

**ELABORAÇÃO DE RELATÓRIO DE INSPEÇÃO PERIÓDICA EM CALDEIRA
FLAMOTUBULAR À LENHA DE UMA INDÚSTRIA TÊXTIL NO AGRESTE
PERNAMBUCANO**

**ELABORACIÓN DE INFORME DE INSPECCIÓN PERIÓDICA DE UNA CALDERA
PIROTUBULAR A LEÑA EN UNA INDUSTRIA TEXTIL DEL AGRESTE
PERNAMBUCANO**

**PREPARATION OF PERIODIC INSPECTION REPORT FOR A FIRE-TUBE
BOILER FUELED BY WOOD IN A TEXTILE INDUSTRY IN THE AGRESTE
REGION OF PERNAMBUCO**

Daniel Queiroz Moraes Resende¹; Ian Ribeiro Nascimento²; Fábio Guilherme de Andrade Soares³; Valdenio João Francisco José Lima de Souza⁴; Alexander Patrick Chaves de Sena⁵

DOI: <https://doi.org/10.31692/2596-0857.VIIICOINTERPDVGT.0013>

RESUMO

O presente trabalho apresenta o desenvolvimento de um relatório de inspeção de segurança conforme a Norma Regulamentadora 13 de uma caldeira flamotubular à lenha em uma indústria têxtil no agreste Pernambucano. O relatório apresenta o demonstrativo e descrição de todos os procedimentos realizados in loco, onde foram conduzidos Ensaio Não Destrutivos para atestar as condições estruturais do equipamento, coletando as informações necessárias para verificação das espessuras mínimas para os espelhos e corpo da Caldeira calculados conforme especificado na ASME BPVC SEC. I a fim determinação da aptidão do equipamento para operação dentro da Pressão Máxima de Trabalho Admissível determinada no prontuário. Os resultados demonstram que o equipamento está apto para operar dentro da PMTA estipulada, sendo necessário, todavia, que seja desenvolvido um Projeto de Alteração e Reparo do equipamento, visto que foi verificada uma intervenção nas partes pressurizadas da caldeira.

Palavras-chave: Caldeiras, Ensaio Não Destrutivos, Memorial de Cálculo, Inspeção. Segurança do Trabalho.

RESUMEN

El presente trabajo presenta el desarrollo de un informe de inspección de seguridad conforme a la Norma Regulamentaria 13 de una caldera pirotubular a leña en una industria textil en el agreste Pernambucano. El informe presenta el resumen y la descripción de todos los procedimientos realizados in situ, donde se llevaron a cabo Ensayos No Destructivos para certificar las condiciones estructurales del equipo, recopilando la información necesaria para verificar los espesores mínimos de los espejos y el cuerpo de la caldera, calculados según lo especificado en el ASME BPVC SEC. I, con el fin de determinar la aptitud del equipo para operar dentro de la Presión Máxima de Trabajo Admisible determinada en el expediente. Los resultados demuestran que el equipo está apto para operar dentro de la PMTA

1 Bacharelado em Engenharia Mecânica, Instituto Federal de Pernambuco (IFPE), dqmr@discente.ifpe.edu.br

2 Bacharelado em Engenharia Mecânica, Instituto Federal de Pernambuco (IFPE), irn@discente.ifpe.edu.br

3 Bacharelado em Engenharia Mecânica, Instituto Federal de Pernambuco (IFPE), fgas.@discente.ifpe.edu.br

4 Bacharelado em Engenharia Mecânica, Instituto Federal de Pernambuco (IFPE), vifjls.@discente.edu.br

5 Doutor em Engenharia Mecânica, Instituto Federal de Pernambuco (IFPE), alexander.sena.@caruaru.ifpe.edu.br

estipulada, sendo necesario, sin embargo, que se desarrolle un Proyecto de Modificación y Reparación del equipo, ya que se verificó una intervención en las partes presurizadas de la caldera.

Palabras clave: Calderas, Ensayos No Destructivos, Memoria de Cálculo, Inspección. Seguridad Laboral.

ABSTRACT

This work presents the development of a safety inspection report in accordance with Regulatory Standard 13 for a fire-tube wood-fired boiler in a textile industry in the Agreste region of Pernambuco. The report provides a summary and description of all procedures performed on-site, where Non-Destructive Testing was conducted to verify the structural conditions of the equipment, collecting the necessary information to check the minimum thicknesses for the boiler's heads and body, calculated as specified in ASME BPVC SEC. I, in order to determine the equipment's fitness for operation within the Maximum Allowable Working Pressure determined in the documentation. The results show that the equipment is fit to operate within the stipulated MAWP; however, it is necessary to develop an Alteration and Repair Project for the equipment, as an intervention in the pressurized parts of the boiler was identified.

Keywords: Boilers, Non-Destructive Testing, Calculation Report, Inspection. Occupational Safety.

INTRODUÇÃO

Caldeiras a vapor, segundo a Norma Regulamentadora 13 (NR 13), são equipamentos destinados a produzir e acumular vapor sob pressão superior à atmosférica, utilizando diversas fontes de energia, projetados conforme códigos pertinentes, como os produzidos pela American Society of Mechanical Engineers (ASME). Estes equipamentos podem ser encontrados amplamente no âmbito industrial, desde o setor têxtil, químico até mesmo petrolífero ou na indústria de alimentos (FÜHR, 2016).

Existem caldeiras que utilizam óleos minerais ou outros produtos orgânicos sintéticos, porém o vapor apresenta algumas vantagens por apresentar alto calor específico, além de ampla disponibilidade de água (BAZZO, 1995). O vapor gerado por estes equipamentos é utilizado para diversos serviços, seja para troca térmica ou para geração de trabalho ou acionamentos mecânicos diversos. A caldeira tem como princípio básico de funcionamento o aquecimento da água por meio de troca térmica entre a queima do combustível e a água, elevando a pressão e temperatura no interior do equipamento até os níveis desejados para operação.

De acordo com Altafani (2002), caldeira é o nome popular dado aos equipamentos geradores de vapor, cuja aplicação é ampla no meio industrial como também na geração de energia elétrica. Estes geradores de vapor podem ser classificados em diversas maneiras: quanto à disposição de água em relação aos gases; quanto à energia empregada no aquecimento; quanto sua montagem; quanto à sua sustentação, quanto à circulação de água; ou quanto ao sistema de tiragem. A Norma Regulamentadora 13 classifica as caldeiras como categoria A aquelas cuja pressão de operação é igual ou superior a 1.960 kPa (19,98 kgf/cm²) ou B aquelas cuja pressão

de operação seja superior a 60 kPa (0,61 kgf/cm²) e inferior a 1.960 kPa (19,98 kgf/cm²). Porém, a nomenclatura mais amplamente utilizada é quanto à disposição da água em relação aos gases, podendo então as caldeiras serem Aquatubulares ou Flamotubulares. Também existem caldeiras que utilizam os dois sistemas, sendo denominadas de caldeiras mistas. Conforme explanado por Bazzo (1995), em caldeiras aquatubulares, a água circula por dentro de tubos e, frequentemente, são adaptadas em unidades equipadas com economizadores e superaquecedores. Já as caldeiras flamotubulares apresentam os gases de combustão no interior dos tubos e sua aplicação é restrita apenas às operações que admitem o uso de vapor saturado.

Estes equipamentos, no entanto, por operarem com pressões de até 20 vezes a pressão atmosférica em aplicações industriais, ou até mesmo 100 a 250 vezes a pressão atmosférica em aplicações de geração de energia elétrica, apresentam um risco iminente na sua operação (ALTAFANI, 2002). Devido a este risco constante, a manutenção regular e reparos precisos com tecnologias adequadas são de extrema importância.

De acordo com Bazzo (1995), existem diversos fatores que podem afetar a vida útil do equipamento, como mudanças de estrutura do material, seja por ação de corrosão ou pela exposição prolongada a superaquecimentos, gerando um maior risco de acidente à medida que a tensão admissível do material diminui.

Em 1905, a explosão de uma caldeira em Massachusetts nos Estados Unidos matou 58 pessoas, despertando um maior interesse da sociedade para elaboração de normas mais rigorosas a fim de evitar acidentes como o ocorrido. No Brasil, as empresas e indústrias que possuem caldeiras devem adotar os procedimentos estabelecidos na Norma Regulamentadora 13, que fornece orientações fundamentais e específicas para a segurança na operação de caldeiras e vasos de pressão (BEUX, 2014).

A NR 13 determina que as caldeiras devem ser submetidas a inspeções de segurança inicial, periódica e extraordinária. A inspeção inicial deve ser feita em caldeiras novas, antes da entrada em funcionamento, no local definitivo de instalação, devendo compreender exame interno e externo e teste de pressão. Já a inspeção periódica deve ser executada conforme prazos definidos e deve conter exames internos e externos. A inspeção extraordinária deve ser realizada apenas em situações fora das condições padrões do equipamento, como por exemplo, sempre que a caldeira sofrer algum acidente, dano ou outra ocorrência capaz de comprometer sua segurança, ou quando a caldeira for submetida a alterações ou reparos capazes de alterar suas condições de segurança.

A maioria métodos utilizados para determinar as condições de integridade de diversos componentes dos equipamentos de uma caldeira, são compostos por Ensaios Não Destrutivos

(ENDs) que são selecionados de acordo com fatores como aplicabilidade, restrições custos, entre outros. Estes ensaios são compostos de técnicas amplamente utilizadas nas análises de falhas, tendo como finalidade detectar características e verificar propriedades mecânicas dos materiais.

Este trabalho teve como objetivo a elaboração de um relatório de inspeção periódica em uma caldeira mista de uma indústria têxtil no agreste Pernambucano. O processo incluiu o levantamento da documentação existente, conforme solicitado pela NR 13, a realização de ensaios não destrutivos e testes necessários para verificar as condições estruturais do equipamento, a elaboração de um relatório de inspeção de acordo com o item 13.4.4.12 da NR 13 e a determinação da aptidão da caldeira para operar dentro da Pressão Máxima de Trabalho Admissível (PMTA) estipulada.

DESENVOLVIMENTO

Ensaio Não Destrutivo

Os ensaios não destrutivos (END) são procedimentos e técnicas de inspeção utilizadas a fim de avaliar a integridade física de materiais e equipamentos sem danificá-los, portanto, sem interferir na sua funcionalidade e uso posterior (FERRARESI, 2023). Esses ensaios são realizados a fim de identificar a existência ou não de descontinuidades ou defeitos no material, seja em materiais acabados ou semiacabados. Um defeito nada é mais do que uma descontinuidade que torna a peça imprópria para uso por conta de sua natureza, tipo, dimensões ou efeitos acumulados, por não satisfazer requisitos mínimos das normas ou padrões de qualidade aplicáveis (OLIVEIRA, 2019). Uma descontinuidade consiste em uma interrupção da estrutura típica de uma peça, no que se refere à homogeneidade de características físicas, mecânicas ou metalúrgicas de um material (FERRARESI, 2023).

Desta forma, a principal característica das técnicas de ensaios não destrutivos é de demonstrar informações sobre as condições físicas, descontinuidades e defeitos, sendo também úteis para monitorar a taxa de degradação de equipamentos e materiais a partir de uma indicação (FERRARESI, 2023). A tecnologia e aplicação dos END permitem uma melhor detecção das descontinuidades nos materiais, elevando a qualidade dos produtos gerados na indústria do setor de vasos de pressão (OLIVEIRA, 2019).

Existem diversas técnicas de ensaios não destrutivos, sendo os principais os ensaios de Correntes Parasitas, Emissão Acústica, Radiografia, Radioscopia, Gamagrafia, Ensaio Visual, Estanqueidade, Líquido Penetrante, Partículas Magnéticas, Ultrassom e Termografia (FERRARESI, 2023). A determinação da técnica a ser utilizada para inspeção deve se basear

em vários fatores, como tipo de material a ser testado, processos de fabricação envolvidos, geometrias dos objetos, tipos de descontinuidades mais prováveis, entre outros (FERRARESI, 2023).

Tabela 1: Tabela relacionando os END a possíveis mecanismos de deterioração. Fonte: <http://resumoescola.blogspot.com/2011/04/resumo-ensaios-nao-destrutivos.html>.

Mecanismos de Deterioração	Tipo de Descontinuidade	Locais mais prováveis	END mais indicado
Fadiga	Microtrincas superficiais	Pontos de concentração de tensão	Partículas Magnéticas ou Líquidos Penetrantes
Fluência	Trincas superficiais e deformações	Regiões de altas temperaturas com carregamento de tensões	Partículas Magnéticas ou Líquidos Penetrantes, Dimensional e Medição e Espessura
Choque Térmico	Trincas superficiais	Locais sujeitos a grandes variações de temperaturas	Partículas Magnéticas ou Líquidos Penetrantes
Corrosão Sob Tensão	Perda de material	Pontos de concentração de tensões e meio propício	Medição de Espessura ou Radiografia/Gamagrafia
Corrosão	Trincas superficiais e alterações microestruturais	Frestas, sob depósitos, regiões com tensões diferenciais, bocais de pequenos diâmetros, locais com deficiência na proteção superficial	Partículas Magnéticas ou Líquidos Penetrantes e Medição e Espessura
Deterioração pelo hidrogênio	Trincas superficiais e internas	Chapas com segregações, tensões diferenciais e dupla laminação	Medição de Espessura ou Radiografia/Gamagrafia
Erosão	Perda de material	Regiões de mudança de fluxo, região com turbulência, bocais de pequeno diâmetro e equipamentos que trabalhem com fluidos abrasivos	Partículas Magnéticas ou Líquidos Penetrantes, Ultrassom, Metalografia e Dureza
Alterações Metalúrgicas	Trincas superficiais e internas e alterações microestruturais	Pontos de concentração de tensão e/ou regiões quentes	Partículas Magnéticas ou Líquidos Penetrantes, Ultrassom, Metalografia e Dureza
Sobreprensão	Trincas superficiais e internas	Pontos de concentração de tensões	Partículas Magnéticas ou Líquidos Penetrantes e Ultrassom

- **Inspeção Visual**

A inspeção visual é o primeiro ensaio não destrutivo aplicado em qualquer tipo de peça ou componente, estando também associado a outros ensaios (OLIVEIRA, 2019). Este tipo de inspeção é um dos ensaios mais utilizados e de fácil aplicação, com resultados rápidos e de baixo custo, devendo também ser utilizados equipamentos auxiliares como espelhos, endoscópios ou lentes de aumento para auxiliar no processo (ANDRADE, 2018).

Este tipo de inspeção está presente constantemente presente no processo industrial, trazendo simplicidade de realização e baixo custo operacional, porém deve requerer

técnica apurada e procedimentos básicos que devem ser conhecidos e corretamente aplicados (OLIVEIRA, 2019).

Para as caldeiras, a inspeção visual é uma técnica fundamental para identificar possíveis defeitos ou fragilidades nos tubos, soldagens, conexões, flanges, entre outros dispositivos e componentes. As condições encontradas através desta análise, são normalmente seguidas de inspeções mais detalhadas para determinar o grau de deterioração do equipamento. De acordo com Guia de Inspeção de Caldeiras realizado pelo Instituto Brasileiro de Petróleo e Gás (2020), a inspeção externa da Caldeira consiste na realização de avaliações visuais de diversos componentes como escadas, plataformas e passadiços, fundações, suportes externos, chaparia e isolamentos, câmaras de combustão e verificação de vazamentos.

- **Ensaio de Líquido Penetrante**

O método de ensaio por Líquido Penetrante (LP) é capaz de ensaiar peças de diferentes tamanhos e formas, bem como áreas isoladas em uma superfície, sendo um dos ensaios mais sensíveis para detectar descontinuidades superficiais (OLIVEIRA, 2019).

Este método consiste na aplicação de um líquido penetrante com características especiais sobre a superfície da peça que deve estar devidamente limpa e seca, para que deste modo o líquido, após o tempo penetre nas descontinuidades da peça. Em seguida o excesso é removido para que se possa aplicar sobre a superfície um líquido revelador, que irá absorver o líquido que ficou retido nas descontinuidades (ANDRADE, 2018). A descontinuidade então fica desenhada sobre a superfície, sendo avaliada de acordo com a norma utilizada na fabricação da peça ou material (OLIVEIRA, 2019).

O ensaio pode ser dividido em seis etapas principais, sendo elas a preparação da superfície, aplicação do penetrante, remoção do excesso de penetrante, revelação avaliação e inspeção e limpeza pós ensaio (OLIVEIRA, 2019). De acordo com Andreucci (2020), o método possui vantagem quanto a sua simplicidade de aplicação e interpretação dos resultados, além de requerer pouco tempo de treinamento. Porém, o ensaio apenas detecta descontinuidades abertas para a superfície, visto que o penetrante deve entrar na descontinuidade para ser revelado posteriormente.

Uma vez ensaiada, a aprovação da peça depende de critérios de avaliação que são definidos em normas técnicas como a ASME SEC I de 2023, que traz em seu item A-270.5 os critérios de aceitação para um ensaio de líquido penetrante, devendo todas as superfícies examinadas estarem livres de indicações lineares relevantes, indicações

redondas ou elípticas maiores que 5 milímetros e livres de quatro ou mais indicações redondas em uma linha separada por 1.5 milímetros ou menos de ponta a ponta.

- **Ensaio de Medição de Espessura por Ultrassom**

De acordo com o Guia de Inspeção de Caldeiras elaborado pelo Instituto Brasileiro de Petróleo e Gás (2020), os ensaios de medição de espessura com ultrassom são essenciais para manter um controle da vida útil dos tubos, detecção de desgastes anormais e para confirmar a Pressão Máxima de Trabalho Admissível (PMTA) dos componentes da caldeira. A determinação da espessura das chapas e dos tubos de uma caldeira é uma parte essencial da inspeção, podendo identificar e monitorar os mecanismos de deterioração dos componentes.

Este tipo de ensaio é uma técnica amplamente utilizada dentro dos END, sendo os primeiros medidores de espessuras comerciais sendo introduzidos no mercado no final de 1940, surgindo equipamentos portáteis otimizados apenas nos anos 70. Em geral, este ensaio permite a medição de qualquer material comum na engenharia, exceto madeira, papel, betão e outros produtos de espuma.

Esta técnica consiste na utilização de ondas ultrassônicas para determinação da espessura do material a ser ensaiado. Ondas ultrassônicas são ondas mecânicas que se propagam em meios elásticos, ou seja, materiais com capacidade de se deformar ao sofrer algum esforço e voltar a sua forma original após o esforço ser cessado (OLIVEIRA, 2019). As ondas ultrassônicas são transferidas ao material através de transdutores, feitos de materiais piezelétricos que possuem capacidade de se contrair e expandir continuamente, após submetidos a uma diferença de potencial de fonte pulsada (FRANÇA, 2015).

Os medidores de espessura por ultrassom são aparelhos simples que medem o tempo do percurso sônico no interior do material, através da espessura, registrando em sua interface o espaço percorrido, portanto, a própria espessura. São aparelhos bastante úteis para medição dessa grandeza em chapas, tubos e outros equipamentos industriais (ANDREUCCI, 2008). Este equipamento também deve ser sempre calibrado antes de sua utilização, utilizando blocos com espessuras calibradas e de mesmo material a ser medido, com ajuste correto da propagação do som no aparelho (ANDREUCCI, 2008).

Uma vez acoplado o transdutor sobre a peça a ser inspecionada, uma camada de ar se estabelece entre a sapata do transdutor e a superfície da peça, impedindo que as vibrações mecânicas produzidas se propagem para a peça, devido às impedâncias

acústicas distintas, sendo necessária a utilização dos líquidos acoplantes para possibilitar essa propagação (OLIVEIRA, 2019).

Para as inspeções em caldeiras, a utilização de planos para prospecção das medidas por ultrassom sistematiza e simplifica as atividades, porém, este deve ser individualizado para cada caldeira, levando em conta fatores como sua concepção, idade, histórico de corrosão, entre outros.

As medições de espessura são de extrema importância para a determinação do cálculo da Pressão Máxima de Trabalho Admissível do equipamento, visto que essa pressão é determinada através de cálculo utilizando a espessura mínima encontrada no equipamento.

Normas Técnicas e Legislação

A Norma Regulamentadora 13, publicada pela portaria MTb n. °3.214 de 08 de junho de 1978 estabelece os requisitos mínimos para a gestão de integridade estrutural de equipamentos como caldeiras, vasos de pressão, suas tubulações de interligação e tanques metálicos de armazenamento, determinando os aspectos relacionados as instalações, inspeções, operação e manutenção, tendo como objetivo a segurança e saúde dos trabalhadores.

Conforme especificado no seu item 13.2.1 apenas as caldeiras cuja pressão de operação de 60 kPa (0,61 kgf/cm²) estão enquadradas na NR 13, excluindo caldeiras com volume inferior a cem litros, panelas de cocção, fornos, serpentinas para troca térmica, aquecedores de fluido térmico, entre diversos outros equipamentos listados no item 13.2.2.

Dentro de suas disposições gerais, a NR 13 descreve as situações que caracterizam uma condição de grave e iminente risco, citando dentre elas o atraso na inspeção de segurança periódica de caldeiras, a ausência ou bloqueio dos dispositivos de segurança sem a devida justificativa técnica, ausência ou indisponibilidade operacional de dispositivo de controle do nível de água da caldeira, entre outras situações.

As inspeções de segurança das caldeiras devem ser executadas sob responsabilidade técnica de um PLH, definido como profissional legalmente habilitado no item 13.3.2:

“13.3.2 Para efeito desta NR, considera-se PLH aquele que tem competência legal para o exercício da profissão de engenheiro nas atividades referentes a projeto de construção, acompanhamento da operação e da manutenção, inspeção e supervisão de inspeção de caldeiras, vasos de pressão, tubulações e tanques metálicos de armazenamento, em conformidade com a regulamentação profissional vigente no País”. Norma Regulamentadora 13.

Conforme especificado no item 13.4.4.1, as caldeiras devem ser submetidas a inspeções de segurança inicial, periódica e extraordinária. A inspeção inicial é realizada em caldeiras novas, antes da entrada em funcionamento, sendo testadas no local definitivo de instalação devendo também conter exames internos, externos e testes de pressão. As caldeiras devem, portanto, serem submetidas a Teste Hidrostático em sua fase de fabricação, com comprovação por meio de laudo assinado por PLH.

A inspeção periódica deve ser constituída também por exames internos e externos, devendo respeitar os prazos máximos estabelecidos no item 13.4.4.4 da NR 13 e no item 13.4.4.5 para estabelecimentos que possuem Serviço Próprio de Inspeção de Equipamentos (SPIE), definido no anexo II da NR 13. Ao completar vinte e cinco anos de uso, a inspeção subsequente deve conter avaliação de integridade com maior abrangência, a fim de determinar sua vida remanescente e novos prazos máximos para inspeção, caso ainda estejam em condições de uso, conforme especificado no item 13.4.4.6.

O item 13.4.4.12 determina que o relatório mínimo de inspeção de segurança deve conter no mínimo: Dados constantes na placa de identificação da caldeira; Categoria da Caldeira; Tipo da Caldeira; Tipo de Inspeção Executada; Data de Início e Término da Inspeção; Descrição das inspeções, exames e testes executados; Registros fotográficos do exame interno da caldeira; Resultado das inspeções e intervenções executadas; Relação dos itens desta NR, relativos a caldeiras que não estão sendo atendidos; Recomendações e providências necessárias; Parecer conclusivo quanto à integridade da caldeira até a próxima inspeção; Data prevista para a próxima inspeção de segurança da caldeira; Nome legível, assinatura e número do registro no conselho profissional do PLH e nome legível e assinatura de técnicos que participaram da inspeção; e Número do certificado de inspeção e teste da válvula de segurança.

A Norma Regulamentadora 13 cita também em seu item 13.3.4 que a inspeção dos equipamentos enquadrados na norma deve ser respaldada por exames e testes, sendo definido pelo Profissional Legalmente Habilitado, devendo ser observado o disposto em códigos ou normas aplicáveis.

Para Caldeiras, o código mais utilizado e seguido foi elaborado pela Sociedade Americana de Engenharia Mecânica, que elaborou o BPVC (Boiler & Pressure Vessel Code) em 1915, que dispõe sobre os aspectos construtivos a serem seguidos para Caldeiras, Vasos de Pressão, entre outros. A ASME BPVC Seção I traz em seu conteúdo todos os pré-requisitos para a construção de equipamentos como caldeiras de alta e baixa pressão, trocadores de calor com fase líquida, além dos dispositivos auxiliares destes sistemas.

Em seu item PG-90, o código ASME BPVC Seção I em sua edição do ano 2023 trás as

instruções a serem seguidas acerca da inspeção nos equipamentos descritos nesta norma. Além de diversas ações referente a rastreabilidade dos materiais e garantia de qualidade dos procedimentos utilizados na fabricação, a norma detalha o procedimento de alguns dos testes necessários para garantir a integridade do equipamento.

O teste hidrostático é definido no item PG-99, que define que a caldeira após concluída, deve ser submetida a um teste hidrostático utilizando água a temperatura igual ou maior a temperatura ambiente (20 °C) e com pressão não menor que 1.5 vezes a Pressão Máxima de Trabalho Admissível.

A American Petroleum Institute publicou em fevereiro de 2003 a segunda edição das práticas recomendadas de número 573 sobre a inspeção de caldeiras e trocadores de calor a combustão, definindo também procedimentos e periodicidade dos testes a serem realizados em diferentes cenários. Em seu item 5.3, o documento define que o propósito da inspeção em um sistema de confiabilidade é garantir as informações necessárias sobre os tubos e equipamentos das caldeiras a fim de garantir uma análise razoável sobre a integridade estrutural dele. A partir destas análises, poderão então ser definidos parâmetros como vida remanescente dos ativos, prazos para novas inspeções e até mesmo o planejamento preventivo de reparos ou manutenções de maneira efetiva.

Em seu item 9, a API 573 recomenda uma série de informações sobre as inspeções a serem realizadas na parte externa de caldeiras e trocadores de calor, listando os ensaios mais usados como inspeção visual, medição de espessura das chapas, medição das circunferências dos tubos, entre outros.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Relatório de inspeção conforme o item 13.4.4.12 da NR 13

- a) Dados constantes na placa de identificação da caldeira

Tabela 2: Tabela contendo dados da placa da caldeira. Fonte: Autoria Própria (2023).

Dados de Placa	
Informações necessárias de acordo com item 13.4.1.3	
Nome do Fabricante	ATA COMBUSTÃO TÉCNICA S.A.
Nº de Ordem dado pelo fabricante da caldeira	6570
Ano de fabricação	1984
Pressão Máxima de Trabalho Admissível (PMTA)	120 psig ou 8,44 kgf/cm ²
Capacidade de Produção de Vapor	1.000 kg/h
Área de superfície de aquecimento	31 m ²
Código de construção e ano de edição	ASME I
Informações Adicionais	

Tipo	Flamotubular
Modelo	ATA 08 H3
Pressão de teste hidrostático (TH)	180 psig ou 12,66 kgf/cm ²
Categoria	B

- b) Categoria da Caldeira: Categorização conforme item 13.4.1.1 da NR 13: Categoria B - caldeiras da categoria B são aquelas cuja pressão de operação seja superior a 60 kPa (0,61 kgf/cm²) e inferior a 1 960 kPa (19,98 kgf/cm²).
- c) Tipo da Caldeira: Caldeira Flamotubular do tipo Escocesa à lenha.
- d) Tipo de Inspeção Executada: Inspeção de Segurança Periódica.
- e) Data de Início e Término da Inspeção: A inspeção foi realizada nos dias 15/10/2023 e 19/10/2023.
- f) Descrição das inspeções, exames e testes executados: Foram realizadas inspeções visuais nas condições gerais da caldeira, observando elementos como os componentes auxiliares como as tubulações, bomba de alimentação, condições do quadro elétrico, suportes externos, isolamento térmico, existência de vazamentos e condições internas da fornalha. O ensaio de líquido penetrante foi realizado a fim de identificar possíveis trincas ou descontinuidades nas soldas que unem os tubos aos espelhos, sendo ensaiados ambos os lados da caldeira. O ensaio utilizando o endoscópio tem como objetivo verificar as condições internas da caldeira, analisar a questão de incrustações na superfície externa dos tubos, estado da corrosão. A medição de espessura é de extrema importância para determinar se o equipamento está apto para operar dentro da PMTA estipulada. Foram realizadas medições de espessura no costado (ou casco), espelhos e nos tubos.
- g) Registros fotográficos do exame interno da caldeira, conforme Figura (1): A inspeção interna da caldeira foi realizada com auxílio de um boroscópio industrial para visualização do nível de corrosão na superfície externa dos tubos e tubulão, e condições gerais do corpo (ou costado) do equipamento.

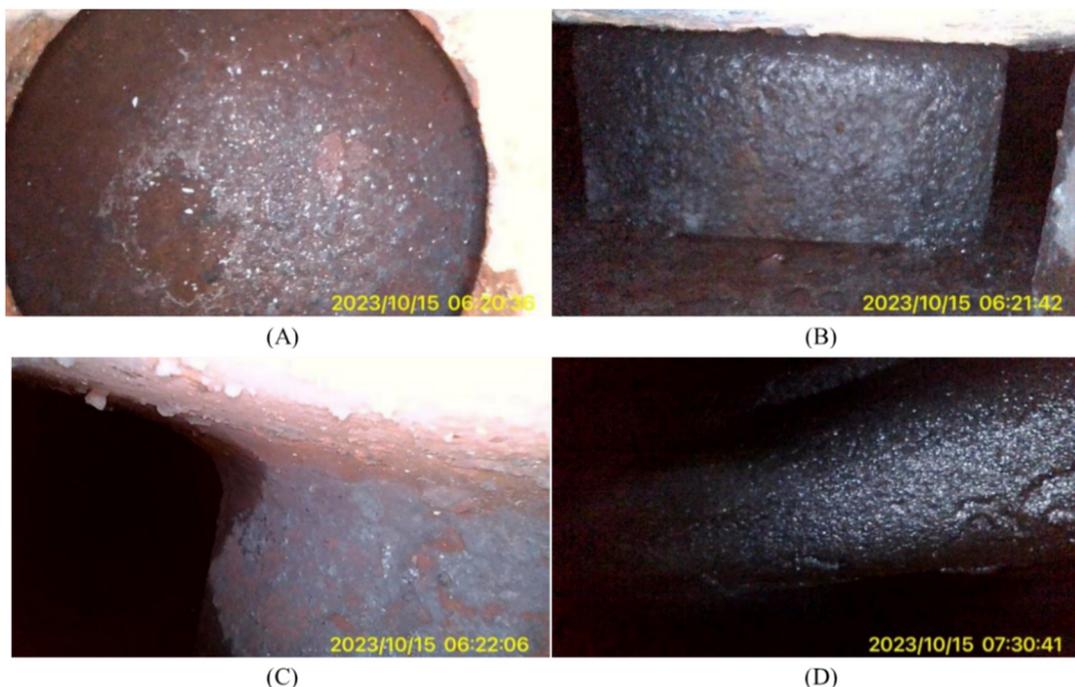


Figura 1: a) Vista externa do tubulão da primeira passagem dos gases, b) Vista de estrutura de suporte interno da caldeira, c) Junção do tubulão com espelho traseiro da caldeira, d) Vista externa de um dos tubos da caldeira. Fonte: Autoria Própria.

h) Resultado das inspeções e intervenções executadas

A caldeira se encontra em bom estado de conservação, podendo ser observada a presença dos dispositivos de segurança desobstruídos e funcionando corretamente. O visor de nível está em bom estado de conservação e funcionando corretamente. O sistema de injetor de água está funcionando normalmente, com o sistema de abastecimento independente da água além da motobomba elétrica, conforme especificado na alínea “c” do item 13.4.1.2. O manômetro e termostato se encontram em bom estado de conservação e operando normalmente. O painel elétrico está operacional, porém foi sugerido que sejam identificados os comandos a fim de facilitar a compreensão dos comandos da caldeira. A Figura (2) apresenta a Casa da Caldeira, o Visor de nível, o Sistema de injeção de água, o Manômetro e Pressostato, e o Quadro elétrico de acionamento.

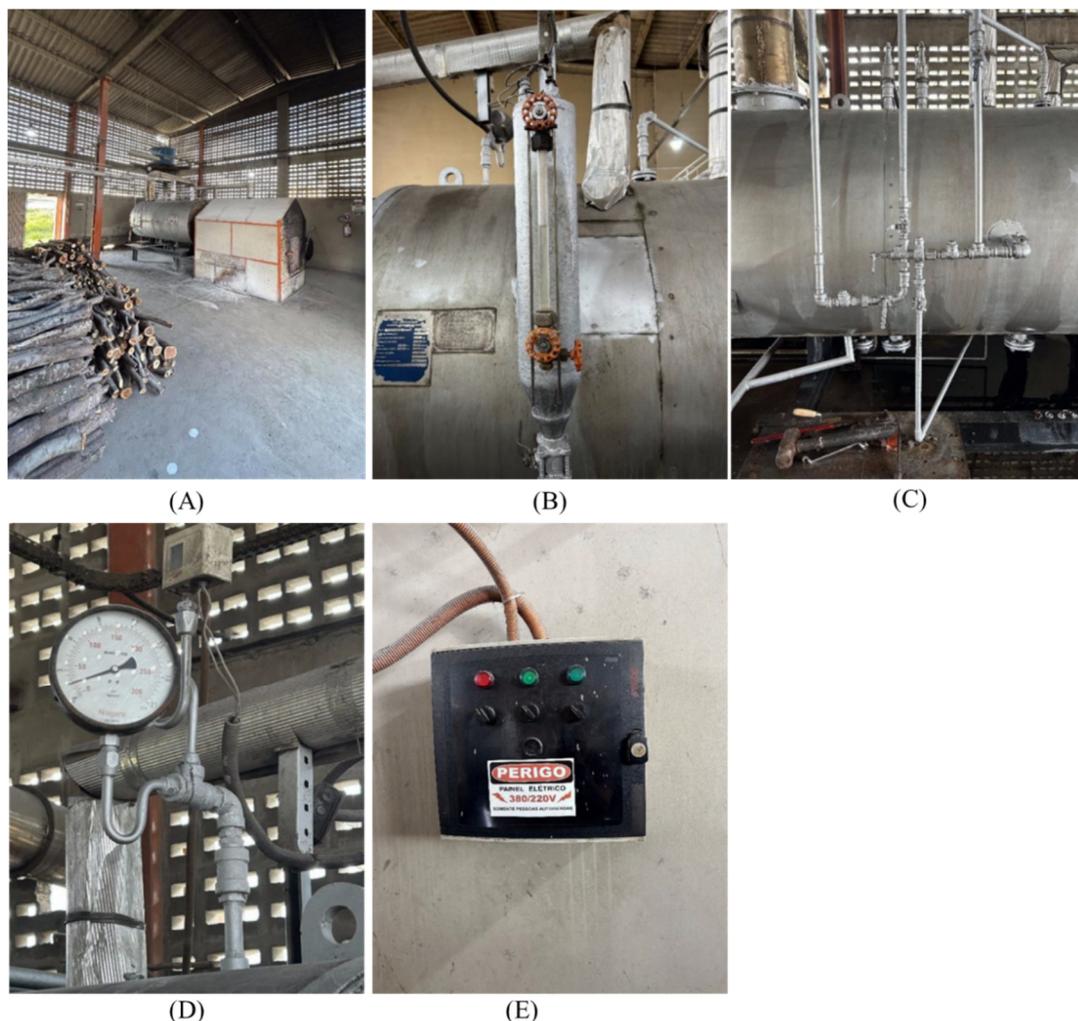


Figura 2: a) Casa da Caldeira, b) Visor de nível, c) Sistema de injeção de água, d) Manômetro e Pressostato, e) Quadro elétrico de acionamento. Fonte: Autoria Própria.

As válvulas de segurança foram inspecionadas e ajustadas conforme solicitado na NR 13, como pode ser observada na placa de identificação do equipamento. Não foram identificadas avarias ou problemas construtivos na fornalha da caldeira, como avarias nos tubos, deformações, vazamentos, etc. A caldeira possui em seu espelho traseiro uma alteração construtiva não documentada nos relatórios de inspeção anteriores, também não apresentando Projeto de Alteração conforme determinado no item 13.3.7.4 da NR 13. Devido ao desgaste acelerado do material refratário normalmente encontrado para a câmara de reversão dos gases para o segundo passe, foi construída uma câmara de aço com tubulações que conectam seu interior a parte pressurizada da caldeira. Esta câmara, por sua vez, apresenta sinais de reparos devido a possíveis trincas em sua estrutura. A estrutura também contém tubos em ambos os lados que conectam o interior da câmara ao costado da caldeira, seguindo também para uma tubulação de dreno que contém um registro para controlar sua abertura. Este tubo, portanto, apresenta um ponto de perda de eficiência térmica, visto que existe a troca de calor com o ambiente externo sem

isolamento térmico adequado, sendo também um ponto de risco sob a ótica da segurança do trabalho, podendo causar queimaduras por contato aos operadores ou outros colaboradores devido à falta de sinalização ou indicação que sua superfície possui temperatura elevada. Portanto, é indicado que seja realizado um projeto de alteração para determinação correta dos materiais utilizados, procedimentos de execução e também a realização de testes para controle da qualidade das soldas realizadas, conforme especificado no item 13.3.7.5 da NR 13. O ensaio de Boroscopia possibilitou a verificação das condições internas dos tubos, apresentando um nível elevado de incrustações de resíduos advindos da falta do tratamento de água que é alimentada a caldeira. Em alguns aspectos apresentou também que existe uma corrosão superficial ocorrendo na superfície externa do tubulão da caldeira. A Figura (3) apresenta os componentes e incrustações.

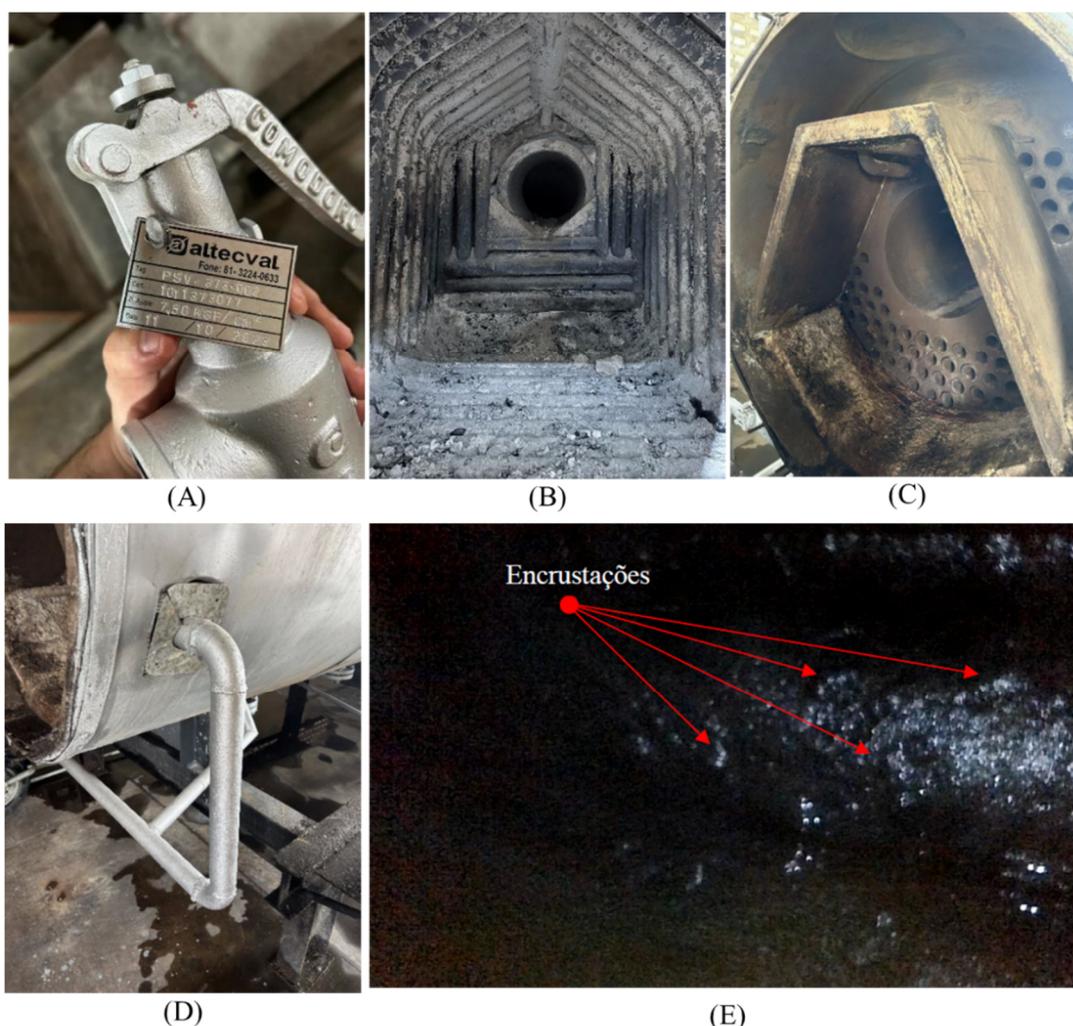


Figura 3: a) Válvula de segurança, b) Interior da fornalha, c) Espelho traseiro, d) Tubos que conectam a estrutura ao interior do costado da caldeira, e) Imagens do interior da caldeira, que apresenta incrustações nos tubos. Fonte: Autoria Própria.

O acúmulo de sujidades e incrustações nas superfícies externas dos tubos prejudicam na eficiência da caldeira, reduzindo a superfície de troca de calor entre a água e o metal. Essas incrustações também podem causar o superaquecimento de partes dos tubos, gerando pontos concentradores de calor, acelerando, portanto, o processo de desgaste, podendo causar vazamentos de vapor para o interior dos tubos. Indica-se, portanto, a análise da viabilidade técnica para realização de uma limpeza química no interior da caldeira a fim de eliminar as sujidades acumuladas na superfície externa dos tubos. O ensaio de medição por ultrassom foi realizado com o auxílio do aparelho MTK-1310, sendo primeiro realizada uma preparação da superfície a ser ensaiada a fim de remover camadas de oxidação ou sujidades que possam interferir na medição adequada da espessura do material. Foram realizadas medições de espessuras em ambos os espelhos, e na superfície inferior do corpo (ou costado) do equipamento a fim de identificar as espessuras mínimas encontradas. A Figura (4) apresenta a medição das espessuras.

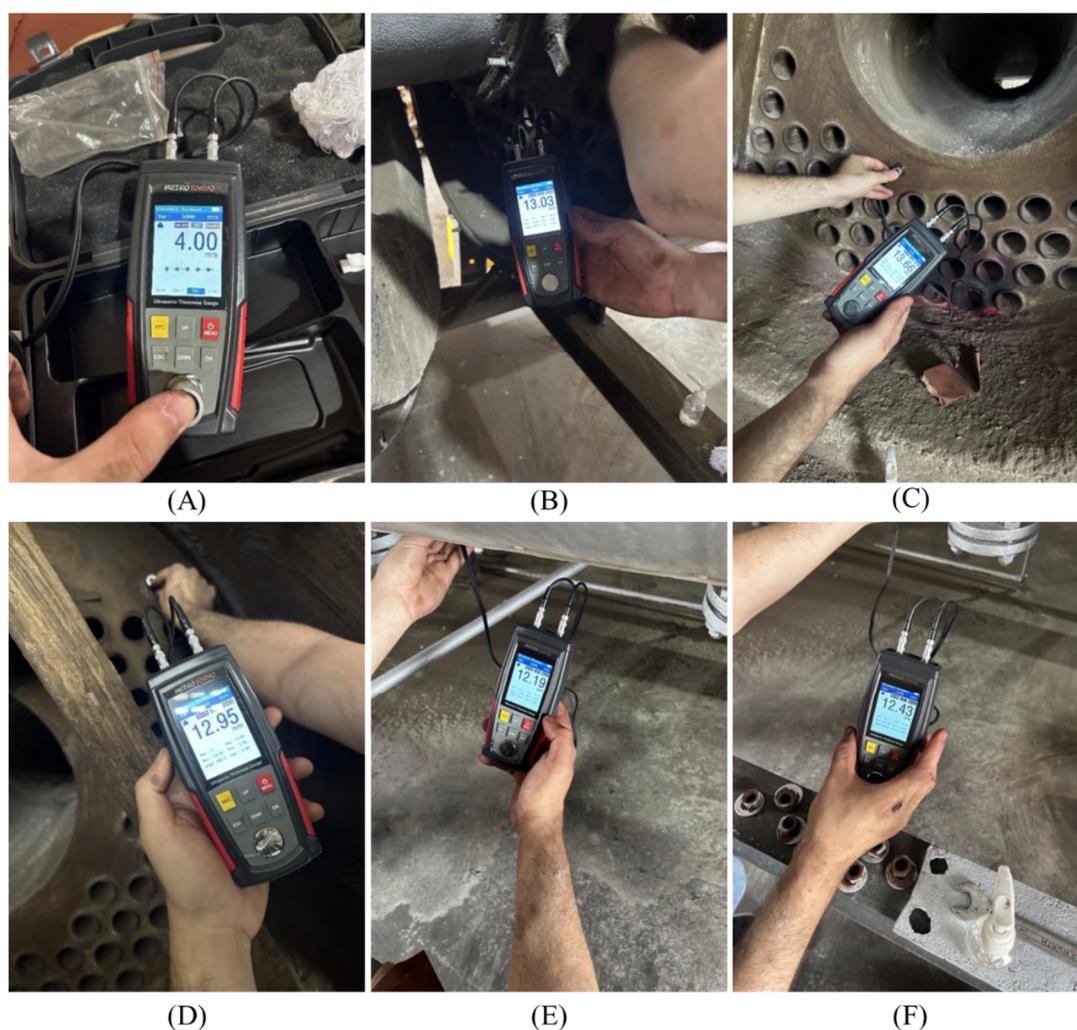


Figura 4: a) Calibração do medidor de espessura, b) Espessura no espelho frontal, c) e d) Espessura no espelho traseiro, e) e f) Espessura no costado. Fonte: Autoria Própria.

Estas espessuras servirão para avaliarmos a aptidão do equipamento para operar dentro da PMTA estipulada pelo fabricante. O aparelho deve ser sempre ajustado utilizando seu bloco padrão de 4 milímetros a fim de garantir o maior grau de exatidão nas medições a serem realizadas. Para o espelho frontal da caldeira, a menor espessura encontrada foi de 13,03 milímetros. Já no espelho posterior, a menor espessura encontrada foi de 12,95 milímetros, portanto para o cálculo da PMTA deverá ser utilizada esta medida com intuito de verificar o ponto crítico do equipamento.

- i) Relação dos itens desta NR, relativos a caldeiras, que não estão sendo atendidos

Tabela 3: Checklist dos itens referentes a caldeiras dispostos na NR 13. Fonte: Autoria Própria.

Item	Descrição sumária	Situação
13.4.1.2 - a	Contém válvula de segurança ajustada em valor igual ou inferior à PMTA	Conforme
13.4.1.2 - b	Contém instrumento que indique pressão do vapor acumulado	Conforme
13.4.1.2 - c	Contém injetor ou sistema de alimentação de água independente do principal	Conforme
13.4.1.2 - d	Contém Sistema dedicado de drenagem rápida de água em caldeiras de recuperação de álcalis	Não se aplica
13.4.1.2 - e	Contém Sistema automático de controle de nível que evite superaquecimento por alimentação deficiente	Conforme
13.4.1.3	Possui placa de identificação conforme item 13.4.1.3	Conforme
13.4.1.5	Apresenta placa de identificação em local visível contendo categoria da caldeira e seu número ou código de identificação	Conforme
13.4.1.5 - a	Possui prontuário com informações descritas na alínea a do item 13.4.1.5	Conforme
13.4.1.5 - b	Possui registro de segurança conforme item 13.4.1.8	Conforme
13.4.1.5 - c	Possui projeto de instalação	Conforme
13.4.1.5 - d	Possui registros de Projetos de Alteração ou Reparos	Ação Recomendada
13.4.1.5 - e	Possui relatórios de inspeção de segurança	Conforme
13.4.1.5 - f	Certificados de Inspeção e Teste dos dispositivos de segurança	Conforme
13.4.2	A caldeira está instalada conforme item 13.4.2 e seus subitens	Conforme
13.4.3.1	Possui manual de operação atualizado em língua portuguesa em local de fácil acesso aos operadores conforme item 13.4.3.1	Conforme
13.4.3.2	Existe controle sobre a qualidade da água utilizada conforme item 13.4.3.2	Ação Recomendada
13.4.4.3	Possui registro de realização de teste hidrostático conforme item 13.4.4.3 e seu subitem	Conforme

- j) Recomendações e providências necessárias

A ação recomendada no item 13.4.1.5 se refere a elaboração de um projeto de alteração para determinação correta dos materiais utilizados na divisória metálica no espelho

traseiro, identificando os procedimentos adequados de execução e a realização de testes para controle da qualidade das soldas realizadas, conforme especificado no item 13.3.7.5 da NR 13.

Já a ação indicada no item 13.4.3.2 do checklist acima ocorre devido a caldeira possuir registros de análise da água utilizada, porém não realizar tratamento ou controle de suas propriedades físico-químicas. Este tratamento é de extrema importância para garantir o prolongamento da vida útil do ativo, evitando problemas como sobreaquecimento, desgaste acelerado dos tubos, e perda de eficiência térmica.

k) Parecer conclusivo quanto à integridade da caldeira até a próxima inspeção

Baseadas nestas informações, podem ser calculadas as espessuras mínimas, como também PMTA do equipamento, conforme memorial de cálculos especificados na ASME BPVC Seção I, edição 2023. O cálculo deve ser realizado considerando tanto as espessuras encontradas nos espelhos, quanto no costado da caldeira, analisando qual é a espessura mais crítica para determinar a aptidão do equipamento para operação dentro da PMTA estipulada do fabricante.

Para o cálculo da espessura mínima para os espelhos, são utilizadas as fórmulas e metodologia utilizada na PG-46.1, que determina as seguintes equações:

$$t = p \sqrt{\frac{P}{SC}} \quad (1)$$

$$P = \frac{t^2 SC}{p^2} \quad (2)$$

Onde:

C – Coeficiente que pode variar de 2.1 até 3.2, baseado no tipo de estaios utilizados na construção da caldeira. Portanto a caldeira apresenta estaios com diâmetro de 27 milímetros, sendo então enquadrado como C igual a 2.2, conforme descrito na PG-46.1.

P – Pressão Máxima de Trabalho Admissível, sendo 120 psig (0,827 MPa) conforme indicado no prontuário e placa de identificação da caldeira.

p - Passo máximo medido em linha reta passando pelos centros dos estaios, onde na caldeira inspecionada foi encontrado passo de aproximadamente 183 milímetros.

S – Tensão admissível do material conforme ASME Seção II, Parte D, subparte 1, Tabela 1A. O material utilizado para os espelhos da caldeira é o ASTM A-515 GR 60, conforme especificado no prontuário presente do equipamento. Portanto, a tensão admissível do material é de 17,1 ksi (117,90 MPa) até a temperatura de 260 °C.

t – Espessura mínima da chapa. A espessura mínima encontrada para os espelhos foi de

12,95 milímetros.

Com isso, podemos calcular a espessura mínima projetada da caldeira através da equação I.

$$t = 183 * \sqrt{\frac{0,827}{117,9*2,2}} = 10,33 \text{ milímetros} \quad (3)$$

Portanto, a espessura encontrada na medição atual de 12,95 milímetros é superior a espessura mínima encontrada através do cálculo. Porém, ainda é necessário o cálculo da espessura mínima para o costado da caldeira, a fim de verificar se a espessura encontrada é suficiente para a operação dentro da PMTA estipulada pelo fabricante.

Portanto, a espessura encontrada na medição atual de 12,95 milímetros é superior a espessura mínima encontrada através do cálculo. Porém, ainda é necessário o cálculo da espessura mínima para o costado da caldeira, a fim de verificar se a espessura encontrada é suficiente para a operação dentro da PMTA estipulada pelo fabricante.

A PG-27.2.2 determina o cálculo necessário para a determinação da espessura mínima para o costado da caldeira.

$$t = \frac{PD}{2SE+2yP} + C \quad (4)$$

$$P = \frac{2SE(t-C)}{D-2y(t-C)} \quad (5)$$

Onde, neste caso:

C – Tolerância mínima para estabilidade estrutural ou para estruturas rosqueadas, conforme PG-27.4.3. No caso da caldeira inspecionada, o Prontuário não apresenta um valor para este coeficiente, portanto será adotado C igual a 0.

D – Diâmetro externo do costado. O diâmetro externo da caldeira é de aproximadamente 1275 milímetros.

E – Eficiência conforme determinado no PG-27.4.1. Como o cilindro do costado não apresenta a junção de tubos de troca térmica, pode ser considerado como um cilindro sem costuras ou aberturas, portanto E pode ser considerado igual a 1.

P - Pressão Máxima de Trabalho Admissível, sendo 120 psig (0,827 MPa) conforme indicado no prontuário e placa de identificação da caldeira.

S – Tensão admissível do material conforme ASME Seção II, Parte D, subparte 1, Tabela 1A. O material utilizado para o costado da caldeira é também o ASTM A-515 GR 60, conforme especificado no prontuário presente do equipamento. Portanto, a tensão admissível do material é de 17,1 ksi (117,90 MPa) até a temperatura de 260 °C.

y – Coeficiente de temperatura conforme especificado no PG-27.4.6. Como a temperatura mínima listada na tabela 1A é inferior a 480 °C, e a temperatura de projeto da caldeira é inferior a 480 °C, se adota y igual a 0,4.

t – Espessura mínima da chapa. A espessura mínima encontrada para o costado da caldeira foi de 12,19 milímetros.

A partir destas informações, a espessura mínima requerida para a operação dentro da PMTA pode ser calculada.

$$t = \frac{0,827*1275}{2*117,9*1+2*0,4*0,827} + 0 = 4,46 \text{ milímetros} \quad (6)$$

Portanto, a espessura encontrada na medição atual de 12,19 milímetros é superior a espessura mínima encontrada através do cálculo realizado acima.

Portanto, em 29/05/2023, executou-se inspeção de segurança periódica, conforme item 13.4.4.16, onde constatou-se que o equipamento está apto para operar dentro da PMTA estipulada, devendo ser observadas as ações necessárias recomendadas no relatório, visto que a alteração realizada na caldeira interfere diretamente na sua integridade estrutural por possuir partes pressurizadas.

CONCLUSÕES

Este trabalho apresentou a elaboração de um relatório de inspeção de segurança periódico em uma caldeira mista em uma lavanderia na região do agreste pernambucano, chegando ao parecer que o equipamento está apto para operar dentro da PMTA determinada no prontuário da caldeira.

Foram realizados ensaios não destrutivos a fim de avaliar as condições de integridade da caldeira e coletar informações necessárias para garantir a segurança do equipamento até a data prevista da próxima inspeção, demonstrando o memorial de cálculo definido pelas normas técnicas vigentes aplicáveis. Durante a inspeção foram constatadas alterações não documentadas em aspectos construtivos do equipamento, sendo necessário a elaboração de um Projeto de Alteração e Reparo (PAR) para determinação dos materiais utilizados e realização de testes a fim de constatar a qualidade dos procedimentos realizados no equipamento.

Um dos maiores empecilhos encontrados no desenvolvimento do trabalho foi a questão da disponibilidade do equipamento para serem realizadas as inspeções e ensaios necessários. O equipamento funciona de maneira ininterrupta, sendo apenas desativado quinzenalmente para limpeza interna para remoção de fuligem e outras sujidades que se acumulam no interior dos tubos advindo do processo de queima da lenha. As inspeções descritas neste trabalho foram

realizadas durante a substituição das válvulas de segurança e posteriormente em uma parada rotineira de limpeza. Por se tratar também de uma caldeira mista à lenha, o equipamento precisaria ter passado por procedimentos de parada adequados a fim de resfriar o sistema, retirando toda lenha e brasas ainda presentes na fornalha a fim de reduzir a carga térmica na fornalha e realizando ciclos de resfriamento através da troca da água no interior da caldeira, procedimentos estes que não foram realizados pelos operadores do turno da noite dos dias anteriores às inspeções. Desta forma, durante o horário disponível para a inspeção, o equipamento ainda se encontrava com temperatura das suas superfícies metálicas (como os tubos, costado e espelhos) muito elevada, inviabilizando a aplicação de testes mais detalhados como o ensaio de Líquido Penetrante nas soldas internas dos tubos e das alterações construtivas realizadas.

Essas dificuldades, todavia, são retratos também da realidade profissional para execução de intervenções neste nicho de equipamentos que requerem um dispêndio maior de tempo para realização de manutenções, inspeções ou intervenções. Mesmo que as inspeções de segurança tragam benefícios como maior confiabilidade, monitoramento da vida útil e segurança na operação desses equipamentos, o custo para desmobilizar o ativo muitas vezes é considerado inviável para as empresas, mesmo que seja uma ação exigida pela legislação.

Como trabalhos futuros, sugere-se a realização de um projeto de alteração para as adaptações realizadas na caldeira, devendo abordar os materiais e métodos utilizados nas intervenções, assim como o controle da qualidade e seus parâmetros necessários, considerando as normas técnicas aplicáveis.

REFERÊNCIAS

ALTAFANI, C.A. **Apostila de Caldeiras**. Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade de Caxias do Sul, 2002. 36p.

ANDRADE, M.F. **Estudo e aplicação de ensaios não destrutivos em aeronaves militares C-130 Hércules**. Monografia (Especialização em Engenharia Aeronáutica), Universidade de Taubaté, Departamento de Engenharia Mecânica, 2018.

ANDREUCCI, R. **Aplicação Industrial: Ensaio por Ultra-som**, ed. Jul./2008, LTDA, 2008.

ANDREUCCI, R. **Líquidos penetrantes**. São Paulo: Associação Brasileira de Ensaio Não Destrutivos, 2020.

BAZZO, E. **Geração de Vapor**. [S.I]: Editora da Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2. ed. 1995.

BEUX, G. **Avaliação das Condições de Segurança na Operação de Caldeiras a Vapor**. 2014. 52 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Especialização) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Pato Branco, 2014.

FERRARESI, R.N. **Comparação Entre os Ensaios Não Destrutivos RFT E IRIS em Feixes Tubulares de Aço Carbono de Trocadores de Calor do Tipo Casco & Tubos**. 2023. 224 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2023. DOI <http://doi.org/10.14393/ufu.di.2022.660>

FRANÇA, F.A. **Deteção de Falhas em Soldas Longitudinais por Ultrassom Assistida por Simulação Computacional**. Rio de Janeiro: UFRJ/ Escola Politécnica, 2015.

FÜHR, H.K. **Proposta de Ajuste em uma Caldeira Flamotubular**. 2016. 41 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) – FAHOR - Faculdade Horizontina, Horizontina, 2016.

INSTITUTO BRASILEIRO DE PETRÓLEO E GÁS, **Inspeção de caldeiras**, 3. ed. Rio de Janeiro: IBP, 2020.

MIGLIAVACCA, C. **Análise dos Métodos de Avaliação de Integridade em Caldeiras**. 2019. Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia Mecânica) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR), Pato Branco, 2019.

OLIVEIRA, D.G. **Ensaios Não Destrutivos: Fundamentos e Aplicações**. 46 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Mecânica), Universidade Federal da Paraíba, 2019.

