

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ

GUILHERME MORI GONÇALVES

**ANÁLISE DOS PROCEDIMENTOS DOS MÉTODOS DE AVALIAÇÃO DE
INTEGRIDADE EM CALDEIRAS**

PATO BRANCO

2022

GUILHERME MORI GONÇALVES

**ANÁLISE DOS PROCEDIMENTOS DOS MÉTODOS DE AVALIAÇÃO DE
INTEGRIDADE EM CALDEIRAS**

**ANALYSIS OF THE PROCEDURES OF INTEGRITY ASSESSMENT METHODS IN
BOILERS**

Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação
apresentada como requisito para obtenção do título de
Bacharel em Engenharia Mecânica da Universidade
Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).
Orientador: Prof. Dr. Luiz Carlos Martinelli Júnior

PATO BRANCO

2022



4.0 Internacional

Esta licença permite compartilhamento, remixe, adaptação e criação a partir do trabalho, mesmo para fins comerciais, desde que sejam atribuídos créditos ao(s) autor(es). Conteúdos elaborados por terceiros, citados e referenciados nesta obra não são cobertos pela licença.

GUILHERME MORI GONÇALVES

**ANÁLISE DOS PROCEDIMENTOS DOS MÉTODOS DE AVALIAÇÃO DE
INTEGRIDADE EM CALDEIRAS**

Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação
apresentado como requisito para obtenção do título de
Bacharel em Engenharia Mecânica da Universidade
Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).

Data de aprovação: 24/Junho/2022

Prof. Luiz Carlos Martinelli Junior
Doutorado
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Prof. Márcio Tadayuki Nakaura
Mestrado
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Prof. Fabiano Ostapiv
Doutorado
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

PATO BRANCO

2022

AGRADECIMENTOS

Ao Prof. Dr. Luiz Carlos Martinelli Júnior pela sabedoria e conhecimento transmitido, pela disponibilização do seu tempo, pelo todo o seu auxílio e compreensão durante a orientação do presente trabalho.

Ao todo o corpo docente pelo conhecimento transmitido, pela preocupação e auxílio das dúvidas durante o curso.

Aos Engenheiros pela participação e pelo todo o conhecimento e experiência transmitida.

Aos meus Pais, Eduardo Manuel Gonçalves e Maisa de Souza Mori, por me proporcionarem esta grande oportunidade, por todo apoio, conselhos, motivação, amor, carinho e ensinamentos.

Aos meus irmãos, Gustavo Mori Gonçalves e Eduardo Manuel Gonçalves Junior, pelo apoio e a motivação.

À minha noiva Nathália Cristina Pinheiro, pela parceria, apoio, motivação, amor, carinho e sempre me incentivar.

À minha nova família, especialmente à mãe da minha noiva, Alessandra Pupo Pinheiro, aos avós da minha noiva, Anário Gonçalves Pinheiro e Jussara Pupo Pinheiro, pelo acolhimento, auxílio, apoio e motivação durante momentos difíceis.

Aos meus colegas pelo conhecimento e esforço compartilhado, pela colaboração de todos em busca do tão sonhado título de engenheiro.

À Deus, por ter sempre me apoiado, motivado e iluminado o meu caminho, sempre colocando ótimas pessoas na minha vida.

RESUMO

GONÇALVES, Guilherme Mori. Análise dos Procedimentos dos Métodos de Avaliação de Integridade em Caldeiras. 2022. 42f. Trabalho de Conclusão de Curso – Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Pato Branco, 2022.

Este trabalho apresenta uma breve abordagem teórica dos métodos utilizados na avaliação de integridade de caldeiras e apresenta conhecimentos de profissionais dos principais pontos dos procedimentos aplicados em uma inspeção e na avaliação de integridade dos equipamentos. Primeiramente foram realizadas pesquisas sobre os principais métodos de inspeção aplicados, principalmente os ensaios não destrutivos, e brevemente apresentados como os métodos funcionam e o resultados que podem ser obtidos. Após isso foi realizada entrevistas digitais com profissionais da área, os quais apresentaram como normalmente realizam as inspeções e os principais pontos para realizar uma boa inspeção e garantir a integridade dos equipamentos. Dessa forma sendo como um guia inicial para engenheiros que desejam atuar na área de inspeção de caldeiras.

Palavras-chave: Integridade de Caldeiras; Inspeção de Caldeiras; Ensaios não destrutivos, Procedimentos de Avaliação de Caldeiras.

ABSTRACT

GONÇALVES, Guilherme Mori. Análise dos Procedimentos dos Métodos de Avaliação de Integridade em Caldeiras. 2022. 55f. Trabalho de Conclusão de Curso – Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Pato Branco, 2022.

This work presents a brief theoretical approach of the methods used in the evaluation of boiler integrity and presents professionals' knowledge of the main points of the procedures applied in an inspection and in the evaluation of equipment integrity. First, research was carried out on the main inspection methods applied, mainly non-destructive testing, and briefly presented how the methods work and the results that can be obtained. After that, digital interviews were carried out with professionals in the area, who presented how they normally carry out inspections and the main points to perform a good inspection and ensure the integrity of the equipment. In this way, it serves as an initial guide for engineers who want to work in the boiler inspection area.

Keywords: Boiler Integrity; Boiler inspection; Non-destructive testing, Boiler Assessment Procedures.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Tubo apresentando corrosão severa.....	16
Figura 2 - Ensaio visual da tubulação de um gerador de vapor	18
Figura 3 - Sequência de aplicação do ensaio de líquido penetrante.....	19
Figura 4 - Campo de fuga gerado por uma descontinuidade no material.....	20
Figura 5 - Técnica geral de ensaio radiográfico	21
Figura 6 - Ensaio de ultrassom	22
Figura 7 - Técnica geral do ensaio IRIS	23
Figura 8 - Princípio do ensaio acústico.....	25
Figura 9 - Exemplo do resultado do ensaio termográfico.....	26

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Resumo dos principais pontos ressaltados pelos engenheiros..... 36

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ASME	American Society of Mechanical engineers
API	American Petroleum Institute
NR	Norma Regulamentadora
PMTA	Pressão Máxima de Trabalho Admissível
RP	Recommended Practice

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	12
1.1 Objetivos.....	15
1.1.1 Objetivo Principal	15
1.1.2 Objetivos Específicos	15
1.2 Justificativa	15
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	16
2.1 Degradação dos Equipamentos	16
2.2 Métodos de Avaliação.....	17
2.2.1 Exame Visual	18
2.2.2 Ensaio por Líquidos Penetrantes	19
2.2.3 Ensaio Por Partículas Magnéticas.....	20
2.2.4 Ensaios Radiográficos.....	20
2.2.5 Ensaios Por Ultrassom.....	22
2.2.6 Ensaio IRIS	23
2.2.7 Ensaios Por Correntes Parasitas.....	23
2.2.8 Ensaios Metalográficos Por Réplica	24
2.2.9 Ensaio Por Extensometria	24
2.2.10 Análise Físico Química Dos Materiais	25
2.2.11 Emissão Acústica	25
2.2.12 Ensaio por Termografia	26
2.2.13 Ensaio Hidrostático	26
3 METODOLOGIA.....	28
3.1 Roteiro de Entrevista	28
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	30
4.1 Resultados das Entrevistas.....	30
4.1.1 Métodos Normalmente Utilizados.....	30

4.1.2 Determinação dos Métodos e da Ordem de Aplicação - Início da Inspeção	30
4.1.3 Procedimentos para Realização dos Métodos	32
4.1.4 Dificuldades Encontradas na Inspeção	33
4.1.5 Vantagens e Desvantagens dos Métodos Mais Utilizados	34
4.1.6 Verificação da Pressão Máxima de Trabalho Admissível	35
4.2 Análise das Entrevistas	35
5 CONCLUSÃO	38
REFERÊNCIAS	40
ANEXO A – QUESTIONÁRIO RESPONDIDO PELO LUCAS SERRANO	42
ANEXO B –QUESTIONÁRIO RESPONDIDO PELO ENGENHEIRO A.....	46
ANEXO C – QUESTIONÁRIO RESPONDIDO PELO LUIZ FELIPE COELHO	49
ANEXO D – TERMO DE AUTORIZAÇÃO DE USO DE IMAGEM – LUIZ FELIPE COELHO	52
ANEXO E – TERMO DE AUTORIZAÇÃO DE USO DE IMAGEM – LUCAS SERRANO	54

1 INTRODUÇÃO

As caldeiras a vapor, segundo a definição da Norma Regulamentadora NR-13, são equipamentos destinados a produzir e acumular vapor sob pressão superior à atmosférica, utilizando qualquer fonte de energia.

Publicada em junho de 1978 e atualizada pela última vez em julho de 2019, a NR-13 é principal norma relacionada a inspeção de Caldeiras. De acordo com o item 13.1.1 da norma:

Esta Norma Regulamentadora - NR estabelece requisitos mínimos para gestão da integridade estrutural de caldeiras a vapor, vasos de pressão, suas tubulações de interligação e tanques metálicos de armazenamento nos aspectos relacionados à instalação, inspeção, operação e manutenção, visando à segurança e à saúde dos trabalhadores. (NR-13, p. 1)

Segundo Pera (1990), um gerador de vapor é um trocador de calor complexo que produz vapor a partir de energia térmica, ar e fluido vaporizante. Há possibilidade de utilizar como fluidos vaporizantes a água, mercúrio ou fluídos de alta temperatura (fluídos térmicos)

A preferência pelo vapor como fluido de trabalho, de acordo com Bazzo (1995), é justificada por possuir alto calor específico, além de ampla disponibilidade de água. As unidades que utilizam o vapor são utilizadas tanto para serviços de aquecimento, quanto para serviços de acionamento mecânico. Tem uma grande aplicação que atende diversas necessidades na indústria e para geração de energia elétrica.

Segundo Martinelli Jr. (2002), os geradores de vapor podem ser denominados por:

Caldeiras de Vapor: são os geradores de vapor mais simples, queimam algum tipo de combustível como fonte geradora de calor.

Caldeiras de Recuperação: são aqueles geradores que não utilizam combustíveis como fonte geradora de calor, aproveitando o calor residual de processos industriais (gás de escape de motores, gás de alto forno, de turbinas, etc.).

Caldeiras de Água Quente: são aqueles em que o fluido não vaporiza, sendo o mesmo aproveitado em fase líquida (calefação, processos químicos).

Geradores Reatores Nucleares: são aqueles que produzem vapor utilizando como fonte de calor a energia liberada por fontes nucleares (urânio enriquecido). (MARTINELLI JR, 2002, p. 7)

As caldeiras podem ser classificadas em:

Quanto à disposição da água em relação aos gases:

- a) flamotubulares;
- b) aquotubulares.

Quanto à energia empregada no aquecimento:

- a) a partir de combustíveis: sólidos; líquidos; gasosos;
- b) elétricas: jatos-de-água; eletrodos submersos; resistores;
- c) caldeiras de recuperação; gases de outros processos; recuperação química.

Quanto à montagem:

- a) caldeiras pré-montadas (compactas);
- b) caldeiras montadas em campo.

Quanto à sustentação:

- a) caldeiras auto-sustentadas;
- b) caldeiras suspensas;
- c) sustentação mista.

Quanto à circulação de água:

- a) circulação natural;
- b) circulação forçada.

Quanto ao sistema de tiragem:

- a) tiragem natural;
- b) tiragem forçada;
- c) tiragem balanceada ou induzida (NOGUEIRA et al., 2005, p. 62)

Segundo Martinelli Jr. (2002), a escolha do tipo de caldeira de vapor depende do tipo de serviço que será realizado, do combustível disponível, capacidade de produção, fatores econômicos, etc.

Conforme Nogueira et. al. (2005), a vida útil de um gerador de vapor é definida pela quantidade de horas de fogo que o gerador pode suportar em condições normais de funcionamento. A vida útil de uma caldeira depende do método de trabalho que tenha sido realizado, do sistema de vaporização, qualidade da água de alimentação, da frequência das limpezas externas e internas etc.

Ao longo da vida útil do equipamento, conforme Bazzo (1995), pode ocorrer alterações na estrutura do material, que pode ser provocada por corrosão e pela exposição prolongada desse material aos problemas de superaquecimento, que ocorre pela falta de água no interior da caldeira, pois a água é o refrigerante natural das superfícies de aquecimento da caldeira. Essas alterações na estrutura do material podem causar a diminuição da tensão admissível do material e a espessura efetiva de parede, assim aumentando o risco de acidentes. Os riscos envolvidos podem ser incêndios, choques elétricos, intoxicação e explosão.

Bazzo (1995, p.107), diz que “[...] para que a segurança seja preservada o equipamento deve receber atenção permanente, adotando-se medidas de correção ou, simplesmente, modificando-se a pressão de trabalho da instalação”.

Furtado et. al. (2013, p.5) diz que “a técnica de avaliação de integridade estrutural é o resultado de procedimentos multidisciplinares que permitem estabelecer o estágio de dano em que uma estrutura se encontra, com a finalidade de prever seu comportamento futuro.”

Conforme Furtado et. al. (2013), a avaliação de integridade estrutural do equipamento tem como objetivo garantir a segurança e a operação confiável do equipamento, além de minimizar os danos ao meio ambiente. A avaliação de integridade traz alguns benefícios econômicos, como prolongar a vida útil do equipamento, eliminar as paradas não programadas, redução de contratação de seguros, redução de estoque de peças e materiais, redução dos riscos de acidentes com vítimas etc.

Segundo Furtado et. al. (2008), as principais metodologias utilizadas para o cálculo da vida remanescente com base em ensaios de campo são a degradação microestrutural, medição de dureza, medição de espessura da camada de óxido e medições de espessuras de parede.

De acordo com a NR-13, os equipamentos devem ser submetidos a inspeção de segurança inicial, periódica e extraordinária. A inspeção de segurança inicial é realizada após a instalação da caldeira no local definitivo, antes do seu primeiro funcionamento. A inspeção de segurança periódica é constituída de avaliações programadas. A inspeção de segurança extraordinária é realizada sempre que ocorre algum fato inesperado, como sobreaquecimento por exemplo. Ainda segundo a NR-13, todas as caldeiras devem ser submetidas a uma avaliação de integridade com maior abrangência após completar 25 anos de uso, para assim poder determinar a sua vida útil restante e novos prazos máximos para inspeção, isso se a caldeira se encontrar em condições de uso.

Conforme Migliacavacca (2019), a maioria dos métodos de avaliação dos componentes dos equipamentos são por meio de ensaios não destrutivos (ENDs), pois não se deve comprometer a sua operação após a avaliação.

Segundo Migliacavacca (2019), engenheiro recém-formados possuem dificuldades de encontrar materiais explicando as reais situações e limitações enfrentados ao avaliar a integridade das caldeiras.

Esse trabalho tem a intenção de continuar o trabalho feito por Caciano Migliavacca (Análise dos Métodos de Avaliação de Integridade em Caldeiras. 2019.).

1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivo Principal

O objetivo principal desse trabalho é analisar os procedimentos realizados para avaliação de integridade de caldeiras por meio de entrevistas com engenheiros.

1.1.2 Objetivos Específicos

- Entrevistar engenheiros;
- Apresentar como são realizados os procedimentos;
- Indicar as dificuldades;
- Apresentar as soluções para as dificuldades;
- Apresentar os procedimentos mais e menos utilizados.

1.2 Justificativa

Atualmente há uma grande quantidade de empresas que utilizam caldeiras em vários locais do nosso país, e é necessário a avaliação de integridade das caldeiras para garantir a segurança dos operadores e das instalações, além de garantir o seu funcionamento de uma forma otimizada.

É um cenário de grande competitividade, porém os engenheiros formados não possuem o conhecimento adequado para realizar os procedimentos necessários. Isso acontece pois os procedimentos aprendidos no curso de Engenharia Mecânica são realizados em corpos de provas ideais, prontos para estudo e realizados em laboratórios, além de não ser apresentada a forma de escolha do método a ser utilizado. Porém, em campo, muitas vezes estas condições não são obtidas, sendo necessário adaptação dos procedimentos.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Degradação dos Equipamentos

De acordo com a norma da *American Petroleum Institute* (Instituto Americano de Petróleo) API RP 573, prática recomendada (*Recommended Practice – RP*) que descreve sobre práticas de inspeção para caldeiras a vapor e aquecedores, e a API RP 571, prática recomendada que descreve sobre os mecanismos de dano que afetam os equipamentos da indústria, os equipamentos são expostos a uma grande variedade de condições de processo e de condições externas que causam deterioração dos materiais que compõem a estrutura do equipamento. Segundo as normas, os documentos são de referência que tem objetivo de disponibilizar informações úteis e que complementa outras API e práticas recomendadas.

Para a execução da avaliação de integridade, conforme Furtado et. al. (2013), é importante a identificação do mecanismo de dano para a avaliação dos defeitos e dos danos acumulados. Como os mecanismos de dano dependem de diversos fatores, então é necessário averiguar cada unidade e seus componentes individualmente.

Furtado et. al. (2013, p.5) diz que “Os mecanismos de dano mais comuns em componentes operando sob fluência são fadiga, corrosão-fadiga e corrosão assistida pelo fluxo.”

A corrosão, um dos mecanismos de dano mais comuns, pode causar grande deterioração dos materiais, como é apresentado na figura 1, onde o tubo teve a redução de espessura devido a corrosão.

Figura 1 - Tubo apresentando corrosão severa



Fonte: Adaptado de API RP 573 (2013)

2.2 Métodos de Avaliação

Existem diversos métodos para realizar a inspeção das caldeiras, métodos para avaliação de danos por fluência, métodos onde é feito a medição de espessura da camada de óxido e métodos de análise dimensional. Para isso existem diversos tipos de ensaios que foram criados justamente para analisar e avaliar as características dos materiais no estado em que se encontram (MIGLIAVACCA, 2019).

Segundo Garcia et al. (2008 apud Migliavacca, 2019), os ensaios dos materiais são classificados em destrutivos, no qual é provocado a inutilização parcial ou total da peça, e não-destrutivos, no qual não compromete a integridade da peça.

Os ensaios não-destrutivos garantem informações qualitativas necessárias para a avaliação da integridade dos equipamentos e, ainda assim, permitindo o funcionamento normal da caldeira após o ensaio, caso não seja detectado nenhum problema (GARCIA et al., 2008 apud MIGLIAVACCA, 2019).

Segundo Migliavacca (2019), os ensaios não-destrutivos tiveram uma evolução considerável nos últimos anos, obtendo melhorias na confiabilidade e segurança. Porém, bons resultados dependem do exercício do profissional que está executando os ensaios.

Os principais ensaios não-destrutivos utilizados são:

- Exame visual;
- Líquidos Penetrantes;
- Partículas Magnéticas;
- Ensaios Radiográficos;
- Ultrassom;
- Ensaio IRIS;
- Correntes Parasitas;
- Ensaios Metalográficos por Réplica;
- Ensaios por Extensometria;
- Análise Físico Química de Materiais;
- Emissão Acústica (EA);
- Termografia. (MIGLIAVACCA, 2019, p. 30)

Há também o ensaio hidrostático que, segundo Migliavacca (2019), não é considerado por muitos técnicos como um ensaio não-destrutivo, pois o ensaio pode ocasionar diversos tipos de falhas. Porém, conforme a NR-13, é obrigatório o ensaio hidrostático em sua fase de fabricação e na avaliação de integridade.

Os engenheiros que fazem as avaliações de integridade das caldeiras não utilizam todos os métodos apresentados no dia a dia, pois a determinação do ensaio é realizada, segundo Migliavacca (2019, p.74), “[...] conforme a necessidade de cada componente, mas sempre avaliando as suas vantagens e limitações, ou seja, se eles são onerosos, caros, difícil interpretação, entre outras[...]”.

2.2.1 Exame Visual

O ensaio visual, segundo Furtado et. al. (2013), consiste em uma análise das condições da superfície de uma peça, podendo ser realizado a olho nu ou com o auxílio de lente de aumento ou até uma câmera de vídeo.

De acordo com Migliavacca (2019), esse ensaio é aplicado em muitas peças ou praticamente todas. É utilizado na identificação de vibrações, amassamentos, fraturas, vazamentos, esfoliações, corrosão (como apresentado na figura 2), etc. No ensaio visual também pode ser acompanhado os demais sentidos, como o tato, olfato e audição. O ensaio é principalmente utilizado para a determinação do ensaio posterior, assim evitando a perda de tempo e recursos.

Figura 2 - Ensaio visual da tubulação de um gerador de vapor



Fonte: Adaptado BREMER (2014).

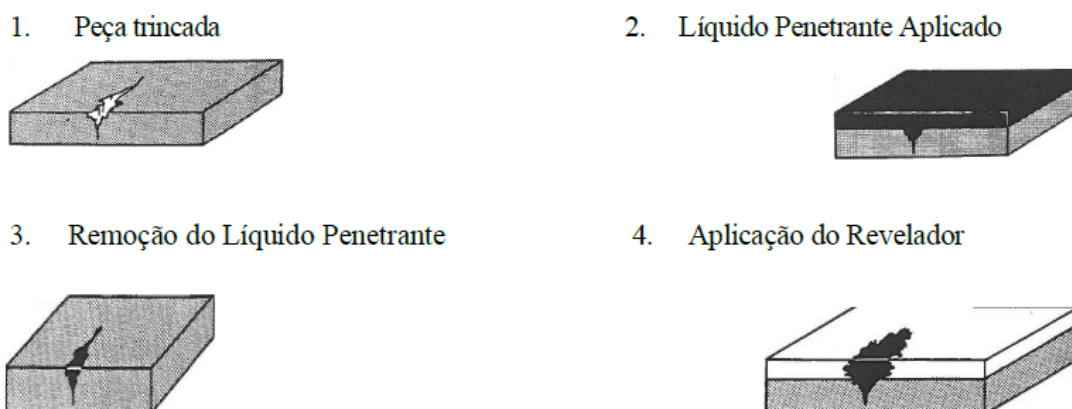
2.2.2 Ensaio por Líquidos Penetrantes

O ensaio por Líquidos Penetrantes, Conforme Andreucci (2019), consiste em aplicar o líquido no local onde há uma abertura ou defeito, deixar com que ocorra a penetração do líquido, retirar o excesso do líquido, aplicar o revelador, o qual absorve o líquido, assim a imagem da descontinuidade é revelada e é possível realizar a avaliação, como é demonstrado a sequência da aplicação na figura 3.

O líquido penetrante tem a capacidade de penetrar na descontinuidade pois, segundo Hellier (2001 apud Migliavacca, 2019), ocorre o fenômeno da ação capilar, onde a tensão superficial permite que líquidos sejam atraídos para aberturas apertadas como resultado das energias presentes nas superfícies das aberturas.

De acordo com Furtado et. al. (2013), as etapas do ensaio consistem em limpeza da superfície, aplicação do líquido penetrante, medição do tempo, remoção do excesso do líquido penetrante, aplicação do revelador, medição do tempo e obtenção dos resultados.

Figura 3 - Sequência de aplicação do ensaio de líquido penetrante.



Fonte: Adaptado de Furtado et. al. (2013).

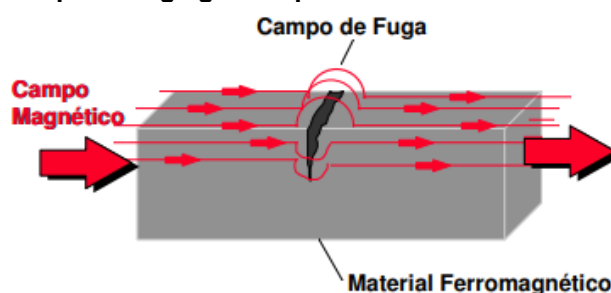
Segundo Migliavacca (2019), o ensaio é recomendado quando o objetivo é detectar as descontinuidades superficiais, pois o líquido mostra a localização das descontinuidades com facilidade e precisão, podendo revelar descontinuidades da ordem de 0,001 mm de abertura, além de não possuir limitação de forma, tamanho e material. Porém não pode ser utilizado o método em superfície absorvente ou porosa.

Uma das desvantagens do ensaio, conforme Furtado et. al. (2013), seria detectar descontinuidades subsuperficiais, sendo principalmente utilizado com o objetivo de identificar falhas em processos de soldagem, fundição, fadiga e corrosão.

2.2.3 Ensaio Por Partículas Magnéticas

O ensaio por partículas magnéticas consiste em um campo magnético aplicado em um material ferromagnético, fazendo com que as linhas de campo penetrem no material. As linhas de campo, caso encontre algum obstáculo no percurso, realiza o contorno do obstáculo, gerando um campo de fuga, como é demonstrado na figura 4, que ao aplicar as partículas magnéticas no material, elas se acumulam nesta região, revelando a presença de descontinuidades (GARCIA et al., 2008 apud MIGLIAVACCA, 2019).

Figura 4 - Campo de fuga gerado por uma descontinuidade no material



Fonte: Adaptado de Andreucci (2018)

Furtado et al. (2013) diz que o ensaio é utilizado na identificação de descontinuidades superficiais e subsuperficiais em materiais ferromagnéticos, podendo encontrar defeitos como trincas, junta fria, inclusões, gota fria, dupla laminação etc. Possui dificuldade na detecção das descontinuidades tridimensionais e apresenta alguns riscos na aplicação do ensaio como o choque elétrico e inalação de partículas. Furtado ainda ressalta a importância de magnetizar a peça em duas direções defasadas em 90°.

2.2.4 Ensaio Radiográficos

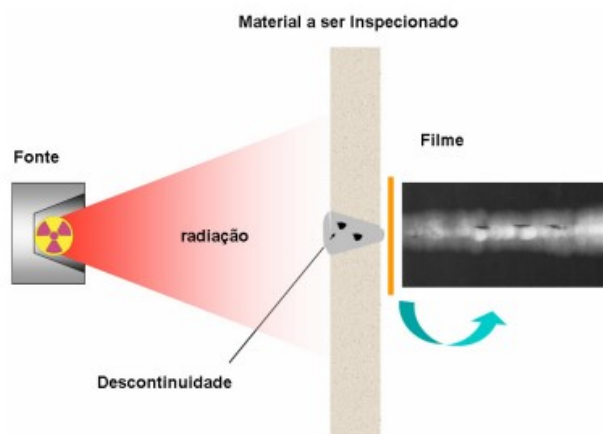
O ensaio radiográfico, conforme Furtado et al. (2013), é baseado na propriedade de absorção diferenciada da radiação pela matéria, sendo utilizado um feixe de radiação γ , x ou nêutrons e projetando a imagem em um filme radiográfico, como apresentado na figura 5. É bastante similar a radiografia feita em humanos. O ensaio pode ser executado com a utilização de aparelhos industriais, fontes de Radiação Gama, filmes de Raio X e a Radiografia Digital.

É um ensaio com alto poder de penetração, dessa forma consegue-se resultados muito precisos, garante a inspeção de sistemas complexos, soldas, análise de fundidos, desgastes e redução de espessura. É possível a realização do ensaio sem a retirada dos isolamentos térmicos e é um ensaio muito versátil (MIGLIAVACCA, 2019).

Conforme Hellier (2001 apud Migliavacca, 2019), o ensaio apresenta alguns riscos de segurança com a utilização dos dispositivos de radiação, tem limitações de espessura, pode ser demorado e exige ampla experiência e treinamento do profissional.

Segundo Furtado (2013), é possível a detecção de descontinuidades, trincas, vazios e inclusões.

Figura 5 - Técnica geral de ensaio radiográfico



Fonte: Adaptado de Andreucci (2014)

O ensaio é, de acordo com Andreucci (2014):

[...] de certa forma insuperável na documentação da qualidade do produto inspeccionado, pois a imagem projetada do filme radiográfico representa a "fotografia" interna da peça, o que nenhum outro ensaio não destrutivo é capaz de mostrar na área indústria. (ANDREUCCI, 2014, p. 6)

2.2.5 Ensaio Por Ultrassom

O ensaio por ultrassom, conforme Andreucci (2018), tem como objetivo detectar descontinuidades internas e defeitos presente nos equipamentos podendo eles serem ferrosos ou não.

De acordo com Garcia et al. (2008 apud Migliavacca, 2019), o ensaio utiliza ondas ou impulsos ultrassônicos para detectar os defeitos superficiais ou internos dos componentes. Garcia também ressalta que quanto maior for a frequência de vibração, menor é o tamanho dos defeitos e descontinuidades que podem ser detectadas.

Furtado et al. (2013) afirmam que o ensaio se baseia na reflexão das ondas quando encontram algum obstáculo durante a sua propagação, a onda refletida é captada por um transdutor que converte em sinais eletrônicos e apresenta os sinais em uma tela, como é observado na figura 6, assim podendo ser identificado a localização do obstáculo.

Algumas das vantagens do ensaio, como diz Migliavacca (2019), são a alta sensibilidade, tempo curto de execução, fácil aplicação e pode ser utilizada em várias espessuras, sendo que o ensaio tem a aplicação mais comum na medição da espessura do componente.

Figura 6 - Ensaio de ultrassom



Fonte: Adaptado de Furtado et. al. (2013)

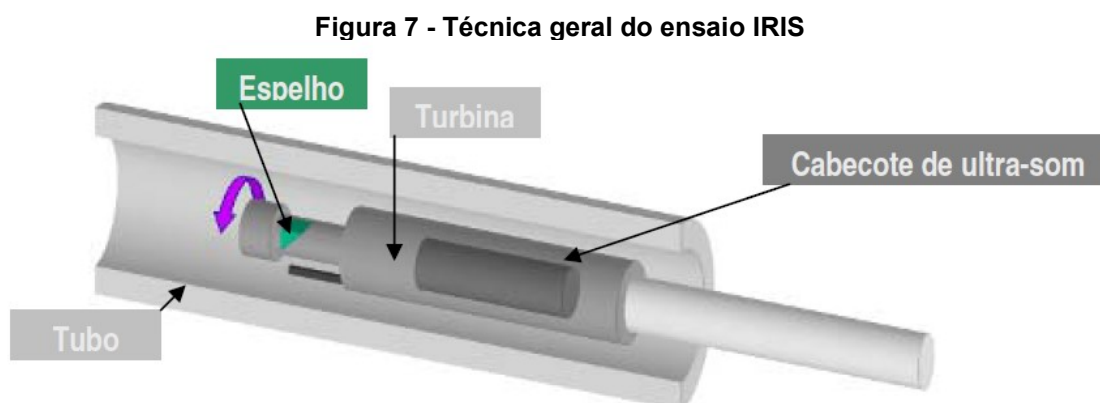
2.2.6 Ensaio IRIS

Segundo Furtado et. al. (2013), o ensaio IRIS (*Internal Rotary Inspection System*) é um ensaio ultrassônico especial, onde as medições são executadas por um equipamento que faz uma varredura circunferencial completa das tubulações, como apresentado na figura 7.

Furtado et. al. (2013) ainda dizem que o ensaio IRIS é amplamente utilizado na avaliação de tubos de caldeiras. O ensaio consegue medir a espessura dos tubos além de indicar a espessura das fendas e áreas danificadas.

Os resultados dependem da superfície ensaiada, da qualidade da limpeza, além de que apresenta dificuldades em obter bons resultados em tubos aletados (FURTADO et al, 2013).

Para Sabino (2008 apud Migliavacca, 2019), o ensaio IRIS não apresenta boa sensibilidade a trincas ou pequenos furos.



Fonte: Adaptado de Araujo e Silva (2009)

2.2.7 Ensaio Por Correntes Parasitas

O ensaio por correntes parasitas consiste na indução de corrente elétrica, nos materiais que são condutores, esta corrente é gerada por um campo magnético, ou seja, por uma bobina alimentada com corrente elétrica. Conforme esta bobina vai passando ao longo do material ela produz correntes parasitas que sofrem alterações

quando encontram descontinuidades. O ensaio pode detectar trincas superficiais e subsuperficiais e medir a espessura (FURTADO et al. 2013).

De acordo com Migliavacca (2019), o ensaio possui um custo alto, necessita de bom conhecimento do profissional e é muito sensível, o que acaba ocasionando a diversas variáveis que acabam dificultando os resultados dos ensaios.

2.2.8 Ensaios Metalográficos Por Réplica

Este ensaio, segundo Migliavacca (2019), consiste no desenvolvimento de uma réplica do material, quando a obtenção de uma amostra específica não é possível, para realizar uma análise em laboratório. É realizada uma análise metalográfica, onde é verificada as fases presentes na microestrutura dos materiais.

Conforme Furtado et al. (2013), é um ensaio de alto custo e demorado, pois para a preparação da região a ser analisada necessita de lixamento e polimento do material até que a superfície fique isenta de riscos e ataque com reagentes químicos. Com este ensaio é possível fazer a avaliação da microestrutura e, conseqüentemente, a avaliação das suas propriedades e a perda das mesmas, dessa forma possibilitando avaliar os danos provocados durante a operação e determinar a vida remanescente.

Com a amostra metalográfica ainda é possível obter dados precisos de diâmetro, espessura de parede, camadas de óxidos e dureza de um tubo (MIDDLETON, et al. 1996 apud MIGLIAVACCA, 2019).

2.2.9 Ensaio Por Extensometria

É um ensaio onde é utilizado a técnica de medição de deformações nos corpos com uso de extensômetro (MAGALHÃES, 2008 apud MIGLIAVACCA, 2019)

Furtado et al. (2013) dizem que o ensaio é utilizado para analisar e acompanhar os níveis de tensões em um componente, medir deslocamento, força, aceleração, temperatura, vazão, pressão, entre outros. É utilizado o equipamento chamado de extensômetro, que possui uma resistência variável, que quando ocorre deformações, variam os sinais elétricos emitidos que são convertidos em gráficos ou em relatórios. É um ensaio de baixo custo, com alta precisão e que garante excelentes respostas dinâmicas.

2.2.10 Análise Físico Química Dos Materiais

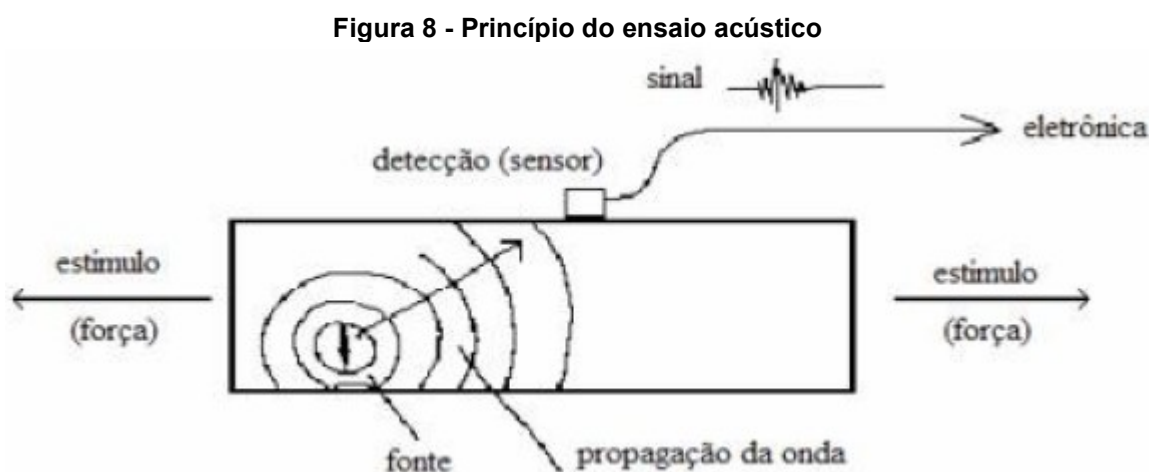
Segundo Migliavacca (2019, p. 56), “O ensaio baseia-se na análise dos elementos fundamentais presentes no componente avaliado [...]”.

O ensaio é utilizado para a análise dos materiais dos depósitos e incrustações em caldeiras e tubulações, e com os resultados obtidos na análise é possível determinar a aplicação de tratamentos preventivos e corretivos na água utilizada para evitar futuros problemas (FURTADO et al. 2013).

2.2.11 Emissão Acústica

Este ensaio, como é demonstrado na figura 8, é baseado na detecção de ondas que são emitidas pelas discontinuidades e defeitos presentes no equipamento. Ao sofrer estímulo ou solitação, os defeitos liberam ondas de tensões que estão na forma de ondas mecânicas transientes, que são captadas por transdutores piezoelétricos que transformam em sinais elétricos (FURTADO et al. 2013).

Segundo Tiboni (2011 apud Migliavacca, 2019), o ensaio pode ser realizado em uma ampla variedade de estruturas, materiais e espessuras, sendo considerado um método global.



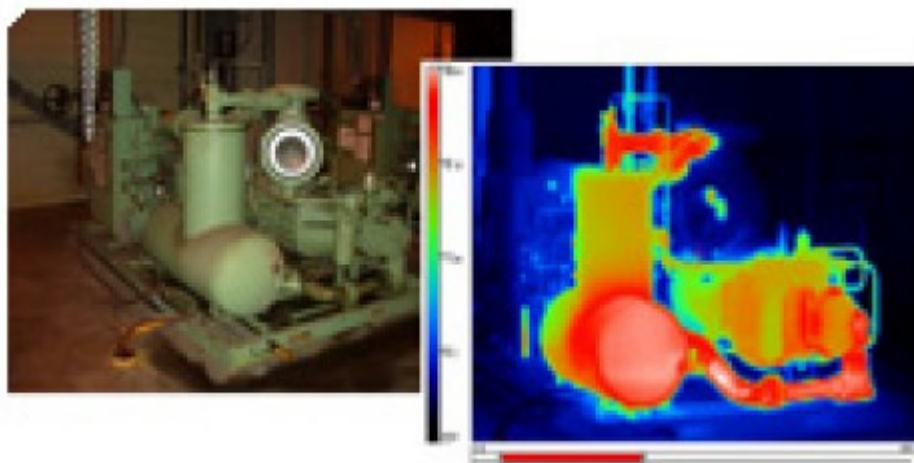
2.2.12 Ensaio por Termografia

Para Cortizo (2007 apud Migliavacca, 2019), o ensaio por termografia é baseado na percepção da radiação térmica emitida por um corpo quando a sua temperatura for superior ao zero absoluto. Para que seja possível este ensaio é necessário um diferencial de temperatura entre o alvo e o meio. O componente, quando recebe um pulso de energia térmica, propaga a energia por difusão, que tem a taxa modificada quando há presença de descontinuidades.

Na imagem gerada é possível observar os pontos onde há um maior diferencial de temperatura através de cores, com é demonstrado na figura 9.

Para Furtado et al. (2013), a termografia é um ensaio simples e muito utilizado. Hellier (2001 apud Migliavacca, 2019) diz que é um ensaio muito versátil e que é eficaz em numerosas aplicações.

Figura 9 - Exemplo do resultado do ensaio termográfico



Fonte: Adaptado de Furtado et. al. (2013)

2.2.13 Ensaio Hidrostático

O ensaio hidrostático, segundo Furtado et al. (2013), consiste em exercer um carregamento crescente e limitado de pressão e observar os resultados, onde a pressão de teste é acima da pressão máxima de trabalho admissível pelo equipamento. O ensaio é sempre realizado após a aplicação dos ensaios não-

destrutivos, pois é necessário a avaliação de algum defeito para que seja determinado uma nova pressão de trabalho, assim evitando o risco de fratura frágil do equipamento.

O ensaio hidrostático é, de acordo com Migliavacca (2019), “utilizado para verificar se a nova pressão máxima de trabalho admissível e a pressão para o ensaio estão condizentes com a realidade da caldeira e, também, para verificar se esta pressão não causa alteração nos defeitos já detectados [...]”. Além de que o ensaio é considerado por muitos profissionais como um ensaio destrutivo.

3 METODOLOGIA

Para atingir o objetivo do presente trabalho, foi feita entrevistas por meios eletrônicos com engenheiros que atuam na área, para isto, foi utilizado um questionário que abrange o máximo de informações sobre os métodos. Após as entrevistas, foi realizado uma análise das informações obtidas, uma comparação entre elas e com as informações abordadas anteriormente.

3.1 Roteiro de Entrevista

O roteiro de entrevista que foi utilizado nas entrevistas é composto pelas seguintes perguntas:

1- Quais métodos de avaliação de integridade em caldeira você utiliza normalmente?

R:

2- Como você determina qual método (ordem de aplicação) será utilizado em uma caldeira?

R:

3- Ao iniciar a avaliação de integridade de uma caldeira, qual o **primeiro passo**?

R:

Considerando os métodos apontados na questão 1, responda para cada método.

4- Como são realizados os procedimentos do método escolhido: materiais e equipamentos?

R:

5- Quais são as dificuldades encontradas na utilização do método? Como normalmente são solucionadas essas dificuldades?

R:

6- Quais são as vantagens e desvantagens do método?

R:

7- Quando serão necessários o cálculo e a verificação a pressão máxima de trabalho admissível? Você utiliza o ensaio hidrostático? Por quê?

R:

8- Quais são os motivos da não utilização dos outros métodos?

R:

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 Resultados das Entrevistas

Foram realizadas entrevistas por meios digitais com 03 profissionais habilitados, engenheiros mecânicos com boa experiência na área e que realizam serviços de inspeção periódica, integridade e extraordinária conforme a NR-13. Os engenheiros participantes são o Luiz Felipe Coelho, Lucas Serrano e um engenheiro que preferiu não ser identificado, sendo representado por Engenheiro A

A partir das respostas do roteiro, foi levantado os principais pontos comentados pelos engenheiros e apresentado abaixo.

As respostas individuais de cada engenheiro estão disponíveis nos anexos A, B e C

4.1.1 Métodos Normalmente Utilizados

Os 3 profissionais entrevistados apontam como os métodos de avaliação de integridade em caldeiras normalmente utilizados o ensaio visual, ensaio com líquidos penetrantes, ensaio com partículas magnéticas, ensaio por ultrassom e o ensaio hidrostático. O Engenheiro A, além desses métodos, também utiliza o teste de estanqueidade.

Os três engenheiros afirmam que utilizam outros métodos, como por exemplo ensaio por raio X e ensaios metalográficos por réplica, porém com uma frequência menor, sendo utilizados em situações específicas dependendo do planejamento da inspeção.

4.1.2 Determinação dos Métodos e da Ordem de Aplicação - Início da Inspeção

De acordo com os três profissionais, a determinação dos métodos e da ordem de aplicação depende do modelo da caldeira e da situação que se encontra, então a maneira que será realizada a inspeção de integridade da caldeira varia para cada caldeira, não possuindo um método único.

Segundo o engenheiro Lucas Serrano, a determinação de quais métodos de avaliação e a ordem de aplicação é realizado a partir principalmente do conhecimento dos mecanismos de dano da caldeira, a viabilidade de execução e a precisão dos resultados. Com esse conhecimento é realizado um planejamento detalhado das atividades que serão realizadas durante a inspeção.

O Engenheiro A ressalta a importância da verificação do histórico do equipamento a partir do livro de registro, onde estará anotado as manutenções do equipamento, se apresentou falha alguma vez e se teve alguma alteração realizada. Além da verificação de toda a documentação, engenheiro Luiz Felipe Coelho também ressalta a importância da organização da segurança para a realização da inspeção.

Os métodos não informados no tópico anterior são utilizados com uma menor frequência. Isso ocorre pois os métodos possuem menor custo-benefício na maioria dos casos, pois os custos para a aplicação são mais elevados e os resultados obtidos são próximos dos métodos com custos mais baixos. Porém existem casos em que é necessário um método específico para atingir o resultado requerido.

O engenheiro Lucas Serrano usa como exemplo a comparação entre o ensaio por ultrassom e o ensaio por raio X, pois ambos os métodos com análise volumétrica e possuem resultados bem próximos, porém o transporte e manuseio do equipamento para o ensaio de raio X apresenta maior dificuldade, além de não ser autorizado o transporte por aeronave no caso do *offshore*, sendo necessário ir de barco, é necessário também isolar a área para o ensaio, aumentando o custo e o tempo de aplicação do método. Em situações em que a caldeira apresenta tubulações de diâmetros pequenos, como 1 polegada de diâmetro, o ensaio por ultrassom tem baixa precisão nos resultados e se faz necessário cabeçotes especiais que acomplem neste diâmetro, mas o raio X apresenta bons resultados nesta situação, sendo assim o fator determinante para a escolha do raio X na execução da inspeção.

Após recolher toda a informação necessária e a preparação para a realização da inspeção, os profissionais habilitados normalmente realizam a inspeção visual como o primeiro passo. Os passos seguintes seguem o planejamento realizado anteriormente e depende dos resultados dos testes anteriores, e normalmente finalizam realizando o ensaio hidrostático.

Segundo o engenheiro Lucas Serrano, a ordem dos ensaios não possui relevância tão grande, porém se tem uma preferência em realizar os ensaios superficiais primeiro e depois os volumétricos.

4.1.3 Procedimentos para Realização dos Métodos

Para a realização dos métodos de avaliação de integridade de caldeiras há diversos procedimentos, materiais e equipamentos necessários, que variam entre cada método, situação da caldeira e a viabilidade de execução no local.

Os profissionais habilitados usam sempre as normas como base para a realização dos métodos. A norma API RP 573, segundo o engenheiro Lucas Serrano, é bem detalhada, sendo a principal norma para execução dos ensaios, as normas *ASME Boiler & Pressure Vessel Code* e API 579, norma que descreve sobre avaliação de integridade estrutural (*fitness for service*), também são muito utilizadas. Além das normas, o profissional Luiz Felipe Coelho considera importante a experiência prévia com os métodos para a elaboração dos procedimentos.

Segundo o engenheiro Lucas Serrano, para a maioria dos ensaios não destrutivos uma boa preparação da superfície garante resultados melhores nos ensaios. Para a preparação da superfície é necessário o lixamento da superfície, utilizando uma escova rotativa ou escova de cerdas de aço, dependendo do estado do material, depois é realizada a assepsia do local, normalmente utilizando um removedor, deixando a superfície livre de resíduos, óleos e impurezas.

Para o ensaio de líquidos penetrantes, é necessário o kit de líquidos penetrantes, que contém o líquido penetrante, removedor e revelador, e o ensaio pode ser aplicado logo após a preparação da superfície. O ensaio de partículas magnéticas também pode ser aplicado logo após a preparação da superfície.

Para o ultrassom, além do equipamento, é utilizado um acoplante para garantir o preenchimento das saliências do material, a vaselina, por exemplo, pode ser usada como um acoplante para o ultrassom. No ultrassom é utilizado dois tipos de ensaios, para a medição da espessura e para a verificação e mapeamento de trincas. Quando a caldeira possui uma grande quantidade de tubos, é realizado o teste em uma amostragem, entre 20% e 25% dos tubos existentes.

De acordo com Engenheiro A, para o teste de estanqueidade, realiza a pressurização da tubulação com ar comprimido e verifica se ocorre perda de pressão na tubulação. Este teste tem como objetivo identificar vazamentos a partir da perda de pressão na tubulação.

Para o ensaio hidrostático, os engenheiros utilizam água e uma bomba hidrostática, aplicando uma pressão acima da Pressão Máxima de Trabalho - PMTA,

cerca de 1,3 à 1,5 vezes a PMTA, dependendo do equipamento e do ano do projeto. Então é realizada uma inspeção visual detalhada das soldas e juntas durante o ensaio hidrostático.

Em caldeiras flamotubular, em caso de existência de furo na tubulação, de acordo com o profissional Lucas Serrano, o tubo é isolado em ambos os lados, bloqueando a passagem dos gases quentes da combustão.

Na presença de trincas ou algum outro tipo de dano, é realizado um dimensionamento do dano e aplicado métodos para analisar se o dano impede o equipamento operar adequadamente. Um dos métodos é a avaliação de integridade estrutural (*fitness for service*), conforme a norma API 579, sendo feita a verificação por cálculos matemáticos ou até por análises de elementos finitos. A partir dos resultados é definido a necessidade da realização de alguma manutenção ou não. Um dos métodos para a manutenção de trincas consiste em remover material até remover completamente a trinca e repor o material retirado.

4.1.4 Dificuldades Encontradas na Inspeção

Devido ao conhecimento do histórico do equipamento e um bom planejamento da inspeção, pois o planejamento é baseado nas normas que são rígidas e bem detalhadas, os engenheiros afirmam que raramente encontram dificuldades durante a execução dos métodos. As maiores dificuldades para a realização da inspeção são encontradas antes de iniciar a inspeção.

O engenheiro Luiz Felipe Coelho ressalta a dificuldade de as empresas realizarem os procedimentos necessários para a realização do serviço de inspeção. Para a realização da inspeção é necessário a caldeira estar parada e fria, porém com muita frequência o equipamento é encontrado funcionando ou recém parada, mas a alta temperatura, sendo necessário a aplicação de técnicas de resfriamento para ser possível a realização da inspeção sem danificar a caldeira.

Segundo o engenheiro Lucas Serrano, a parada do funcionamento da caldeira causa a parada da produção, o qual prejudica a empresa economicamente, dessa forma é importante planejar quando será feita a inspeção em conjunto com a empresa. O engenheiro Lucas Serrano também comenta que diversas empresas não realizam a manutenção correta do equipamento e não mantêm a água tratada, dessa forma dificultando a inspeção geral.

O Engenheiro A comenta que se pode encontrar dificuldades devido ao local de instalação do equipamento, caso se no local possui recursos ou espaço para aplicação correta da inspeção.

4.1.5 Vantagens e Desvantagens dos Métodos Mais Utilizados

O ensaio utilizando líquidos penetrantes e o de partículas magnéticas são os ensaios economicamente mais viáveis e de fácil aplicação, sendo amplamente conhecidos e utilizados na indústria, porém os resultados obtidos são limitados, trazendo resultados superficiais e subsuperficiais (no caso das partículas magnéticas).

O ultrassom entrega bons resultados, é possível realizar a medição da espessura, verificar a presença de trincas internas e realizar o mapeamento das trincas, porém o ultrassom necessita de calibração do equipamento, dificuldade na certificação do equipamento, porém é um ensaio que está bem concretizado no mercado com muitos especialistas. O equipamento de ultrassom encontra dificuldade em ensaios de tubulações pequenas, como tubulação com 1 polegada de diâmetro, obtendo resultados com baixa precisão.

Com a aplicação do ensaio hidrostático é possível averiguar se todas as juntas foram apertadas corretamente, se há algum vazamento caso algum ponto não foi verificado nos ensaios anteriores, podendo assim a realização da correção. O ensaio hidrostático também verifica se o equipamento está apto para trabalhar na PMTA estabelecida. O ensaio hidrostático provoca um grande estresse no equipamento pois o ensaio é realizado com a pressão acima de PMTA, podendo ser um ensaio destrutivo caso o equipamento tenha algum defeito crítico.

Segundo o Engenheiro A, os ensaios não destrutivos são menos agressivos ao equipamento, pois assim o equipamento não é submetido a grande estresse, porém entregam uma menor exatidão nos resultados. Já nos ensaios destrutivos coloca os equipamentos em grande estresse, mas em compensação os resultados obtidos são determinantes na comprovação da integridade operacional da Caldeira.

Para o engenheiro Luiz Felipe Coelho, a utilização das normas para a aplicação dos métodos traz como vantagem a aplicação de um conhecimento que vem sendo acumulado por anos.

4.1.6 Verificação da Pressão Máxima de Trabalho Admissível

É de grande importância a Pressão Máxima de Trabalho Admissível (PMTA) bem definida para garantir o funcionamento do equipamento com a menor chance de ocorrer um acidente futuro.

Segundo o Engenheiro A, o cálculo da PMTA é sempre referente a espessura da chapa encontrada. Dessa forma a redução da espessura da chapa causada pela degradação do material altera a PMTA.

De acordo com o engenheiro Lucas Serrano, pelo fato de a caldeira ser projetada considerando uma redução da espessura causada pela corrosão, possuindo assim uma folga na espessura para que não haja a alteração da PMTA futuramente, então o cálculo da PMTA só é realizado com a espessura das chapas ultrapassam os limites estabelecidos no projeto do equipamento.

Já para o engenheiro Luiz Felipe Coelho, é necessário o cálculo da PMTA em toda inspeção realizada, pois o engenheiro afirma que podem ocorrer diversos problemas no período de 1 ano entre uma inspeção e a outra, para a inspeção periódica.

O engenheiro Lucas Serrano ressalta a importância de verificar se a mudança da PMTA vai atender os processos de produção da empresa.

4.2 Análise das Entrevistas

A partir dos resultados obtidos com as entrevistas dos profissionais habilitados, é possível observar que, apesar de alguns detalhes diferentes, os principais pontos ressaltados pelos engenheiros são muito semelhantes, sendo os fatores mais determinantes para uma boa avaliação de integridade de caldeiras. Os principais pontos foram mostrados no quadro 1.

Quadro 1 - Resumo dos principais pontos ressaltados pelos engenheiros

(continua)

Métodos normalmente utilizados	<p>Ensaio visual; Ensaio por líquidos penetrantes; Ensaio por partículas magnéticas; Ensaio por ultrassom; Ensaio hidrostático. São ensaios com boa relação de custo-benefício.</p>
Como determinar quais métodos que serão aplicados na inspeção	<p>Juntar toda documentação do equipamento; Verificar todo o histórico do equipamento; Conhecer todos os mecanismos de dano do equipamento; Verificar a viabilidade de execução; Verificar os resultados necessários; Determinar os métodos com base nos itens acima e nas normas API RP 573, API RP 571 e ASME Boiler & Pressure Vessel Code</p>
Ordem de aplicação	<p>Após determinar quais métodos escolhidos, e com o máximo de informações sobre o equipamento, realizar o planejamento detalhado da inspeção; Normalmente iniciar com ensaio visual, depois os ensaios superficiais, depois os ensaios volumétricos e finalizar com o ensaio hidrostático. A ordem de aplicação não apresenta uma grande relevância.</p>
Realização dos métodos	<p>Preparação prévia; Seguir o planejamento; Realizar uma boa preparação da superfície, sendo feito o lixamento e a assepsia do local; Realizar os métodos se baseando nas normas, principalmente na API RP 573 e ASME Boiler & Pressure Vessel Code; Conhecimento prévio da aplicação dos métodos é importante; Ao encontrar defeitos, fazer uma análise do dano utilizando, principalmente, o método de avaliação de integridade estrutural (<i>fitness for service</i>), se baseando na norma API 579, a partir dos resultados, verificar a necessidade de manutenção ou não.</p>
Dificuldades durante a inspeção	<p>Com um planejamento detalhado, dificilmente são encontradas dificuldades durante a aplicação dos métodos; Estar preparado caso, no momento da inspeção, o equipamento é encontrado em funcionamento ou recém parado; Conversar com o cliente e programar o melhor momento para a inspeção, evitando prejudicar muito a empresa economicamente.</p>
Vantagens e desvantagens: Ensaio por líquidos penetrantes	<p>Vantagens: Baixo custo, facilidade de aplicação, amplamente utilizados na indústria. Desvantagens: Resultados limitados a defeitos superficiais.</p>
Vantagens e desvantagens: Ensaio por partículas magnéticas	<p>Vantagens: Idem ensaio por líquidos penetrantes. Desvantagens: Resultados limitados a defeitos superficiais e subsuperficiais.</p>
Vantagens e desvantagens: Ensaio por ultrassom	<p>Vantagens: Entrega bons resultados, verifica defeitos internos, realiza a medição da espessura. Desvantagens: Necessita de calibração do equipamento, dificuldade na certificação do equipamento e resultados com baixa precisão em tubulações pequenas (com 1 polegada de diâmetro por exemplo).</p>

Quadro 1 – Resumo dos principais pontos ressaltados pelos engenheiros

(conclusão)

<p>Vantagens e desvantagens: Ensaio hidrostático</p>	<p>Vantagens: Verifica algum vazamento não verificado com os ensaios anteriores, verifica se as juntas foram apertadas corretamente, verifica se o equipamento pode trabalhar na PMTA estabelecida.</p> <p>Desvantagens: Gera um grande estresse no equipamento, pode se tornar um ensaio destrutivo caso o equipamento apresente um defeito crítico.</p>
<p>Vantagens e desvantagens: Utilização de normas para realização dos ensaios</p>	<p>Vantagens: Aplicação de um conhecimento acumulado de vários anos.</p>
<p>Verificação da Pressão Máxima de Trabalho Admissível (PMTA)</p>	<p>A PMTA bem definida diminui a chance de acidentes futuros; Sempre verificar a PMTA, sendo necessário o cálculo quando as espessuras da tubulação ultrapassam os limites estabelecidos no projeto do equipamento.</p> <p>Utilizar como base a norma API 579.</p>

Fonte: A autoria própria (2022)

5 CONCLUSÃO

A princípio o planejamento para atingir o objetivo do presente trabalho era acompanhar uma ou duas inspeções detalhadamente, porém devido a pandemia do Coronavírus (COVID-19), houve a proibição devido aos protocolos sanitários. Após a liberação dos protocolos sanitários, houve diversas tentativas por parte do autor e do orientador para a realização do acompanhamento, mas as empresas continuaram proibindo a entrada de pessoas que não estejam envolvidas diretamente no trabalho. Dessa forma o planejamento foi alterado para a realização de entrevistas por meios digitais com profissionais habilitados.

A partir de estudos das referências pertencente ao presente trabalho e com as entrevistas com os engenheiros Luiz Felipe Coelho, Lucas Serrano e Engenheiro A, os quais comentaram sobre a experiência profissional adquirida na área de Inspeção de Caldeiras, foi possível atingir o objetivo do presente trabalho.

Ambos os engenheiros apresentaram informações próximas para as questões apresentadas nas entrevistas, sendo assim possível realizar uma conclusão assertiva.

Como foi apresentado no item 2.2, segundo Migliavacca (2019), os engenheiros não utilizam todos os métodos apresentados para realizar as inspeções e, conforme as informações adquiridas nas entrevistas dos engenheiros citados anteriormente, realmente não são utilizados todos os métodos. Esse fato acontece por diversos motivos, sendo o principal a relação do custo da execução com os resultados que podem ser obtidos entre os métodos, como o exemplo apresentado no item 4.2 pelo engenheiro Lucas Serrano

Os métodos mais utilizados pelos profissionais entrevistados, e pela indústria no geral, são o ensaio visual, ensaio de líquidos penetrantes, ensaio por partículas magnéticas, ensaio por ultrassom e o ensaio hidrostático. São ensaios que entregam bons resultados na maioria das situações, possuem menores custos e são de fácil aplicação. Apesar dos outros métodos, como os citados no capítulo 2, serem utilizados com menor frequência, pode-se concluir que é de grande importância o conhecimento para a aplicação desses métodos, pois existe a chance da necessidade da utilização de algum desses métodos menos usuais.

O planejamento da inspeção é a principal atividade antes de iniciar a inspeção, pois um bom planejamento evita encontrar dificuldades, assim promovendo

uma boa execução da inspeção. Durante o planejamento será determinado quais métodos será aplicado na inspeção. Para poder realizar um bom planejamento é necessário juntar toda a documentação disponível do equipamento, conhecer todo o histórico, conhecer o local de instalação da caldeira e estudar sobre os mecanismos de dano do equipamento utilizando a norma API RP 571 como base, pois é a principal norma que descreve sobre os mecanismos de dano.

Na execução da inspeção, não há uma ordem certa para a aplicação dos métodos, apenas uma recomendação em começar com ensaio visual, seguindo com ensaios superficiais e depois com ensaios volumétrico, sendo a principal recomendação na utilização do ensaio hidrostático no final da inspeção, pois com este ensaio é possível garantir de que o equipamento não apresenta vazamentos, tanto por trincas ou defeitos como por algum erro durante a etapa de remontar as peças retiradas para a execução dos métodos anteriores.

Apesar dos profissionais necessitarem seguir a NR-13 para a execução dos ensaios, é de forte recomendação a utilização das normas API RP 571, API RP 573, *ASME Boiler & Pressure Vessel Code* e API 579. A utilização dessas normas garante uma boa execução da inspeção e minimizam riscos futuros.

A partir dos resultados obtidos nos ensaios, como a presença de trincas e a espessura da chapa, é definido se é necessário a realização de alguma manutenção ou a alteração da PMTA do equipamento. É sempre necessário verificar a PMTA, sendo que em algumas situações é necessário o cálculo de uma nova PMTA, usando como base a norma API 579.

É sempre de grande importância conhecer as condições do cliente, pois em muitos casos a parada da produção para a inspeção pode ser complicado para o cliente, sendo um problema econômico, e em casos em que é necessário a alteração da PMTA, pode ser que a nova PMTA não atenda a produção da empresa, então sendo necessário apresentar as vantagens técnicas e econômicas da inspeção para o cliente.

O bom conhecimento dos métodos, possuir os materiais necessários, juntar toda a documentação da caldeira, estudar e conhecer os mecanismos de dano e as condições do cliente, realizar um planejamento detalhado da inspeção e sempre utilizar as normas disponíveis, sempre mantendo as normas atualizadas, são os principais pontos para garantir uma boa execução da inspeção de integridade da caldeira.

REFERÊNCIAS

ANDREUCCI, R. **Líquidos Penetrantes**. Associação Brasileira de Ensaios Não Destrutivos e Inspeção - ABENDI, São Paulo, Jan/2019.

ANDREUCCI, R. **Partícula Magnética**. Associação Brasileira de Ensaios Não Destrutivos e Inspeção - ABENDI, São Paulo, Nov/2018.

ANDREUCCI, R. **Ultrassom**. Associação Brasileira de Ensaios Não Destrutivos e Inspeção - ABENDI, São Paulo, Jun/2018.

ANDREUCCI, R. **Radiologia Industrial**. Associação Brasileira de Ensaios Não Destrutivos e Inspeção - ABENDI, São Paulo, Jan/2014.

API 579-1 ASME: Fitness for service, American Petroleum Institute, Junho, 2016.

API Recommended Practice 573: Inspection of Fired Boilers and Heaters, American Petroleum Institute, Outubro, 2013.

API Recommended Practice 571, Damage Mechanisms Affecting Fixed Equipment in the Refining Industry, American Petroleum Institute, Março, 2020.

ARAUJO, M. D.; SILVA, A. R. **Aplicação Conjugada das Técnicas de IRIS, Correntes Parasitas, Campo Remoto e MFL na Inspeção de Tubos de Troca Térmica**. São Leopoldo, 2009.

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

BREMER, **Relatório de Visita Técnica**, em uma empresa do sudoeste do Paraná, 2014.

FURTADO, H. C.; FELIPPE, L.; VIEIRA, P.; MAGALHÃES, F. J.; ALMEIDA De, L. D. **Avaliação de Integridade e Estimativa de Vida Útil de Componentes de Caldeiras em UTES**, Grupo de trabalho de manutenção de usinas térmicas – GTMT/ABRAGE, Recomendação Técnica, Belo Horizonte, 2013.

MARTINELLI JUNIOR, Luiz Carlos. **Geradores de Vapor**. [S.l.]: UNIJUI: campus Panambi, 2002.

MIGLIAVACCA, Caciano. **Análise dos Métodos de Avaliação de Integridade em Caldeiras**. 2019. 79f. Trabalho de Conclusão de Curso – Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Pato Branco, 2019.

NOGUEIRA, Luiz Augusto Horta; ROCHA, Carlos R.; NOGUEIRA, Fábio José H. **Eficiência energética no uso do vapor**. Rio de Janeiro: Eletrobrás, 2005.196 p.

NR-13 Caldeiras, Vasos de Pressão e Tubulação, Ministério do Trabalho, Brasil, Dez/2018.

PÊRA, H. **Geradores de Vapor**. Editora Fama, São Paulo, 2. ed.1990.

SOARES, Sergio Damasceno. **CORRELAÇÕES ENTRE EMISSÃO ACÚSTICA DE DEFEITOS E PARÂMETROS DE MECÂNICA DA FRATURA NA AVALIAÇÃO DA INTEGRIDADE DE EQUIPAMENTOS PRESSURIZADOS**. 2008. 261 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Metalúrgica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2008.

ANEXO A – Questionário respondido pelo Lucas Serrano

1. Quais métodos de avaliação de integridade em caldeira você utiliza normalmente?

R: Inspeção audiovisual, líquido penetrante (em regiões que possuem muita tensão), partículas magnéticas, ultrassom (para mapeamento de corrosão), teste hidrostático

2. Como você determina qual método (ordem de aplicação) será utilizado em uma caldeira?

R: É determinado a partir do conhecimento dos mecanismos de dano da caldeira e pela viabilidade de execução no local, com esse conhecimento é feito um planejamento das atividades, uma instrução da inspeção

3. Ao iniciar a avaliação de integridade de uma caldeira, qual o **primeiro passo**?

R: após o conhecimento dos mecanismos de dano e a preparação da instrução da inspeção, normalmente o primeiro passo da inspeção é a realização do exame visual, avaliando toda a caldeira visualmente, durante o exame visual, normalmente já é aplicado os ensaios superficiais, como líquidos penetrantes e partículas magnéticas, nos pontos de interseção de solda e outros pontos que apresenta algum tipo de fragilidade, como trincas.

Considerando os métodos apontados na questão 1, responda para cada método.

4. Como são realizados os procedimentos do método escolhido: materiais e equipamentos?

R: Na maioria dos ensaios não destrutivos é feito uma preparação da superfície, é feito o lixamento da superfície com o uso de uma escova rotativa ou escova de cerdas de aço, dependendo do estado do material, depois é realizada a assepsia do local, com um removedor que normalmente acompanha o líquido penetrante, deixando a superfície livre de resíduos, impurezas e óleos. Essa preparação garante melhores resultados nos ensaios.

O líquido penetrante é aplicado após a preparação da superfície, é retirado o excesso e depois é aplicado o revelador.

As partículas magnéticas podem ser aplicadas logo depois da preparação da superfície

No ultrassom é necessário a aplicação de um acoplante, normalmente é utilizado a vaselina.

5. Quais são as dificuldades encontradas na utilização do método? Como normalmente são solucionadas/circuladas essas dificuldades?

R: Como a inspeção é sempre muito bem planejada, raramente é encontrada alguma dificuldade na execução dos métodos. A maior dificuldade na realização da inspeção é a parada da produção, pois a parada da produção prejudica a empresa economicamente.

6. Quais são as vantagens e desvantagens do método?

R: Os ensaios de líquido penetrante e o de partículas magnéticas são os ensaios economicamente mais viáveis e fácil aplicação, sendo amplamente conhecidos e utilizados na indústria, porém os resultados obtidos são limitados, trazendo resultados superficiais e subsuperficiais (no caso das partículas magnéticas)

O ultrassom entrega bons resultados, é possível realizar a medição da espessura, verificar a presença de trincas internas e realizar o mapeamento das trincas, porém o ultrassom necessita de calibração do equipamento, dificuldade na certificação do equipamento, porém é um ensaio que está bem concretizado no mercado com muitos especialistas. O equipamento de ultrassom encontra dificuldade em ensaios de tubulações pequenas, como tubulação com 1 polegada de diâmetro, obtendo resultados com baixa precisão

7. Quando serão necessários o cálculo e a verificação a pressão máxima de trabalho admissível? Você utiliza o ensaio hidrostático? Por quê?

R: Somente é necessário a verificação e o cálculo da pressão máxima de trabalho admissível quando as espessuras da tubulação ultrapassam os limites estabelecidos no projeto.

O ensaio hidrostático é bastante utilizado no final da inspeção justamente para verificar se há algum, se as juntas foram apertadas corretamente e para verificar se há algum ponto que não foi visto na inspeção visual. O ensaio sempre é aplicado na inspeção de integridade.

8. Quais são os motivos da não utilização dos outros métodos?

R: Os outros métodos também são utilizados, porém com uma frequência menor. Os mecanismos de dano, a viabilidade econômica, a viabilidade de execução no local e a precisão dos resultados são os principais motivos da utilização ou não utilização de determinados métodos.

Por exemplo, o raio X obtém resultados parecidos com o ultrassom, ambos com análise volumétrica, o transporte e manuseio do equipamento para o ensaio de raio X apresenta maior dificuldade, a área precisa ser isolada para a aplicação do ensaio, além de não ser autorizado o transporte por aeronave no caso do offshore, sendo necessário ir de barco. Em situações em que a caldeira apresenta tubulações de diâmetros pequenos, como 1 polegada de diâmetro, o ensaio por ultrassom tem baixa precisão nos resultados e se faz necessário cabeçotes especiais que acomplem neste diâmetro, mas o raio X

apresenta bons resultados nesta situação, sendo assim o fator determinante para a escolha do raio X na execução da inspeção

ANEXO B –Questionário respondido pelo Engenheiro A

1. Quais métodos de avaliação de integridade em caldeira você utiliza normalmente?

R: Teste hidrostático, Ensaios não destrutivos como Líquidos Penetrantes, visual e medição de espessura por ultrassom e teste de estanqueidade.

2. Como você determina qual método (ordem de aplicação) será utilizado em uma caldeira?

R: Depende do tipo de inspeção se ela é Inicial (primeira inspeção feita, geralmente é feita na empresa que fabricou a Caldeira), Periódica (Feitas em caldeiras que estão em uso contínuo na produção e tem que ser inspecionada constantemente com intervalo de tempo determinado pelo PH da última inspeção) ou a Extraordinária (Esta inspeção é feita em caldeiras que tenham mais de 15 ou 20 anos de uso, e também para Caldeiras que estejam mais de 6 meses inoperantes).

É difícil determinar um método único para todas as caldeiras, pois cada uma vai apresentar desafios e necessidades diferentes para inspeção.

Lembrando que a inspeção serve justamente para garantir a integridade do equipamento para operar dentro das condições de segurança.

3. o iniciar a avaliação de integridade de uma caldeira, qual o **primeiro passo**?

R: Verificar o histórico do equipamento com livro de registro do equipamento. No registro estará anotado se o equipamento teve alteração, manutenção ou apresentou falha em algum dia. Com essa informação o PH pode focar melhor sua inspeção nas áreas mais críticas.

Considerando os métodos apontados na questão 1, responda para cada método.

4. Como são realizados os procedimentos do método escolhido: materiais e equipamentos?

R: No teste hidrostático é usado água e bomba hidrostática.

Para Líquidos Penetrantes, teste não destrutivo para detectar trincas, descontinuidades superficiais de materiais isentos de porosidade, tais como metais ferrosos e não ferrosos baseado no fenômeno da capilaridade é o poder de um líquido de fluir e penetrar em áreas extremamente pequenas devido à sua baixa tensão superficial.

O ultrassom usado por um Medidor de Espessura por Ultrassom ao qual basicamente é realizado com a emissão de pulsos de frequência, que são emitidos por um cristal que percorre através do material e refletem ao localizar uma descontinuidade. Essa energia retorna ao cristal e transforma o sinal mecânico em elétrico, visualizado na tela do aparelho determinando a espessura da chapa (casco).

O teste de estanqueidade é o processo para checar se há ou não, vazamento de gás na tubulação. Por meio da pressurização da tubulação com ar comprimido, verificando se ocorre a perda de pressão portanto o vazamento.

5. Quais são as dificuldades encontradas na utilização do método? Como normalmente são solucionadas/circuladas essas dificuldades?

R: Depende mais do local de instalação do equipamento, se neste local tem recursos ou espaço para aplicação correta da inspeção.

6. Quais são as vantagens e desvantagens do método?

R: As vantagens dos ensaios não destrutivos são menos agressivas ao equipamento não submetendo a grandes estresses, mas tendo uma menor exatidão nos resultados.

Já nos ensaios destrutivos coloca os equipamentos em grande estresse, mas em compensação os resultados obtidos são determinantes na comprovação da integridade operacional da Caldeira.

7. Quando serão necessários o cálculo e a verificação a pressão máxima de trabalho admissível? Você utiliza o ensaio hidrostático? Por quê?

R: O cálculo da PMTA é sempre usado referente a espessura da chapa encontrada ou para determinação de mudança da operação podendo cobrar mais ou menos do equipamento.

Sim uso o teste hidrostático, para confirma que o equipamento pode trabalhar na PMTA estabelecida.

8. Quais são os motivos da não utilização dos outros métodos?

R: Quem determina qual método utilizar sempre será do PH tendo em mente todo histórico e necessidade do equipamento. Podendo assim encontrar a melhor forma de comprovar a integridade do equipamento para operar dentro das condições de segurança estabelecida (PMTA).

ANEXO C – Questionário respondido pelo Luiz Felipe Coelho

1. Quais métodos de avaliação de integridade em caldeira você utiliza normalmente?

R: Atualmente tomo como base normas para realização da inspeção, as principais são a NR-13, API, ASME. Junto com essas eu aplico ensaios não destrutivos e destrutivos para avaliar a integridade da caldeira. Utilizo ensaio visual, ensaio por ultrassom, líquido penetrante, partículas magnéticas, teste hidrostático, teste de alimentação.

2. Como você determina qual método (ordem de aplicação) será utilizado em uma caldeira?

R: Depende muito do modelo da caldeira e da situação que ela se encontra, mas sempre início com inspeção visual e no final finalizo com teste hidrostático.

3. O iniciar a avaliação de integridade de uma caldeira, qual o primeiro passo?

R: Verificar toda documentação da caldeira e organizar toda parte de segurança para iniciar os trabalhos.

Considerando os métodos apontados na questão 1, responda para cada método.

4. Como são realizados os procedimentos do método escolhido: materiais e equipamentos?

R: Uso normas como base e crio procedimento com base nela e na experiência. Utilizo vários materiais e equipamentos, mas os principais são ultrassom, LP, Bomba de teste hidrostático.

5. Quais são as dificuldades encontradas na utilização do método? Como normalmente são solucionadas/circuladas essas dificuldades?

R: Uma das maiores dificuldades é a falta das empresas seguirem os procedimentos para realizar o serviço de inspeção. Para fazer a inspeção a caldeira deve estar parada e fria. Mas devido ao planejamento interno das empresas, muitas estão operando quando chego para fazer a inspeção, ou desligaram a caldeira na última hora e a alta temperatura impede de realizar o serviço. Uma forma é conversar bem com o cliente, mas não tem uma boa eficiência, outra forma que aplicamos e técnicas de resfriamento para que possamos realizar a inspeção sem danificar a caldeira.

6. Quais são as vantagens e desvantagens do método?

R: Pensando no método de inspeção utilizando normas e procedimentos, tenho como vantagem a aplicação de um conhecimento que vem acumulando de anos e posso aplicar, outra vantagem é a proteção jurídica para caso de um problema eu posso comprovar que aplico normas e códigos internacionais para realização do serviço. A desvantagem que são normas todas americanas, é necessário ter conhecimento de um inglês técnico para entendimento da norma, e a outra é que os valores para comprar essas normas e se manter atualizado tem um custo bem alto.

7. Quando serão necessários o cálculo e a verificação a pressão máxima de trabalho admissível? Você utiliza o ensaio hidrostático? Por quê?

R: Toda inspeção é necessária realizar o cálculo da PMTA, pois muitos problemas podem ocorrer nesse período de 1 ano de inspeção. Em caldeira apenas de ser um ensaio destrutivo, eu sempre realizo o teste hidrostático, por ser um equipamento grande geralmente, ter muitas conexões, muitas soldas, mandrilagem, eu faço o teste em busca de vazamentos para realizar a correção antes de um acidente futuro.

8. Quais são os motivos da não utilização dos outros métodos?

R: Existe vários outros métodos de ensaios para serem utilizados, mas a maioria tem custos bem elevados, e só tem vantagens se for realizar inspeção em grandes empresas. A aplicação desses outros ensaios não se torna viável para a maioria dos inspetores.

ANEXO D – Termo de autorização de uso de imagem – Luiz Felipe Coelho

TERMO DE AUTORIZAÇÃO DE USO DE IMAGEM

Eu, Luis Felipe Coelho, nacionalidade Brasileiro, estado civil Casado, portador da Cédula de Identidade RG nº 5795247, inscrito no CPF/MF sob nº_05721613955, residente à Rua Marechal Deodoro, nº 2271, no município União da Vitória – PR, AUTORIZO o uso de minha imagem em todo e qualquer material entre fotos e documentos, para ser utilizada no Trabalho de Conclusão de Curso, tema: **Análise dos Procedimentos de Avaliação de Integridade em Caldeiras**, do autor: **Guilherme Mori Gonçalves**, do curso de Engenharia Mecânica da Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

A presente autorização é concedida a título gratuito, abrangendo o seu uso exclusivamente para o Trabalho de Conclusão de Curso de Guilherme Mori Gonçalves.

Por esta ser a expressão da minha vontade declaro que autorizo o uso acima descrito sem que nada haja a ser reclamado a título de direitos conexos à minha imagem ou a qualquer outro, e assino a presente autorização.

Local e data: União da Vitória/PR, 30 de Junho de 2022.



Luis Felipe Coelho

Contato: (42) 99910-1523

lfcoelhopr@hotmail.com

ANEXO E – Termo de autorização de uso de imagem – Lucas Serrano

TERMO DE AUTORIZAÇÃO DE USO DE IMAGEM

Eu, **LUCAS SERRANO VASCONCELOS MONTEIRO**, nacionalidade **BRASILEIRA**, estado civil **SOLTEIRO**, portador da Cédula de Identidade RG nº , inscrito no CPF/MF sob nº **356.234.518-61**, residente à Rua **JOSE CARLOS SALES**, nº **96**, no município **JACAREI-SP** AUTORIZO o uso de minha imagem em todo e qualquer material entre fotos e documentos, para ser utilizada no Trabalho de Conclusão de Curso, tema: **Análise dos Procedimentos de Avaliação de Integridade em Caldeiras**, do autor: **Guilherme Mori Gonçalves**, do curso de Engenharia Mecânica da Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

A presente autorização é concedida a título gratuito, abrangendo o seu uso exclusivamente para o Trabalho de Conclusão de Curso de Guilherme Mori Gonçalves.

Por esta ser a expressão da minha vontade declaro que autorizo o uso acima descrito sem que nada haja a ser reclamado a título de direitos conexos à minha imagem ou a qualquer outro, e assino a presente autorização.

Local e data: **JACAREÍ, 01 DE JULHO DE 2022**



Assinatura: _____

Contato: 12 99717-5585
Serrano1888948@gmail.com