e 44,0 kgf/cm²), até atingir 52,0 kgf/cm².

A coleta de dados durou cerca de uma hora e vinte minutos nos dois primeiros ciclos e cinquenta e quatro minutos no terceiro. Após a análise, foram detectadas duas áreas com atividade

acústica, conforme Fig. 01, indicando a necessidade de ensaios complementares quantitativos para dimensionar as descontinuidades.

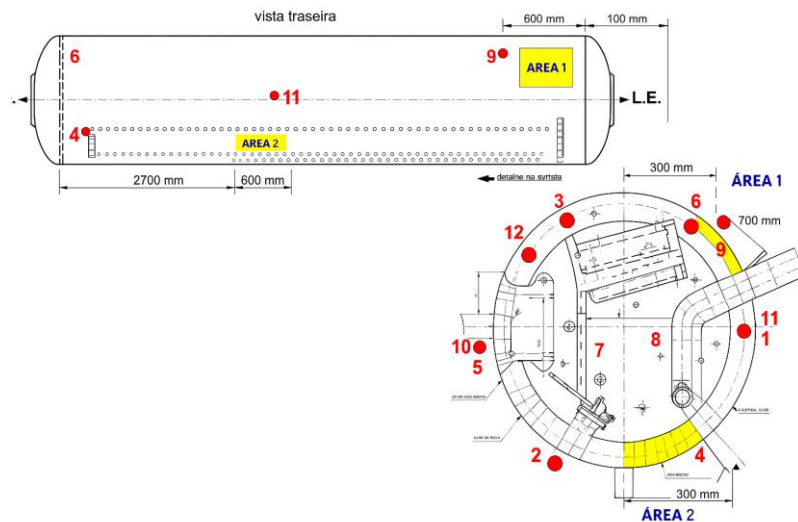


Figura 1 - Áreas com atividade acústica identificadas no Tubulão Superior de Vapor.

Foram realizados ensaios de partículas magnéticas e ultrassom para avaliação localizada das regiões com atividade acústica. Os resultados não identificaram descontinuidades, sugerindo que os sinais detectados têm origem provável no alívio de tensões residuais e/ou na acomodação estrutural do equipamento frente ao carregamento aplicado.

Para avaliar a integridade do tubulão da caldeira CBC-VU60, foi realizado o ensaio de líquido penetrante em todos os tubos do bank, conforme fig.02.

O ensaio de líquido penetrante é um método não destrutivo utilizado para detectar descontinuidades superficiais em materiais sólidos, como trincas, poros e fissuras. Embora seja classificado como uma técnica qualitativa, por identificar a presença de falhas sem fornecer dados sobre sua profundidade ou volume, sua aplicação pode ser amplamente planejada. A extensão da inspeção é definida conforme critérios técnicos, normas aplicáveis e exigências específicas do componente avaliado, garantindo confiabilidade na detecção de defeitos superficiais, que está normatizado pela ABNT NBR 12655 (2015), que estabelece os requisitos para execução, avaliação e registro dos resultados.

O processo consiste na aplicação de um líquido com alta capilaridade sobre a superfície previamente limpa da peça. Após um tempo de penetração, o excesso do produto é removido e aplica-se um revelador, que atrai o líquido retido nas falhas. Isso permite a visualização das indicações de defeitos, geralmente como manchas coloridas ou fluorescentes, facilitando a

inspeção visual. É um método simples, eficaz e amplamente utilizado em componentes metálicos, especialmente em soldas e peças fundidas.



Figura 2 – Aplicação de revelador em parte dos tubos do banco.

Por meio do ensaio, foram identificadas descontinuidades planares do tipo trinca, passantes entre os orifícios da parede lateral esquerda do banco em quatro regiões distintas, conforme indicado no mapeamento da Fig. 3 e apresentado na Fig.4. Após a caracterização da morfologia e das dimensões dessas falhas, foi desenvolvido um procedimento específico para a remoção das trincas e recuperação estrutural das áreas comprometidas. Figura 5 detalha a uma das trincas encontradas, localizada entre os orifícios 15 e 16.

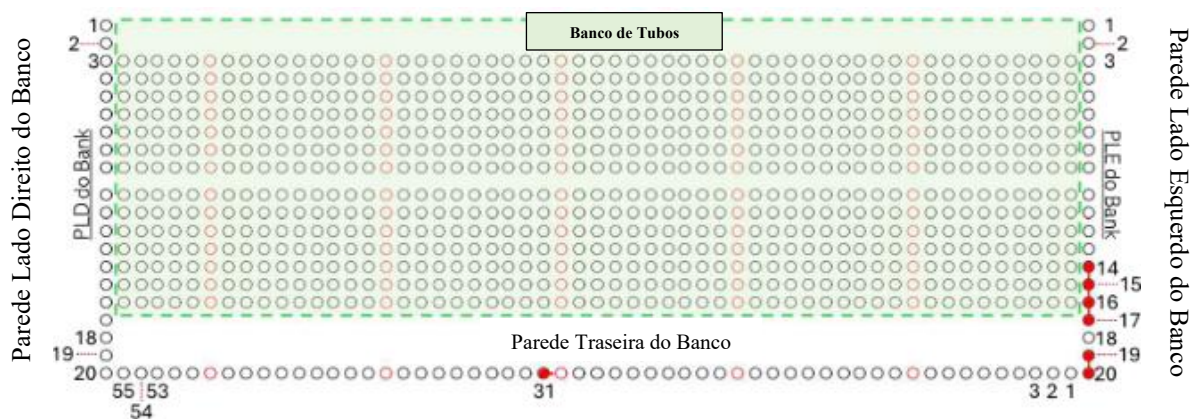


Figura 3 - Mapeamento dos danos identificados e recuperados no tubulão, destacados em vermelho.

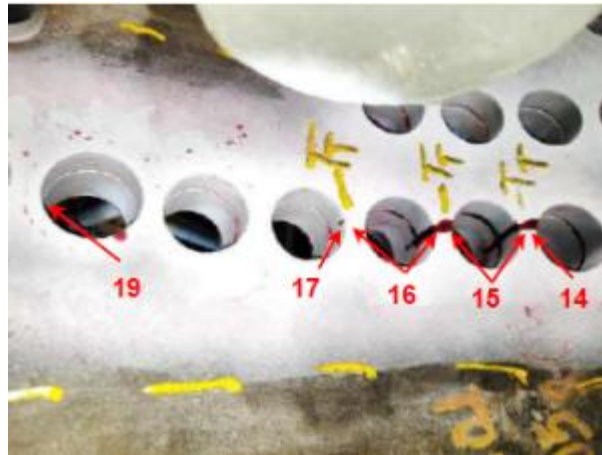


Figura 4 - Trincas identificadas entre os orifícios 14, 15, 16, 17 e 19 da parede lado esquerdo parede lado esquerdo do banco.



Figura 5 – Detalhe da trinca entre os orifícios 15 e 16.

A remoção das trincas teve início com o desbaste das regiões comprometidas, utilizando lixadeira ou fresa, de modo a garantir a completa eliminação das discontinuidades antes do início da soldagem. Quando a profundidade das trincas excedia 50% da espessura da chapa, foi necessário realizar abertura em ambos os lados, empregando chanfros do tipo duplo V com ângulo de 60°. Concluído o desbaste, aplicou-se o ensaio de líquido penetrante para verificar a remoção total das trincas. Caso ainda fossem identificadas indicações, o processo era repetido, seguido de nova inspeção, até que não houvesse mais evidências de discontinuidade, conforme apresentado na Fig.6.



Figura 6 - Detalhe do andamento da remoção das trincas identificadas nos orifícios da parede lado esquerdo do banco de tubos.

4.3. Preparação para o Reparo

O pino de travamento é utilizado como elemento auxiliar em reparos definitivos por soldagem entre furos em componentes pressurizados, como tubulões de caldeiras. Sua função é estabilizar a região afetada durante o processo de soldagem, impedindo a propagação de trincas e reduzindo a concentração de tensões nas extremidades da falha. Ao promover contenção mecânica temporária, o pino permite que a soldagem seja realizada com maior segurança e controle térmico. A prevenção da propagação da trinca ocorre porque o pino interrompe fisicamente o avanço da falha, criando uma barreira que redistribui os esforços mecânicos e limita a deformação localizada. Após a conclusão do reparo e a verificação da integridade da junta soldada, o pino é removido, restabelecendo a geometria original do componente conforme os critérios da norma ASME PCC-2 (2015). A dimensões e distribuições dos pinos é apresentada nas Fig.7, Fig.8 e Fig.9.

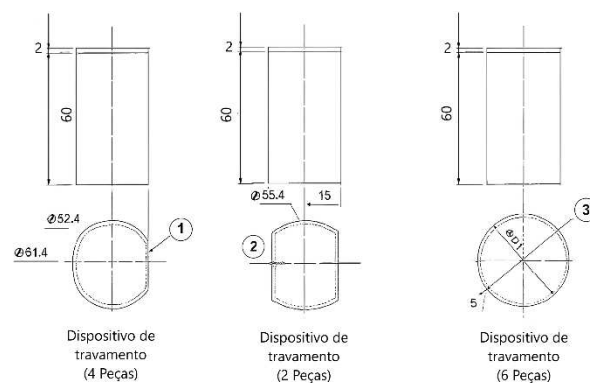


Figura 7 – Pinos de travamento dos furos

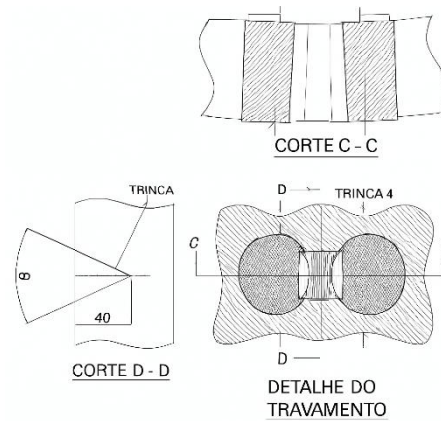


Figura 8 - Disposição dos pinos de travamento dos furos.

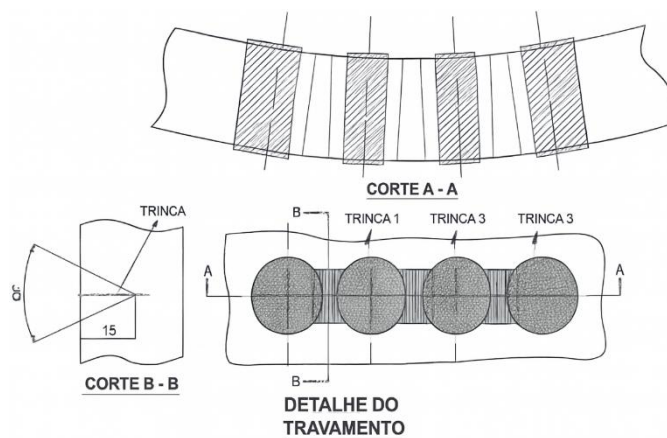


Figura 9 - Disposição dos pinos de travamento dos furos para os reparos sequenciais.

4.4. Processo de Soldagem

Após a conclusão da remoção das trincas e do preparo dos chanfros, iniciou-se a etapa de pré-aquecimento da área desbastada, conforme indicado na EPS. O aquecimento foi realizado por meio de resistência elétrica conforme Fig 10, seguindo as diretrizes da ASME Seção I (2021), Tabela PW-38-1, que estabelece, para o metal de base ASTM A 515 Gr. 70, uma temperatura mínima de 175 °C. Essa temperatura foi mantida em um raio mínimo de 400 mm ao redor da região a ser reparada, garantindo uma distribuição térmica uniforme. O monitoramento foi feito com termômetro infravermelho conforme Fig 11, a uma distância máxima de 50 mm da borda da área de solda, assegurando precisão no controle térmico. Após atingir a temperatura desejada, respeitou-se um intervalo mínimo de 3 minutos antes do início da soldagem, permitindo a equalização térmica em toda a espessura da chapa e reduzindo o risco de tensões residuais ou novas trincas. Durante a execução, a temperatura entre passes foi mantida entre 175 °C e 225 °C, visando preservar a tenacidade do material e evitar o aumento excessivo da dureza na zona afetada pelo calor (ZAC), além de minimizar o risco de trincas induzidas por

hidrogênio. A posição de soldagem adotada foi a progressão ascendente, conforme ilustrado na Fig. 12.



Figura 10 – Aquecimento por resistência elétrica no tubulão de vapor.



Figura 11 - Pré-aquecimento a 175 °C por meio de resistência elétrica

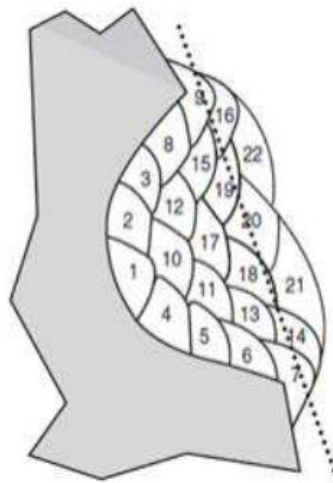


Figura 12 - Sequência de soldagem ascendente e remoção do reforço.

Com o pré-aquecimento concluído, deu-se início ao processo de soldagem. Dentre as opções disponíveis, foi adotado o processo de soldagem a arco com eletrodos revestidos (Shielded Metal Arc Welding – SMAW), descrito por Villani et al. (2021) como “um processo que produz a coalescência entre metais pelo aquecimento destes com um arco elétrico estabelecido entre um eletrodo metálico revestido e a peça que está sendo soldada”. A aplicação desse processo está ilustrada na Fig. 13.

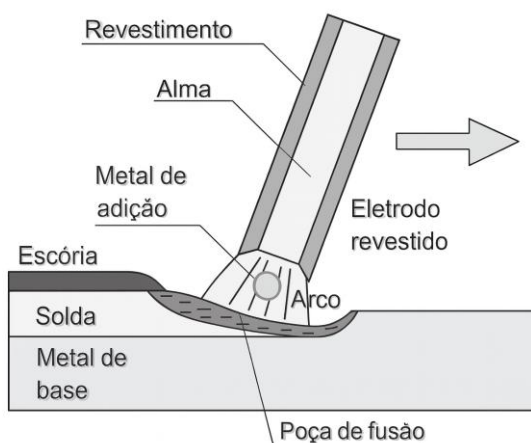


Figura 13 - Desenho esquemático de uma soldagem com eletrodo revestido.

O eletrodo revestido é definido por Villani et al. (2021) como “uma vareta metálica, chamada “alma”, trefilada ou fundida, que conduz a corrente elétrica e fornece metal de adição para enchimento da junta. A alma é recoberta por uma mistura de diferentes materiais, numa camada que forma o “revestimento” do eletrodo”.

O eletrodo revestido exerce funções fundamentais no processo de soldagem por arco elétrico. Entre elas, destaca-se a estabilização do arco, que proporciona maior controle e uniformidade durante a operação. O revestimento, ao ser decomposto pelo calor gerado, libera gases que criam uma atmosfera protetora sobre a poça de fusão, evitando contaminações por oxigênio e nitrogênio. Além disso, contribui para o ajuste da composição química do cordão de solda, por meio da introdução de elementos de liga e da remoção de impurezas, o que favorece a qualidade metalúrgica da junta soldada. Nesse contexto, Villani et al. (2021) afirmam que “A possibilidade de inúmeras formulações para o revestimento explica a principal característica deste processo, que é a sua grande versatilidade em termos de ligas soldáveis, características operacionais e características mecânicas e metalúrgicas do metal depositado.”

O processo de soldagem com eletrodo revestido destaca-se pela versatilidade, permitindo sua aplicação em diferentes ligas e condições operacionais. Além disso, o baixo custo e a eficiência em ambientes adversos, como áreas abertas ou de difícil acesso, tornam essa técnica

amplamente utilizada na indústria. Segundo Villani et al. (2021), “o custo relativamente baixo e a simplicidade do equipamento necessário, comparados com outros processos, e a possibilidade de uso em locais de difícil acesso ou abertos, sujeitos à ação de ventos, são outras características importantes”.

O tubulão de vapor fonte do estudo, possui o diâmetro de 1.508,0 mm e espessura de chapa de 76,2 mm, o material empregado na fabricação foi o aço ASTM A 515 Gr. 70 que é amplamente utilizado na fabricação de vasos de pressão e caldeiras devido às suas propriedades mecânicas e resistência ao trabalho em altas temperaturas”. É um aço carbono para aplicações em equipamentos sujeitos a pressão, com boa tenacidade e soldabilidade, especialmente em espessuras elevadas.

O eletrodo ASME SFA 5.1 E7018-H4 possui resistência à tração mínima de 490 MPa e baixo hidrogênio difusível, com limite máximo de 4 ml por 100 g de metal depositado. Essas características o tornam compatível com o aço ASTM A 515 Gr. 70, amplamente utilizado na fabricação de componentes submetidos a elevadas exigências térmicas e de pressão, tal como caldeiras e vasos de pressão. Com revestimento básico e baixo teor de hidrogênio, esse eletrodo reduz significativamente o risco de trincas induzidas por hidrogênio, especialmente em juntas espessas, além de proporcionar excelente resistência mecânica e tenacidade ao cordão de solda. Sua aplicação favorece a estabilidade do arco, boa fusão e eficiente remoção de escória, sendo adequado para todas as posições de soldagem conforme os requisitos da norma ASME Seção IX. O reparo do tubulão de vapor da caldeira CBC foi realizado pelo processo SMAW, com eletrodos E7018-H4 de 3,25 mm na posição ascendente conforme Fig.12, utilizando corrente alternada entre 110 e 150 A e tensão de arco entre 20 e 30 V, conforme especificado na EPS. Os parâmetros foram definidos com base em procedimento qualificado, considerando a espessura da chapa de 76,2 mm e o tipo de junta parcial com abertura de 60°, conforme ASME seção IX (2021) QW-402 que aborda projeto da junta de soldagem. Foram adotados passes múltiplos, com espessura máxima de 6,0 mm e largura de cada passe não ultrapassando 12 mm, conforme ASME seção IX (2021) QW-410.

O método de soldagem utilizado no reparo seguiu as diretrizes estabelecidas pela ASME Seção I (2021) PW-40.3.4, aplicando a técnica de meio camada (“half bead”). Essa técnica consiste na remoção de aproximadamente 50% da espessura de cada camada de cordão depositado, repetindo o processo sucessivamente até que o chanfro seja completamente preenchido.

Segundo Carvalho (2017) a técnica da meia camada (“half bead”), contribui diretamente para o controle microestrutural, removendo aproximadamente 50% da espessura da primeira camada de solda, permitindo que o ciclo térmico da segunda camada atue sobre a zona termicamente

afetada (ZTA) previamente formada. Essa sobreposição térmica favorece o revenimento da região afetada, reduzindo tensões residuais e melhorando a resistência à formação de defeitos, tornando o reparo mais seguro e confiável. O calor gerado durante o próprio processo de soldagem atua como tratamento (ZTA) do metal de base, promovendo o refino da microestrutura e atendendo aos requisitos mínimos de tenacidade e de dureza máxima. Esses critérios são estabelecidos com o objetivo de garantir a integridade do componente reparado, especialmente na prevenção de fratura frágil, trincas de reaquecimento e trincas por corrosão sob tensão.

Com a conclusão do processo de soldagem, o tubulão de vapor foi submetido a um pós-aquecimento, em conformidade com a norma ASME Seção I (2021), parágrafo PW-40.3.5, que determina a aplicação desse processo em materiais com espessura superior a 1 polegada (25 mm). O objetivo do procedimento é promover a difusão e a remoção do hidrogênio residual na região reparada, reduzindo o risco de trincas e assegurando a integridade estrutural do componente. Para isso, as áreas soldadas foram aquecidas a uma temperatura controlada entre 230 °C e 290 °C (450 °F a 550 °F) e mantidas nessa faixa por um período mínimo de 4 horas.

Concluída a etapa de pós-aquecimento, iniciou-se o tratamento térmico para alívio de tensões, conforme os requisitos da Tabela PW-39.1 da ASME Seção I (2021). Para materiais classificados como P-No. 1, Grupo 2, categoria que inclui o ASTM A 515 Gr. 70, conforme listado na Tabela QW/QB-422 da ASME Seção IX (2021), foi adotada uma temperatura de tratamento térmico de 600 °C, com tempo de patamar de 2 horas e 15 minutos. A taxa de aquecimento e resfriamento foi controlada em 100 °C/h, respeitando o limite máximo de 335 °C/h para espessuras superiores a 50 mm e temperaturas acima de 425 °C, conforme estabelecido no parágrafo A-101.2 da ASME Seção I (2021).

Todos os parâmetros definidos na especificação de Procedimento de Soldagem (EPS) e registros de qualificação de procedimento de soldagem (RQPS), foram elaborados seguindo as diretrizes das normas ASME seção IX (2021) e ASME I (2021), garantindo rastreabilidade, segurança e integridade estrutural do equipamento.

A Fig.14 apresenta uma das soldas realizadas no tubulão do vapor com os pinos de travamento.



Figura 14 – Visual da solda logo após o processo de soldagem.

Na execução do acabamento, foi realizada a reconstituição da furação e ranhura por meio de usinagem em campo, conduzida por empresa especializada, garantindo precisão dimensional e conformidade com o projeto original. Em seguida, procedeu-se à remoção do excesso de solda nas superfícies internas e externas por esmerilhamento, até o completo faseamento das áreas conforme apresentado a Fig.15, assegurando um acabamento uniforme e adequado para posterior inspeção e continuidade do processo de recuperação.



Figura 15 – Resultado do processo de acabamento.

4.5. Inspeção Final

Após 72 horas da conclusão da soldagem, foram realizados dois ensaios não destrutivos de partícula magnética e ultrassom phased array. Conforme apresentado nas Fig.16 e Fig.17. Esse intervalo foi adotado para permitir a difusão e estabilização do hidrogênio presente no metal depositado, reduzindo o risco de trincas induzidas por esse elemento. As inspeções confirmaram

a ausência de descontinuidades relacionadas ao hidrogênio, validando a qualidade da solda e a eficácia dos parâmetros aplicados durante o reparo.



Figura 16 – Realização do ensaio por partícula magnética.



Figura 17 – Realização do ensaio por ultrassom phased array.

4.6. Ensaio de Metalografia

“A metalografia é o estudo da constituição e da estrutura dos metais e das ligas metálicas, por meio de exames microscópicos e macroscópicos, com o objetivo de correlacionar essas características com as propriedades e o comportamento dos materiais”, segundo Colpaert (2025).

Esse tipo de ensaio é indicado para equipamentos que operam sob pressão e temperaturas elevadas, como os fabricados em aço carbono, pois permite verificar se há alterações microestruturais causadas por esforço térmico ou mecânico, como crescimento de grão, formação de fases frágeis ou início de degradação. Mesmo abaixo da faixa crítica de fluência, a análise garante que o material mantém suas propriedades e que não há sinais de

envelhecimento ou danos que comprometam a segurança operacional, conforme apresentado Colpaert (2025).

Desta forma, foi avaliado a microestrutural em cinco pontos distintos do tubulão de vapor: dois no tampo, dois no metal de base do costado e um na área recuperada próxima aos orifícios da parede lateral esquerda do bank. O ensaio, feito por réplica metalográfica, teve como objetivo verificar possíveis alterações devido ao longo tempo de operação do tubulão e na região do reparo. Considerando a temperatura de serviço do tubulão (300 °C), não se espera danos por fluência, o que foi confirmado pelas microestruturas observadas e apresentadas na Fig.18, Fig.19 e Fig.20. As amostras do metal de base apresentaram matriz predominantemente ferrítica com perlita, enquanto o metal depositado revelou matriz ferrítica com presença de carbonetos, compatível com o processo de soldagem aplicado.

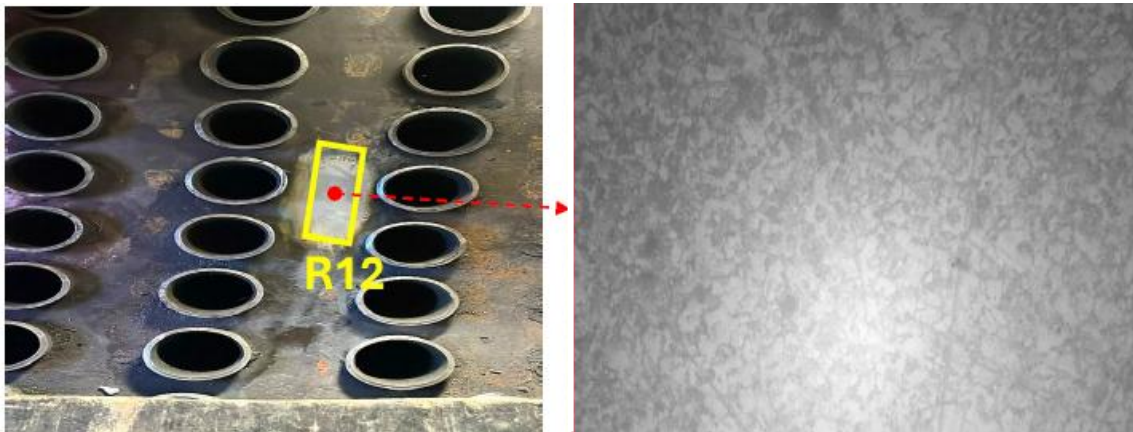


Figura 18 – Réplica metalográfica no material de base, geratriz inferior esquerda.



Figura 19 – Réplica metalográfica feita na geratriz inferior a 1500mm da boca de visita.

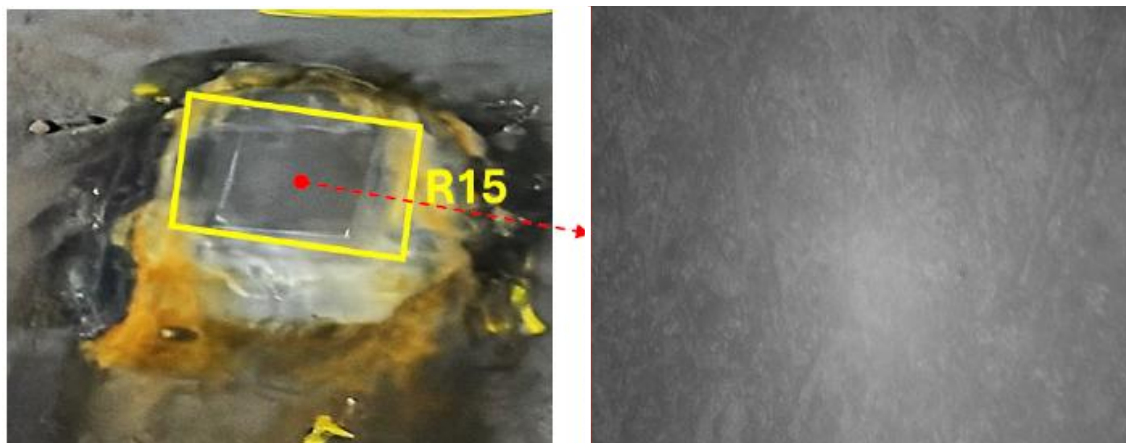


Figura 20 – Replica **metalográfica** realizada na região do reparo.

5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

A aplicação da metodologia proposta permitiu identificar diferentes tipos de danos estruturais no tubulão de vapor da caldeira modelo CBC-VU60. Os ensaios realizados incluindo inspeção visual, técnicas não destrutivas e análises metalográficas, revelaram a presença de trincas passantes, corrosão superficial e desgaste por erosão em áreas internas do equipamento.

Os procedimentos de inspeção adotados demonstraram alta eficácia na detecção das discontinuidades, possibilitando uma avaliação precisa da extensão dos danos e a definição das regiões prioritárias para intervenção. A análise técnica dos reparos indicou que todas as etapas foram conduzidas em conformidade com as normas aplicáveis, destacando-se a correta preparação das superfícies, a seleção adequada dos materiais de adição e o controle dos parâmetros de soldagem.

O processo de soldagem escolhido foi o arco elétrico com eletrodo revestido (SMAW), que foi definido com base nas propriedades do material base e nas exigências operacionais da caldeira. Após a execução dos reparos, foram realizados ensaios não destrutivos complementares, como líquido penetrante e ultrassom Phased Array, que confirmaram a ausência de defeitos das regiões tratadas pelo processo de soldagem.

Os reparos realizados restabeleceram a confiabilidade estrutural do equipamento, permitindo seu retorno à operação com segurança. Os resultados obtidos demonstram a eficácia de uma abordagem técnica sistematizada e criteriosa na manutenção de componentes críticos em sistemas de geração de vapor. Destaca-se, nesse contexto, a importância da integração entre um diagnóstico preciso, procedimentos de soldagem bem definidos e a aplicação de ensaios não destrutivos para validação dos reparos após a execução.

6. CONCLUSÕES

Conclui-se que o processo de reparo do tubulão de vapor envolveu uma abordagem técnica, integrando métodos de soldagem adequados, critérios rigorosos de inspeção e aplicação eficaz de ensaios não destrutivos. Essa combinação permitiu identificar e tratar danos estruturais com segurança, garantindo a integridade do equipamento e seu retorno à operação. O conteúdo apresentado oferece ao leitor uma visão clara dos procedimentos adotados e reforça a importância de práticas bem definidas na manutenção de sistemas pressurizados em ambientes industriais. O reparo foi conduzido conforme os requisitos estabelecidos na norma ASME seção IX (2021), que trata da qualificação de procedimentos e profissionais de soldagem, e na norma ASME PCC-2 (2018), que orienta os métodos de reparo aplicáveis a equipamentos pressurizados.

7. REFERÊNCIAS

- ABNT, 2015. ABNT NBR 12655:2015 – Ensaios não destrutivos – Líquido penetrante – Princípios gerais. Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro, Brasil, 10 p.
- ABNT, 2014. ABNT NBR ISO 16528-1:2014 – Caldeiras e vasos de pressão – Requisitos de desempenho. Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro, Brasil, 28 p.
- ABNT, 2014. ABNT NBR NM 339:2014 – Ensaios não destrutivos – Ensaio de emissão acústica (EA) em vaso de pressão metálico durante o ensaio de pressão – Procedimento. Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro, Brazil, 13 p.
- API – American Petroleum Institute, 2021. API 579 / ASME FFS-1, Fitness-For-Service. Washington, DC: API Publishing Services.
- ASME, 2023. ASME Boiler and Pressure Vessel Code, Section V – Nondestructive Examinations. American Society of Mechanical Engineers, New York, USA.
- ASME, 2018. ASME PCC-2:2018 – Repair of Pressure Equipment and Piping. American Society of Mechanical Engineers, New York, USA, 264 p.
- ASME, 2021. ASME Section I – Rules of Construction of Power Boilers. American Society of Mechanical Engineers, New York, USA.
- ASME, 2021. ASME Section IX – Qualification Standard for Welding, Brazing, and Fusing Procedures; Welders; Brazers; and Welding, Brazing, and Fusing Operators. American Society of Mechanical Engineers, New York, USA.

- IBP, 2013. Guia de inspeção de caldeiras. Instituto Brasileiro de Petróleo, Gás e Biocombustíveis, Rio de Janeiro, Brazil, 56 p.
- Carvalho, G.M.A., 2017. Efeito das técnicas de esmerilhamento e inversão de sentido nas propriedades de soldas multipasses subaquáticas molhadas. Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, Brazil. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Mecânica), 14 nov. 2017.
- Colpaert, H., 2025. Metalografia dos produtos siderúrgicos comuns. 2ª ed. rev. e ampl. Edgard Blucher, São Paulo, Brasil.
- MTE – Ministério do Trabalho e Emprego, 2022. Norma Regulamentadora N°13 - Caldeiras, vasos de pressão, tubulações e tanques metálicos de Armazenamento. Diário Oficial da União: Portaria MTP nº 1846, de 01 de julho de 2022.
- SILVA, R.H., 2010. Soldagem: Fundamentos e Tecnologia. São Paulo: Blucher.
- Telles, P.C.S., 1996. Vasos de Pressão. 2ª ed., LTC – Livros Técnicos e Científicos Editora, Rio de Janeiro, Brazil, 320 p.
- Villani, P., Modenesi, P.J. e Bracarense, A.Q., 2012. Soldagem – Fundamentos e Tecnologia. Ed. Blucher, São Paulo, Brazil, 544 p.