

**UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ**  
**DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE MECÂNICA**  
**CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA**

**CACIANO MIGLIAVACCA**

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

**TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO**

**PATO BRANCO**

**2019**

CACIANO MIGLIAVACCA

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

Trabalho de Conclusão de Curso de graduação, apresentado à disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso 2, do Curso de Engenharia Mecânica do Departamento Acadêmico de Mecânica-DAMEC – da Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR, Campus Pato Branco, como requisito parcial para obtenção do título de Engenheiro Mecânico.

Orientador: Prof. Dr. Luiz Carlos Martinelli  
júnior

PATO BRANCO

2019

## FOLHA DE APROVAÇÃO

### Análise dos Métodos de Avaliação de Integridade em Caldeiras

Caciano Migliavacca

Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação apresentado no dia 27/06/2019 como requisito parcial para a obtenção do Título de Engenheiro Mecânico, do curso de Engenharia Mecânica do Departamento Acadêmico de Mecânica (DAMEC) da Universidade Tecnológica Federal do Paraná - Campus Pato Branco (UTFPR-PB). O candidato foi arguido pela Banca Examinadora composta pelos professores abaixo assinados. Após deliberação, a Banca Examinadora julgou o trabalho **APROVADO**.

---

Profa. Dra. Maria Nalu Verona Gomes  
(UTFPR – Departamento de Mecânica)

---

Prof. Dr. Paulo Cezar Adamczuk  
(UTFPR – Departamento de Mecânica)

---

Prof. Dr. Luiz Carlos Martinelli Junior  
(UTFPR – Departamento de Mecânica)  
Orientador

---

Prof. Dr. Paulo Cezar Adamczuk  
Responsável pelo TCC do Curso de Eng. Mecânica

\*A Folha de Aprovação assinada encontra-se na Coordenação do Curso de Engenharia Mecânica

## **AGRADECIMENTOS**

Ao Prof. Dr. Luiz Carlos Martinelli Júnior pelo conhecimento transmitido, tempo disponibilizado e paciência durante as semanas de orientações e ensino.

A todo o corpo docente da UTFPR, que de uma forma ou outra fizeram parte desta jornada, além de todo o conhecimento transmitido e construído.

À minha família especialmente meus pais, Leo Pedro Migliavacca e Marli Franzosi Migliavacca, pela oportunidade e ensinamentos transmitidos, além de todos os conselhos e tempo disponibilizado ouvindo meus apelos e me motivando a continuar e nunca desistir.

À minha namorada Eloisa Regina Zanchet, pela parceria, amor e dedicação nas horas de sono perdidos e dúvidas tiradas, pelo carinho e tempo a mim dedicado.

Aos meus colegas pelo incentivo e esforço compartilhado em busca da tão sonhada formatura.

A Deus, pois mesmo com todo o apoio nos momentos de maior insegurança e desafios foi onde recorri e desabafei, para me reestabelecer e voltar aos trabalhos superando estes desafios.

## EPÍGRAFE

O que vale não é o quanto se vive, mas como se vive! ( KING Jr, Martin Luther)

Consulte não a seus medos, mas a suas esperanças e sonhos. Pense não sobre suas frustrações, mas sobre seu potencial não usado. Preocupe-se não com o que você tentou e falhou, mas com aquilo que ainda é possível a você fazer. (Papa João Paulo II).

## RESUMO

MIGLIAVACCA, Caciano. Análise dos Métodos de Avaliação de Integridade em Caldeiras. 2019. 88f. Trabalho de Conclusão de Curso – Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Pato Branco, 2019.

Este trabalho apresenta uma abordagem teórica dos métodos utilizados na avaliação de integridade como os mesmos fazem uso de ensaios de campo para poderem avaliar as novas condições de operação das caldeiras. Primeiramente foram realizadas pesquisas bibliográficas sobre os métodos e os ensaios, estes que são geralmente ensaios não destrutivos, devido ao objetivo da avaliação ser preservar a estrutura da caldeira e estes ensaios não comprometerem sua operação futura. São apresentados e discutidos o princípio, a aplicação, a utilização e as limitações de cada ensaio. Estas informações foram discutidas em pesquisa com 3 profissionais da região de abrangência da UTFPR campus Pato Branco, para poder comparar o que a teoria nos informa com o que é realmente posto em prática pelos profissionais habilitados. O resultado foi satisfatório e mostrou o quão importante o ensaio visual e o planejamento adotado são importantes para se ter uma avaliação mais precisa e rápida.

**Palavras-chave:** Avaliação de integridade. Ensaios não destrutivos. Caldeira. Métodos.

## **ABSTRACT**

MIGLIAVACCA, Caciano. Analysis of Boiler Integrity Assessment Methods. 2019. 88f. Trabalho de Conclusão de Curso – Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Pato Branco, 2019.

This work presents a theoretical approach of the methods used in the evaluation of integrity and the same use of field tests to be able to evaluate the new conditions of operation of the boiler. Firstly, bibliographical research was carried out on the methods and the field tests which are generally non-destructive tests, due to the objective of the evaluation being to preserve the boiler structure and these tests do not compromise its operation. The principle, application, use and limitations of each test are presented and discussed. This information was discussed in a research with 3 professionals from the UTFPR region, in order to compare what the theory tells us with what is actually put into practice by qualified professionals. The result was satisfactory and showed how important the visual test and the adopted strategy are important for a more accurate and rapid evaluation.

**Keywords:** Integrity assessment. Non-destructive testing. Boiler. Methods.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – curva deformação x tempo com associação microestrutural proposta por Neubauer.....	27
Figura 2 – Micrografias mostrando a esferoidização presente em ensaios de fluência.....	28
Figura 3 – Sequência de precipitação para aços carbonos ferríticos .....	29
Figura 4 – Picos refletidos na interface do componente inspecionado por ultrassom.....	31
Figura 5 - sequência de aplicação do ensaio de liquido penetrante .....	39
Figura 6 - Linhas de fluxo induzido no componente .....	44
Figura 7 - Separação dos raios gama.....	47
Figura 8 - Gamagrafia em tubulação.....	48
Figura 9 - Ensaio de Ultrassom.....	51
Figura 10 - B-Scan.....	53
Figura 11 - Princípio do ensaio de emissão acústica.....	64
Figura 12 – Imagem de um ensaio visual com o boroscópio .....	74
Figura 13 – Ensaio Visual do Isolamento dos Tubos.....	74
Figura 14 – Solda que será submetida ao ensaio de liquido penetrante .....	75
Figura 15 – Liquido penetrante Aplicado .....	75
Figura 16 – Visualização do ensaio de liquido penetrante com luz ultravioleta .....	76
Figura 17 – Realização de medição de espessura .....	77
Figura 18 – Pontos marcados para se realizar a medição de espessura por ultrassom.....	77



## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Materiais e suas temperaturas limites de fluência .....	23
Tabela 2 - Características dos ensaios não destrutivos .....	82

## LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Dados requeridos para a Avaliação de Integridade .....	23
---	----

## LISTAS DE ABREVIATURAS E SIGLAS

COV	Coeficiente de Variação	%
PCE	Perfis críticos de Espessura	-
D	Diâmetro interno	mm
SNQ&C	Sistema Nacional de Qualificação e Certificação	-
ABENDI	Associação Brasileira de Ensaios Não Destrutivos e Inspeção	-
IRIS	Internal Rotary Inspection System	-
US	Ultrassom	-
EA	Emissão Acústica	-
PMTA	Pressão Máxima de Trabalho Admissível	-
ASME	American Society of Mechanical Engineers	-
PH	Profissional habilitado	-
TH	Teste Hidrostático	-
ANP	Agência Nacional do Petróleo, Gás natural e Biocombustíveis	-
RTSGI	Regulamento técnico do sistema de gerenciamento da integridade estrutural das instalações terrestres de produção de petróleo e gás natural	-

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	<b>16</b>
1.2 OBJETIVOS .....	19
1.2.1 Objetivo Principal .....	19
1.2.2 Objetivos Específicos .....	19
1.3 JUSTIFICATIVA.....	20
<b>2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....	<b>21</b>
2.1 AVALIAÇÃO DE INTEGRIDADE .....	21
2.1.1 Etapa de Planejamento .....	22
2.1.2 Etapa de Inspeção .....	23
2.1.3 Etapa de Análise dos Resultados .....	23
2.2 DEGRADAÇÃO MICROESTRUTURAL .....	26
2.2.1 Método de Neubauer .....	26
2.2.2 Método de Toft e Marsden .....	27
2.2.3 Método de identificação dos carbonetos precipitados .....	28
2.3 RELAÇÃO ENTRE DUREZA E A RESISTÊNCIA A FLUÊNCIA – MEDIÇÃO DE 3 DUREZAS EM CAMPO .....	29
2.4 MEDIÇÃO DE ESPESSURA DA CAMADA DE ÓXIDO .....	30
2.5 ANÁLISE DIMENSIONAL .....	32
2.5.1 Medição de espessura de parede .....	32
2.6 ENSAIOS .....	34
2.6.1 Ensaio Não Destrutivo .....	34
2.7 APLICAÇÃO DOS ENSAIOS NÃO DESTRUTIVOS .....	36
2.7.1 Exame Visual .....	37
2.7.1 Princípio .....	37
2.7.1.2 Aplicação e desenvolvimento .....	37
2.7.1.3 Utilização .....	38

2.7.1.4 Limitações .....	38
2.7.2 Ensaio Por Líquidos Penetrantes .....	38
2.7.2.1 Princípio e Aplicação.....	38
2.7.2.1.1 Penetrantes .....	39
2.7.2.1.2 Revelador .....	41
2.7.2.2 Utilização.....	42
2.7.2.3 Limitações .....	42
2.7.3 Ensaio Por Partículas Magnéticas .....	43
2.7.3.1 Princípio .....	43
2.7.3.2 Partículas Magnéticas.....	44
2.7.3.2.1 Partículas Magnéticas por Via Seca e para Via Úmida .....	44
2.7.3.3 Utilização.....	45
2.7.3.4 Limitações .....	45
2.7.4 Ensaios Radiográficos.....	46
2.7.4.1 Princípio .....	46
2.7.4.2 Aplicação e Desenvolvimento.....	46
2.7.4.3 Utilização.....	48
2.7.4.4 Limitações .....	50
2.7.5 Ensaios Por Ultrassom.....	50
2.7.5.1 Princípio .....	50
2.7.5.2 Aplicação e Desenvolvimento.....	51
2.7.5.3 Utilização.....	52
2.7.5.4 Limitações .....	54
2.7.6 Ensaio IRIS .....	54
2.7.6.1 Princípio .....	54
2.7.6.2 Aplicação e Desenvolvimento.....	55
2.7.6.3 Utilização.....	55

2.7.6.4 Limitações .....	56
2.7.7 Exame Através de Ensaio por correntes Parasitas .....	56
2.7.7.1 Princípio .....	56
2.7.7.2 Aplicação e Desenvolvimento .....	57
2.7.7.3 Utilização .....	57
2.7.7.4 Limitações .....	57
2.7.8 Exame através de ensaios metalográficos por réplica .....	58
2.7.8.1 Princípio .....	58
2.7.8.2 Aplicação e Desenvolvimento .....	59
2.7.8.3 Utilização .....	59
2.7.8.4 Limitações .....	60
2.7.9 Ensaio Por Extensometria .....	60
2.7.9.1 Princípio .....	60
2.7.9.2 Aplicação e Desenvolvimento .....	61
2.7.9.3 Utilização .....	61
2.7.9.4 Limitações .....	62
2.7.10 Análise Físico Química Dos Materiais .....	62
2.7.10.1 Princípio .....	62
2.7.10.2 Aplicação e Desenvolvimento .....	62
2.7.10.3 Utilização .....	63
2.7.10.4 Limitações .....	63
2.7.11 Emissão Acústica .....	63
2.7.11.1 Princípio .....	63
2.7.11.2 Aplicação e Desenvolvimento .....	64
2.7.11.3 Utilização .....	65
2.7.11.4 Limitações .....	65
2.7.12 Termografia .....	66

	15
2.7.12.1 Princípio .....	66
2.7.12.2 Aplicações e Desenvolvimento .....	66
2.7.12.3 Utilização .....	67
2.7.12.4 Limitações .....	68
2.8 ENSAIO HIDROSTÁTICO .....	68
2.8.1 Princípio .....	68
2.8.2 Aplicação e Desenvolvimento .....	69
2.8.3 Utilização .....	69
2.8.4 Limitações .....	70
<b>3 METODOLOGIA .....</b>	<b>71</b>
3.1 PESQUISA COM PROFISSIONAIS HABILITADOS .....	71
<b>4 RESULTADOS E DISCUSSÕES .....</b>	<b>73</b>
4.1 DADOS DO ENSAIO VISUAL .....	73
4.2 DADOS ENSAIO DE LIQUIDO PENETRANTE .....	74
4.3 DADOS ENSAIO DE ULTRASSOM .....	76
4.4 DEMAIS ENSAIOS NÃO DESTRUTIVOS DISCUTIDOS .....	78
4.5 TESTE HIDROSTÁTICO .....	78
4.6 AVALIAÇÃO DOS ENSAIOS UTILIZADOS .....	79
4.7 COMPARAÇÃO ENTRE OS ENSAIOS NÃO DESTRUTIVOS .....	81
<b>5 CONCLUSÃO .....</b>	<b>85</b>
<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>86</b>

## 1 INTRODUÇÃO

As primeiras máquinas destinadas a gerar vapor surgiram no início do século XVIII, (BAZZO, 1995). Segundo Pera (1990), o vapor apresentou grandes vantagens sobre a queima direta de combustível fóssil, tanto nas condições de trabalho quanto na possibilidade de transformação de energia potencial em cinética.

A NR-13 define como caldeiras a vapor os equipamentos destinados a produzir e acumular vapor sob pressão superior à atmosférica, utilizando qualquer fonte de energia, projetados conforme códigos pertinentes, excetuando-se refervedores e similares.

Conforme Bazzo (1995), existe ainda a possibilidade de serem utilizados outros fluidos de trabalho, como óleos minerais ou produtos orgânicos sintéticos, mas a preferência dada ao uso da água é justificada pelo seu alto calor latente, ainda facilitado pela grande disponibilidade de água na indústria. O vapor tornou-se amplamente utilizado pelas indústrias de bebidas, alimentos, têxteis, químicas, etc.

As caldeiras utilizadas para gerar vapor podem ser classificadas de diversas formas. Segundo Martinelli Jr (2002), podem ser classificadas de acordo com a posição dos gases quentes e da água, quanto à posição dos tubos, quanto à forma dos tubos e quanto a natureza da aplicação.

Para Bazzo (1995), no meio industrial, as geradoras de vapor são tratadas por caldeiras, em nível geral as caldeiras podem ser classificadas em aquotubulares, flamotubulares e elétricas. Ainda segundo Bazzo (1995) a definição de cada uma delas:

1) As caldeiras aquotubulares tem uso mais abrangente, atendendo, desde pequenas fábricas, até grandes centrais termelétricas. Nas caldeiras aquotubulares a água circula por dentro de tubos e, frequentemente, são adaptadas em unidades equipadas com economizador e superaquecedores.

2) As caldeiras flamotubulares têm uso limitado às instalações de pequeno porte, com pressões inferiores a 15 bar (1500 kPa) ou capacidades inferiores a 15 t/h de vapor saturado. Nas caldeiras flamotubulares os gases de combustão circulam por dentro de tubos e sua aplicação é restrita apenas às operações que admitem o uso de vapor saturado.

3) As Caldeiras elétricas são convenientes quando houver disponibilidade de energia elétrica e que os custos sejam compensadores. Sua aplicação é bastante restrita e também são projetadas para fornecerem apenas vapor saturado. As caldeiras elétricas tem o princípio de funcionamento fundamentado na conversão direta da energia elétrica em energia térmica, mediante uso de resistências ou de eletrodos submersos. (BAZZO, 1995, p. 6)



Existem também caldeiras que utilizam dois sistemas denominadas caldeiras mistas utilizando a disposição aquotubular e o flamotubular.

Os principais componentes das caldeiras são, segundo Martinelli Jr (2002), cinzeiro, bomba de água, grelha plana, registro de purga, parede interna, fornalha imersa, casco cilíndrico, isolamento térmico(lã de rocha), tampa de inspeção, tubos de gases, válvula de segurança com alavanca, coletor de fuligem, chaminé, duto de gases, defletor de gases, coletor de gases, tampas de limpeza, manômetro com sifão, válvula principal de vapor, espelho superior, visor de nível, placa de identificação, registro de alimentação de água, válvula de retenção, registro de vapor, injetor de água a vapor, espelho inferior, câmara de água, Tampa de carga, peneira de sucção e porta do cinzeiro (regulador de ar).

Segundo Nogueira et al. (2005), a combustão pode ser definida como uma reação química exotérmica rápida. Segundo Pêra (1990), o fenômeno chamado de combustão, é definido apenas com a aplicação das regras de reações entre combustível e comburente, além disso como a reação é exotérmica, libera energia térmica, ou seja, altas temperaturas são envolvidas no processo.

Segundo Nogueira et al. (2005), os produtos da combustão geralmente são gasosos, como o dióxido de enxofre ( $SO_2$ ), monóxido de carbono (CO), dióxido de carbono ( $CO_2$ ) e água ( $H_2O$ ). Contudo, elementos do combustível que não se oxidam ou que já estejam oxidados irão formar as cinzas.

Para Nogueira et al. (2005), o mais importante gerador de vapor é a caldeira, que basicamente é um trocador de calor que trabalha com pressão superior à pressão atmosférica, produzindo vapor a partir da energia térmica fornecida pela combustão. Composta por vários componentes que servem para dar maior eficiência energética ao processo e garantir a segurança dos envolvidos.

Como a caldeira trabalha em alta temperatura e pressão está apresenta vários riscos se não tomadas as medidas para a prevenção dos acidentes, segundo Bazzo (1995), os riscos envolvem além de explosões, intoxicação, incêndios e choques elétricos e ainda segundo Altafini (2002), vários riscos estão envolvidos, como explosões, incêndios, choques elétricos, intoxicações, quedas, ferimentos diversos, etc. Sendo as explosões o risco mais importante.

Segundo Bazzo (1995), ao longo da vida útil do equipamento podem ocorrer mudanças da estrutura do material, seja por ação da corrosão ou pela

exposição prolongada a problemas de superaquecimento, fazendo assim com que o risco de acidentes aumente à medida que diminuí a tensão admissível do material e a espessura da parede.

Para Callister Jr (2008), em algum grau, a maioria dos materiais apresentam algum tipo de interação com o ambiente onde se encontram, com frequência isto acaba comprometendo a utilidade do material com resultado da perda ou diminuição de suas propriedades mecânicas, como resistência mecânica e ductilidade, nos metais existe uma efetiva perda de material, por dissolução ou pela formação de incrustações ou oxidação.

Gentil (2011, p.1), diz que "sendo a corrosão, em geral, um processo espontâneo, está constantemente transformando os materiais metálicos de modo que a durabilidade e desempenho dos mesmos deixam de satisfazer os fins a que se destinam".

Segundo a NR-13, as caldeiras devem ser submetidas a inspeção de segurança inicial, periódica e extraordinária. A inspeção inicial é realizada em caldeiras novas antes de sua entrada em funcionamento, no local definitivo de sua instalação, a inspeção periódica, constituída de exames internos e externos e a inspeção extraordinária é realizada sempre que algum fato inesperado acontece como sobreaquecimento, entre outros.

Conforme descrito na NR-13, todas as caldeiras no máximo ao completarem 25 anos na sua próxima inspeção devem ser submetidas a uma criteriosa avaliação de integridade, para determinar sua vida remanescente e os novos prazos máximos entre inspeções, se ainda estiverem em condições de uso.

Conforme Furtado et al. (2013), a avaliação de integridade surgiu na década de 1980 nos Estados Unidos da América e na Europa, com o principal objetivo de avaliar e estender a vida remanescente das unidades petrolíferas e usinas de geração termelétricas. No Brasil a prática se estabeleceu somente nos anos iniciais da década de 1990, devido principalmente a um acidente com duas mortes na Petroquímica União.

Segundo Furtado et al. (2013), "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".

A estimativa da vida remanescente das caldeiras pode ser feita seguindo alguns critérios.

De posse da estimativa de dano atual, da condição para acúmulo de danos e do critério de falha do componente, pode-se realizar o cálculo de sua vida remanescente. Os métodos para cálculo da vida remanescente de componentes de caldeiras seguem duas linhas básicas:

Cálculos da vida remanescente baseada em métodos de extrapolação a partir testes de fluência acelerados – parâmetros tempo-temperatura e taxa de deformação;

Estimativa de vida remanescente com base em ensaios de campo. (FURTADO et al. 2013, p. 12).

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

Estes métodos utilizados necessitam de medições e ensaios dos componentes dos equipamentos a serem avaliados, em sua maioria são através dos ensaios não destrutivos (ENDs), a seleção destes se baseia em diversos fatores, quando aplicabilidade, restrições, custo, entre outros.

## 1.2 OBJETIVOS

### 1.2.1 Objetivo Principal

Identificar e analisar os métodos existentes e utilizados na determinação da integridade das caldeiras.

### 1.2.2 Objetivos Específicos

Para se atingir o objetivo principal os seguintes objetivos devem ser alcançados.

- Apresentar a avaliação de integridade;
- Demonstrar sua importância e necessidade;
- Identificar e analisar os principais métodos;
- Apresentar os ensaios necessários para poder aplicar os métodos;

### 1.3 JUSTIFICATIVA

As empresas que utilizam as caldeiras estão presentes nos mais diversos locais do nosso país, isto faz com que necessitem realizar este procedimento em suas instalações, pois no cenário atual de competitividade em que todo e qualquer detalhe faz diferença, garantir a segurança das instalações, dos operadores e ainda melhorar seu funcionamento e rendimento se torna essencial.

A vida estimada para as caldeiras no Brasil em vários segmentos é superior aos 25 anos descritos na norma, logo se faz necessário a avaliação de integridade, além da dificuldade para engenheiros formados encontrar material explicando as reais situações, limitações aplicações e equipamentos necessários para se avaliar a integridade.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 AVALIAÇÃO DE INTEGRIDADE

A ANP no RTSGI, infere como definição que a avaliação de integridade é:

Processo sistemático baseado na inspeção do equipamento, na avaliação das indicações resultantes das inspeções, no exame físico do equipamento por diferentes técnicas, na avaliação dos resultados deste exame, na caracterização por severidade e tipo dos Defeitos encontrados, e na verificação da Integridade do equipamento através de análise estrutural. (RTSGI, ANP).

Segundo o Subcomitê de manutenção, Inspeção e Instrumentação a avaliação de integridade deve ser realizada quando:

- Ao completar 80% da vida de projeto (ou 80 000 h quando inexisterem informações quanto ao projeto). Esta recomendação aplica-se principalmente às partes que operam a alta temperatura.
- Ao completar 25 anos. Este é o prazo legal, que em nenhuma hipótese deve ser ultrapassado

As avaliações devem ser iniciadas antes dos prazos acima, nos casos que houver:

- Operação acima da capacidade nominal.
- Excessiva ciclagem (parada e partida) e/ou variações de carga.
- Histórico de partidas e paradas mais rápidas que as previstas em projeto.
- Indícios conhecidos de danos acumulados.
- Histórico de danos acumulados em unidades similares. (Comitê de Segurança em Caldeiras de Recuperação do Brasil, Orientações Gerais Para Avaliação De Integridade Estrutural e Continuação De Vida Útil De Caldeiras De Recuperação).

Vários pontos são levados em consideração e Furtado et al. (2013), contribui dizendo:

Os pontos determinantes para a tomada de decisão de se realizar uma avaliação de integridade são:

- A estrutura atinge um tempo de vida em que uma avaliação de integridade se faz necessária; seja por projeto, por recomendações do fabricante; por norma na qual o projeto se baseou, por novas normas.
- Ocorrência de um acidente em uma estrutura similar;

- Constatação do surgimento de trincas a partir de inspeções periódicas e aumento dos custos de manutenção;
- Mudanças nos níveis de solicitações, tipos de atividades e redirecionamento de uso da estrutura;
- Mudança nos riscos envolvidos com a operação, por exemplo, a ocorrência de crescimento populacional em torno da unidade;
- A necessidade de cobertura técnica para adequação às novas exigências quanto a:
  - Programas de qualidade,
  - Leis de proteção ao consumidor,
  - Implementação de seguros,
  - Novas interpretações sobre responsabilidade civil. (Furtado et al. 2013, p. 5 e 6).

Furtado et al. (2013), diz que a avaliação de integridade se divide basicamente em 3 etapas, que são planejamento, inspeção e análise dos resultados.

### 2.1.1 Etapa de Planejamento

Como geralmente as caldeiras são grandes e é muito oneroso e o espaço de tempo para as inspeções e avaliação de integridade é curto, não é possível avaliar todos os componentes e equipamentos, ou seja, deve-se selecionar os equipamentos mais críticos no processo para se realizar a inspeção, segundo Furtado et al. (2013) a seleção é feita com base em 4 critérios:

- nas condições operacionais: componentes que operam com maiores pressões, temperatura e ambiente corrosivo;
- no histórico de operação do componente: componentes que apresentaram falhas na unidade inspecionada ou em unidades similares no mundo são selecionados para inspeção;
- no tempo necessário para colocar o componente novamente em serviço em caso de falha;
- nos riscos envolvidos no caso de falha do componente. (Furtado et al. 2013, p. 7).

Furtado et al. (2013), diz que nesta etapa também são definidos os ensaios não destrutivos que serão utilizados ou até se necessário os ensaios destrutivos, esta seleção se baseia nos mecanismos de falha passíveis de ocorrerem nos

componentes. Ainda infere que o grau de abrangência da avaliação de integridade segue alguns pontos, que são:

- Nível de documentação técnica do equipamento ou estrutura disponível;
- Custo de reposição do equipamento ou estrutura;
- Custo e o risco de acidentes;
- Custo de manutenção extemporânea ou prolongada;
- Custo do lucro cessante e da sua reação em cadeia. (Furtado et al. 2013, p. 8).

A etapa de planejamento é mostrada como a mais importante na avaliação de integridade estrutural, sendo a que mais exige maior conhecimento do profissional habilitado que executara a avaliação. A importância para Furtado et al. (2013), é demonstrada principalmente devido aos recursos gastos no processo, seja com ensaios excessivos ou tempo gasto, além da seleção errônea do ensaio poder colocar em risco a validade do laudo.

### 2.1.2 Etapa de Inspeção

Segundo Furtado et al. (2013), é nesta etapa que são realizados os ensaios de campo, ou seja, nesta etapa são realizados os ensaios não destrutivos que já estão especificados na etapa de planejamento. Para cada ensaio executado deve ser preenchido um relatório com as condições de ensaio, componente e local da inspeção, resultado e laudo, com assinatura do profissional executor, se necessário, estes relatórios são encaminhados ao profissional habilitado que fará a análise final dos dados.

### 2.1.3 Etapa de Análise dos Resultados

Segundo Furtado et al. (2013), nesta etapa a vida remanescente é calculada, com base nos modelos matemáticos que geralmente são alimentados por dados do monitoramento da caldeira. Os resultados são confrontados com as estimativas realizadas pelos ensaios não destrutivos, executados na etapa de inspeção, a partir desta análise são estabelecidas as medidas que devem ser tomadas

para garantir a integridade de cada componente e o período máximo para uma nova inspeção.

Segundo Furtado et al. (2013) apud EPRI (1986), diz que o ERPI propôs uma metodologia para avaliar a integridade estrutural dividida em 3 níveis. Sendo que o nível subsequente só é realizado quando esgotados os recursos do nível anterior. Assim inicia-se no nível 1, passando-se para os níveis 2 e 3 somente se necessário.

Para Furtado et al. (2013), o nível 1 apresenta apenas uma avaliação preliminar, mais rápida e econômica, baseia-se no levantamento de informações, ou seja, não é realizado nenhum ensaio, examina-se o projeto e os parâmetros de serviços gerais para verificar se com base nestas considerações o componente terá vida útil remanescente maior que a prevista. Comumente acontece de se considerar os resultados das monitorações específicas dos componentes.

Para Furtado et al. (2013), este nível de avaliação é mais conservador e ainda:

O Nível 1 não gera informações novas para o componente. Por esta razão, esta etapa é mais rápida e econômica. As informações utilizadas como base são:

**Informações de projeto:** códigos e normas, ensaios e testes, desenhos, especificações de materiais, tratamentos térmicos, memórias de cálculo, fluxogramas de processo;

**Informação de fabricação:** conformação de materiais, dimensões, relatórios de inspeção;

**Informações originárias de plantas similares:** acidentes ou falhas ocorridas em plantas com projetos similares;

**Informação de operação:** históricos de temperatura e pressão, paradas e partidas, registros de anormalidades, defeitos e seu acompanhamento, procedimento de operação, acidentes, planos de paradas, manutenções ocorridas, planos de inspeções;

Segundo Furtado et al. (2013), no nível 2 exige-se novas informações sobre os componentes, ou seja, informações serão geradas através de inspeção por ensaios não destrutivos, por análise de tensão simples e por análise dimensional.

A avaliação de nível 3, que também é denominada análise complementar é mais cara, esta etapa envolve programas computacionais e análises complexas como: análise por elementos finitos, avaliação da temperatura do tubo em função da espessura de camada de óxidos e exemplo da vida remanescente de fluência



(FURTADO et al. 2013). Os dados requeridos em cada nível de avaliação de integridade pelo ERPI são apresentados no quadro 1,

**Quadro 1: Dados requeridos para a avaliação de Integridade**

Item	Descrição dos dados	Nível 1	Nível 2	Nível 3
1	Características do componente (projeto)	Apenas detalhes básicos	Mais detalhes (básicos e desenhos)	Todos os detalhes disponíveis
2	Histórico de falhas	Histórico de falhas (registro)	Histórico de falhas (registro)	Histórico de falhas (registros)
3	Dimensões	Dados de projeto ou nominal	Nominal ou medições	Medições
4	Condições (inspeção)	Registro existentes	Inspeção	Inspeção detalhada
5	Temperatura e pressão	Dados de projeto ou de operação	Dados de operação ou medições	Medições
6	Tensões	Dados de projeto ou de operação	Cálculos simplificados	Cálculos e análise refinada
7	Propriedades do material	Dados nominais segundo normas	Dados mínimos segundo normas	Dados atuais em uso
8	Amostras de materiais são requeridas?	Não	Não	Sim

Fonte: Furtado et al. (2013)

Segundo Furtado et al. (2013), a avaliação de integridade deve resultar:

A conclusão de uma avaliação de integridade estrutural deve conter:

- uma estimativa da vida residual da estrutura, caso as características operacionais continuem como até o presente momento;
- programas futuros de inspeção e monitoração do equipamento;
- as ações necessárias para a aplicação de um programa de extensão de vida residual, tais como:
  - recuperação,
  - reforço,
  - repotencialização,
- substituição de partes. (Furtado et al. 2013, p. 12).

## 2.2 DEGRADAÇÃO MICROESTRUTURAL

Segundo Furtado et al. (2013), a degradação do material ocorre devido a ações do tempo e temperatura é o fenômeno denominado fluência, acaba ocasionando mudanças principalmente na microestrutura do material como o coalescimento e evolução dos carbonetos precipitados, retirada de molibdênio de solução sólida, aparecimento de vazios e microtrincas.

Conforme Garcia et al. (2008, p 24). "Fluência é definida como a deformação plástica que ocorre em função do tempo para um material submetido a uma tensão constante".

Segundo Furtado et al. (2013), vários métodos foram desenvolvidos e são usados na avaliação de danos por fluência, entre os principais podemos citar o método de Neubauer, baseado na estimativa de vazios aparentes e microtrincas, o método de Toft e Marsden, baseado no coalescimento de carbonetos e o método de identificação dos carbonetos precipitados baseado na identificação e quantificação dos carbonetos precipitados.

### 2.2.1 Método de Neubauer

Para Furtado et al. (2013, apud NEUBAUER, 1983), o método usa a curva deformação x tempo que é característica dos ensaios de fluência, define o procedimento que deve ser utilizado relacionando com o dano encontrado. Neubauer estabelece quatro níveis de danos. Conforme figura 1.

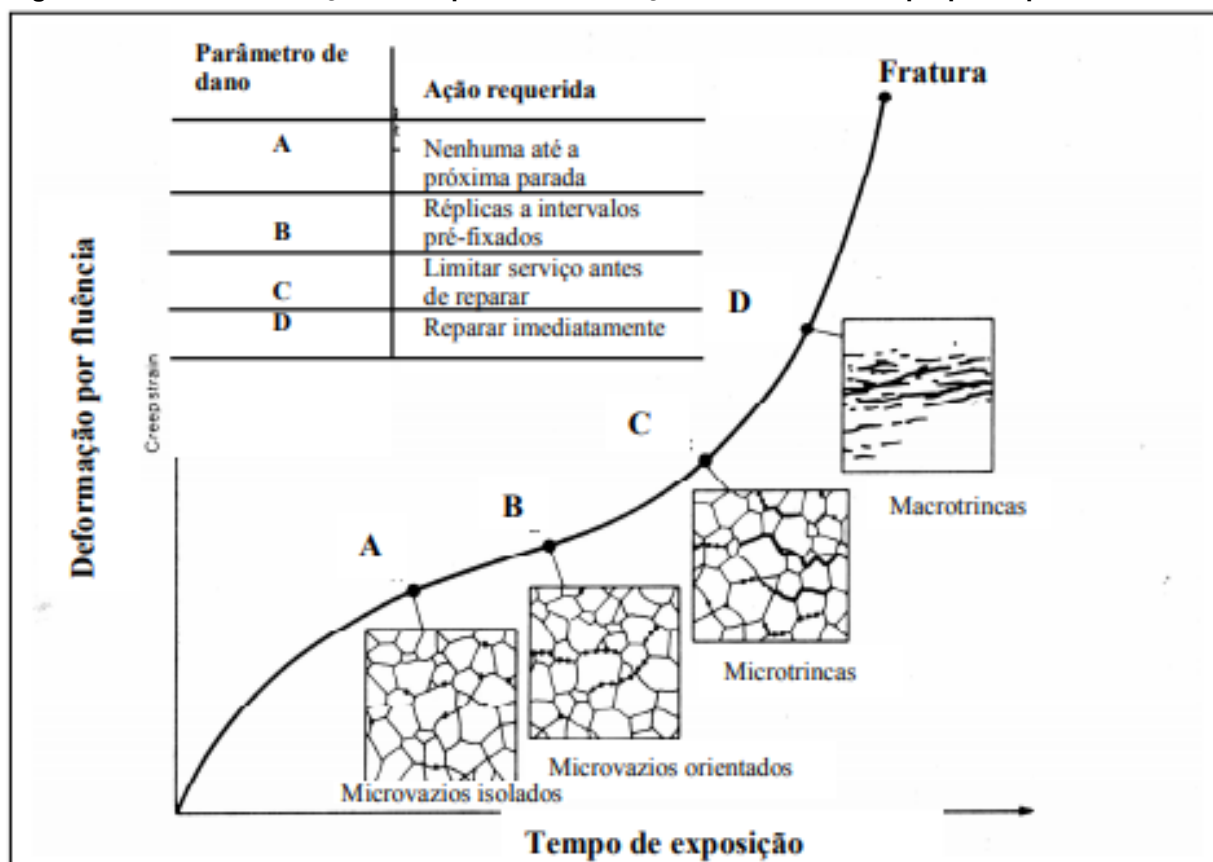
**Nível de dano A:** as primeiras cavidades são formadas no final do segundo estágio de fluência.

**Nível de dano B:** a transição da fluência secundária para a terciária. Formação de cavidades orientadas. O tempo máximo de serviço é de 1 ano a 1 ano e meio.

**Nível de dano C:** as cavidades se unem para formar microtrincas → reparo de até seis meses.

**Nível de dano D:** formação de macrotrincas → reparo imediato. (FURTADO et al. 2013, p. 25, apud NEUBAUER, B., WENDEL, V. 1983).

Figura 1 – curva deformação x tempo com associação microestrutural proposta por Neubauer



Fonte: adaptado de Furtado et al. (2013)

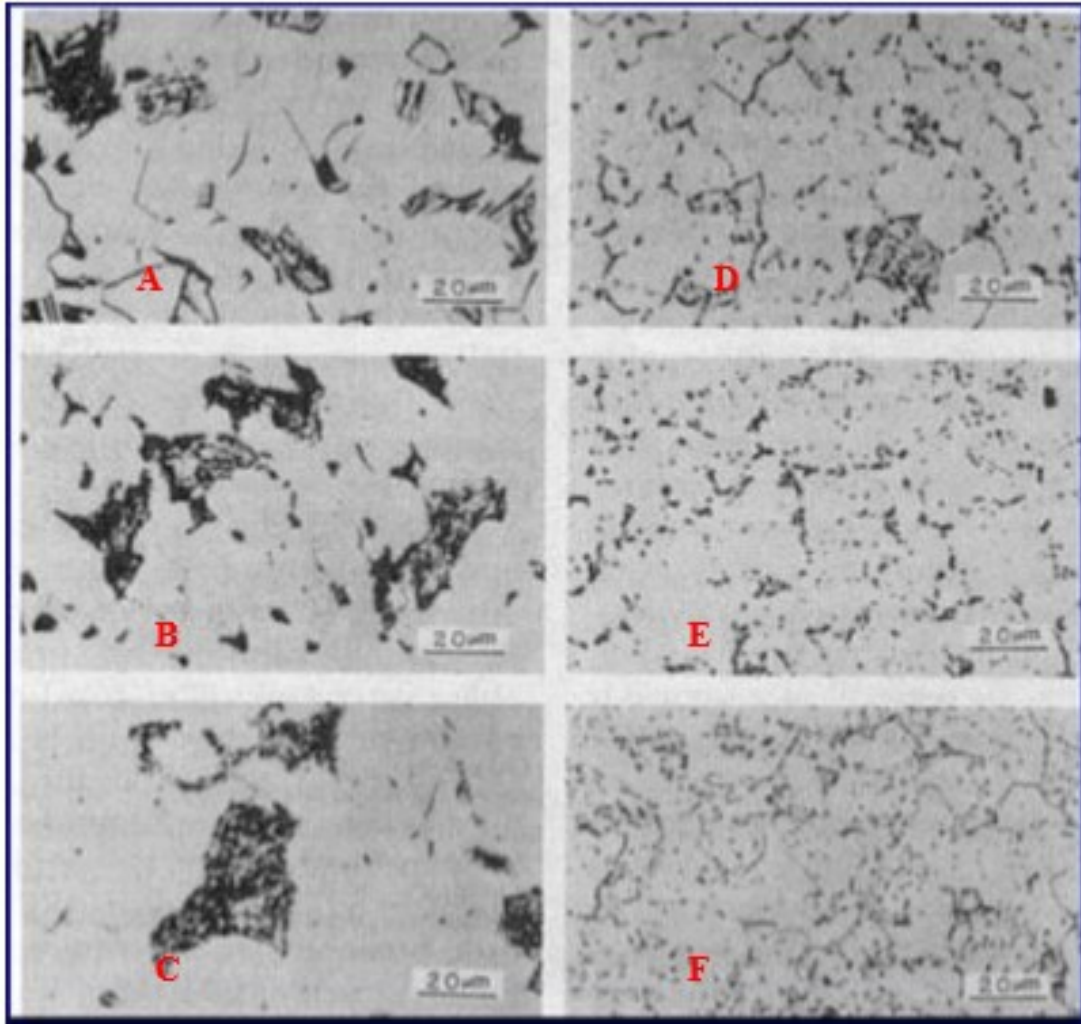
## 2.2.2 Método de Toft e Marsden

Para Furtado et al. (2013). Para as caldeiras os aços que geralmente são utilizados são de baixa liga e apresentam uma microestrutura formada principalmente por ferrita, perlita, bainita e martensita revenida. Como ficam expostos por um longo período de tempo a temperatura elevadas, fazendo com que as suas microestruturas se degradem pelo crescimento de carbonetos na bainita acicular ou da martensita revenida, além da esferoidização das lamelas de perlita, formando carbonetos esferoidizados.

Uma das aproximações mais usadas é a desenvolvida por Toft e Marsden [19], que examinaram e testaram amostras de tubos de caldeiras 1Cr-0,5Mo que estiveram em serviço e que possuíam microestruturas variadas. As amostras foram submetidas a ensaios de fluência, para determinar a vida remanescente. Uma correlação foi observada entre o grau de esferoidização de carbonetos e a tensão de ruptura do material. Os gráficos obtidos podem ser extrapolados para as condições de operação e pode ser feita uma

estimativa de vida residual para cada tipo de microestrutura. Na prática, isto significa identificar o tipo de microestrutura observada em um componente e estimar a extensão de dano e a vida residual. (FURTADO et al. 2013, p. 27, apud TOFT, L.H, MARSDEN, R.A, 1961).

**Figura 2 – Micrografias mostrando a esferoidização presente em ensaios de fluência**



Fonte: adaptado de Furtado et al. (2013)

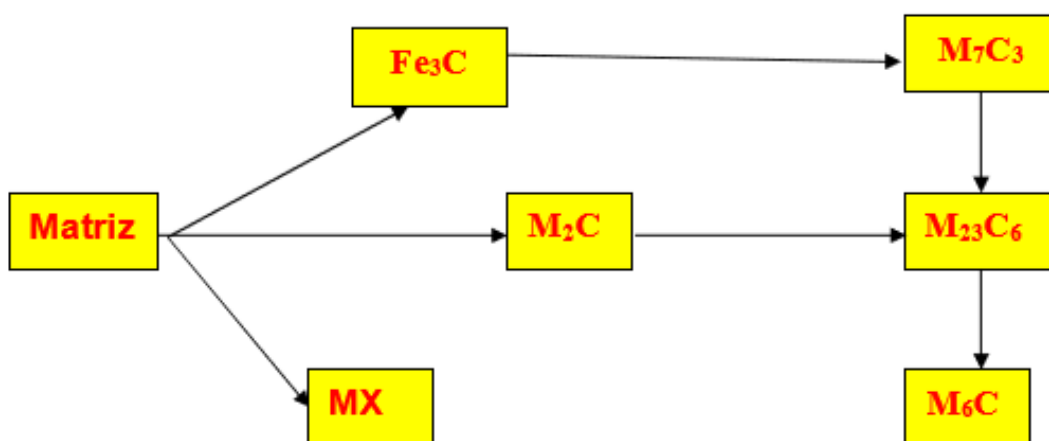
Furtado et al. (2013), diz que no estágio A apresenta um tubo novo, o estágio B primeiros sinais de esferoidização, estágio C esferoidização apreciável, estágio D esferoidização completa, com os carbonetos agrupados na matriz perlítica, estágio E, carbonetos dispersos, pequenos traços de áreas perlíticas, Estágio F, o tamanho de alguns carbonetos aumentou devido ao coalescimento.

### 2.2.3 Método de identificação dos carbonetos precipitados

Segundo Furtado et al. (2013), através da identificação dos principais carbonetos precipitados nos componentes de aço que estão constantemente sendo

expostos a altas temperaturas, concluíram que os carbonetos ao longo do tempo vão se modificando. Como esta identificação destes carbonetos permite identificar a vida remanescente destes componentes. A forma como ocorre a modificação pode ser representada de acordo com a figura 3.

Figura 3 – Sequência de precipitação para aços carbonos ferríticos



Fonte: adaptado de Furtado et al. (2013)

Segundo Furtado et al. (2013). Assim a análise necessita de um microscópio eletrônico de transmissão (MET), que custa caro e é de complexa operação, este método é menos conservador que os outros, pelos fatos de quando é detectado a predominância do carboneto  $M_6C$  é estimado que o material chegou ao fim de sua vida útil.

### 2.3 RELAÇÃO ENTRE DUREZA E A RESISTÊNCIA A FLUÊNCIA – MEDIÇÃO DE 3 DUREZAS EM CAMPO

Segundo Kohlhofer e Penny(1996), ao longo do tempo a dureza já vem sendo utilizada como método simples de ensaio não destrutivo para se determinar a perda de resistência mecânica e à fluência dos materiais. Apesar de ser um método mais empírico é um complemento útil aos métodos metalográficos.

Segundo Furtado et al. (2013), a dureza obtida por estas medições nos fornece uma indicação da nova resistência do material a deformação, podendo esta ser usada para estimar a extensão de danos que ocorreram em um material que esteve exposto por um longo período de tempo a elevadas temperaturas, esses danos gerados pela fluência ocorrem principalmente pela mudança morfológica e o coalescimento nos carbonetos.

Segundo Garcia et al. (2008), observa-se que os resultados fornecidos pela medida de dureza variam em função dos tratamentos recebidos pela peça ou componente. Furtado et al. (2013), corrobora e infere que alguma dispersão de dados pode ser explicada e que a preparação da superfície afeta a dureza medida, principalmente nas superfícies menos duras. Para o mesmo material, repetindo ciclos de polimento ou com tratamentos químicos diferentes os resultados variam um pouco.

Conforme Furtado et al. (2013), diz que os principais fatores que se não cuidados influenciaram os valores medidos de dureza são a preparação da superfície, números de medições, espessura da parede, grau de achatamento da superfície, medição de orientação, tipo de identador, carga do identador e oxidação/descarbonetação da superfície.

## 2.4 MEDIÇÃO DE ESPESSURA DA CAMADA DE ÓXIDO

Segundo Furtado et al. (2013), a metodologia baseia-se na proposição de que a camada de óxido presente internamente nos tubos, ainda representa a história térmica dos mesmos, ou seja, a espessura está ligada ao tempo de exposição e a temperatura em que o metal esteve exposto. Método antigo desenvolvido nos anos 80, foi pouco utilizado nos primeiros anos após seu descobrimento devido ao único meio de se medir esta camada ser cortando os tubos e após isto realizar metalografia e avaliar a espessura por meio de microscópio ótico.

Conforme Furtado et al. (2013), os tubos de água, superaquecedores e rea aquecedores são os principais componentes que falham nas caldeiras, e o método para estimar a vida remanescente pela espessura da camada de óxido se adequa bem nestes componentes.

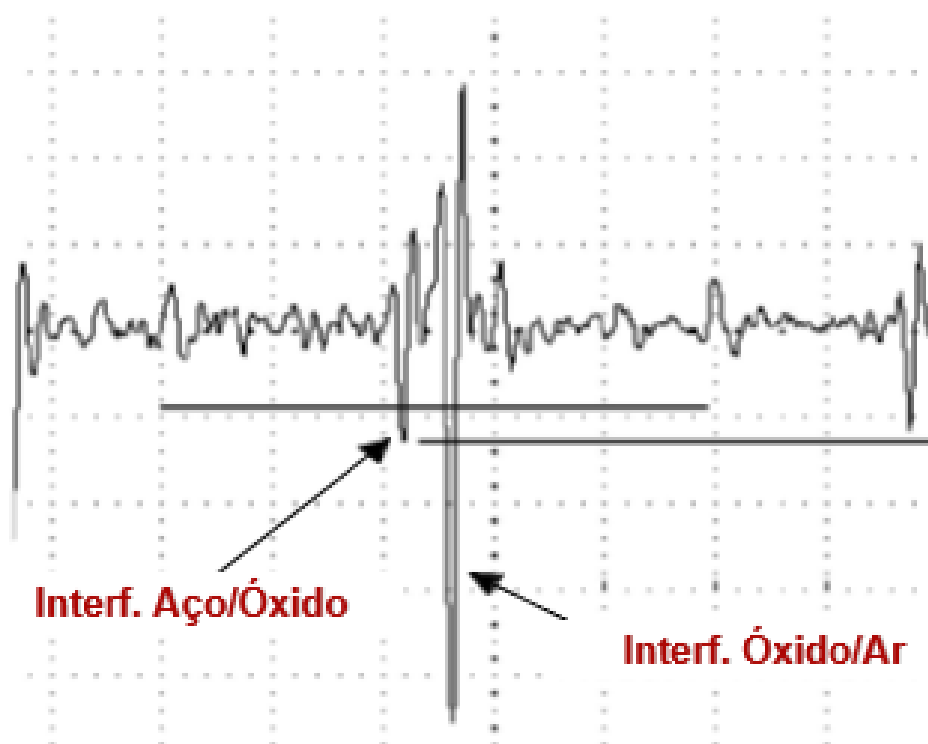
Segundo Braga (2009), os metais que ficam expostos a ambientes oxidantes a alta temperatura, acabam por sofrer uma gradual oxidação de um ou mais elemento metálico. Os óxidos são formados por difusão e formam uma camada espessa e aderente na superfície metálica.

Para Braga (2009), o método pode ser usado de modo quantitativo com a contagem dos micros vazios e chegando a uma vida residual através de fórmulas, mas o mais utilizado é para se obter uma análise qualitativa das tubulações, caso se julgue necessário é retirada uma amostra para uma melhor avaliação metalúrgica.

Com o passar dos anos o avanço científico e tecnológico foi sendo desenvolvido equipamentos mais sofisticados e que pudessem realizar esta verificação sem ser necessário cortar os tubos para verificar a espessura dos óxidos, os primeiros equipamentos utilizavam ultrassom.

Para Cardoso et al. (2011), a espessura desta camada de óxidos é calculada avaliando o intervalo de tempo entre os ecos refletidos pela interface da camada aço/óxido e da superfície interna do tubo. Segundo Furtado et al. (2013), O primeiro equipamento desenvolvido para este processo que utilizava ultrassom se chamou A-scan. Os resultados são mostrados na figura 4.

**Figura 4 – Picos refletidos na interface do componente inspecionado por ultrassom**



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

Furtado et al. (2013), afirma que a avaliação da vida remanescente por medição da camada de óxidos possui algumas limitações, como a possibilidade de não fornecer um histórico correto das temperaturas do metal, devido a possibilidade de quebra, ou seja, rupturas da camada de óxidos devido a vibrações, choques e limpezas químicas. Avalia também o fundamental acompanhamento do método da degradação microestrutural para validar os resultados obtidos.

## 2.5 ANÁLISE DIMENSIONAL

Furtado et al. (2013, p. 35), dizem que "Normalmente a avaliação dimensional se dá principalmente por medição de espessura da parede dos tubos ou componentes, mas pode ser complementada pela definição de geometrias (deformação, ovalização, deterioração de superfície).

### 2.5.1 Medição de espessura de parede

A Norma API 579-1/ASME FFS-1, estabelece um procedimento base para a realização das análises de adequação para a operação dos componentes que são pressurizados e estão sujeitos a perda de espessura resultante desta exposição, por diversos mecanismos seja corrosão, erosão ou ambos. Este procedimento baseia-se no valor médio da espessura para a região analisada, se esta região apresentar alguns pontos com perdas localizadas de espessura a abordagem pode produzir resultados conservadores. A norma fornece outros procedimentos que podem ser utilizados para diminuir o conservadorismo.

Segundo Furtado et al. (2013), estes procedimentos de avaliações são usados para determinar a perda de espessura, esta que pode ocorrer no exterior ou no interior da tubulação. Pode ser realizado com base em leituras pontuais ou com a utilização de alguns perfis de espessura. O procedimento depende dos dados disponíveis da espessura, do grau de conservadorismo aceitável e das características de perdas generalizada ou local.

O procedimento somente se aplica aos equipamentos que estiverem operando fora da temperatura de fluência. Garcia et al. (2008), diz que a fluência ocorre em qualquer tipo de material e ocorre em temperaturas maiores ou iguais a 0,4 da temperatura de fusão do material do componente, podemos observar na tabela 1 alguns materiais com algumas temperaturas limites de fluência.



**Tabela 1 – Materiais e suas temperaturas limites de fluência**

<b>Material</b>	<b>Temperatura Limite</b>
Aço carbono ( $\sigma_r \leq 414 \text{ MPa}$ (60ksi))	343°C (650 °F)
Aço carbono ( $\sigma_r > 414 \text{ MPa}$ (60ksi))	371°C (700 °F)
Aço carbono - Grafitizado	371°C (700 °F)
C - 0,5 Mo	399°C (750 °F)
0,25-1Cr - 0,5 Mo- Normalizado e Temperado	427°C (800 °F)
0,25 - 2Cr – 1 Mo - Recozido	427°C (800 °F)
0,25-2 Cr – 1Mo – Normalizado e Temperado	427°C (800 °F)
0,25-2 Cr – 1Mo – Recozido	427°C (800 °F)
0,25-2 Cr – 1Mo – Temperado e Revenido	427°C (800 °F)
0,25-2 Cr – 1Mo – V	441 °C (825 °F)
3Cr – 1Mo – V	441 °C (825 °F)
5Cr – 0,5Mo	427°C (800 °F)
7Cr – 0,5Mo	427°C (800 °F)
9Cr – 1Mo	427°C (800 °F)
9Cr – 1Mo – V	454°C (850 °F)
12 Cr	482°C (900 °F)
AISI 304 e 304H	510°C (950 °F)
AISI 316 e 316H	538°C (1000 °F)
AISI 321 e 321H	538°C (1000 °F)
AISI 347 e 347H	538°C (1000 °F)
Liga 800	565°C (1050 °F)
Liga 800H	565°C (1050 °F)
Liga 800HT	565°C (1050 °F)
HK-40	649°C (1200 °F)

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

As leituras são geralmente feitas através de ensaios de ultrassom, fazendo com que as medidas sejam precisas e assim dando maior confiabilidade ao procedimento. Uma limitação já citada está associada também ao preparo da superfície.

Segundo Furtado et al. (2013), havendo espessura admissível para o equipamento continuar a operar, além da perda de material ser menor do que a corrosão e a erosão admissível, nenhuma ação é requerida, somente o registro dos dados encontrados, caso contrário avaliação mais criteriosa requerida.

A determinação da espessura pode ser feita seguindo dois modelos, ou seja, se é verificado a espessura em um ponto específico ou é determinado o perfil de espessura do componente avaliado. Furtado et al. (2013), diz que leituras pontuais devem ser utilizadas para caracterizar a perda em um componente, caso os valores encontrados não apresentem diferenças consideráveis, já os perfis de espessura são utilizados quando é encontrado uma variação considerável nas leituras pontuais, sendo assim a perda pode ser localizada e um perfil de espessuras deve ser usado para caracterizar a espessura restante e o tamanho da região onde ocorreu a maior perda.

Furtado et al. (2013), ainda infere que se utilizado leituras pontuais para se realizar a análise, assume-se que há uma perda generalizada de espessura no componente, sendo necessária algumas ações para confirmar tal fato. Devendo ser realizado ensaios não destrutivos, um valor mínimo de 15 medições de espessuras deve ser realizado, variando com o tamanho e esforços que o envolvem e se o COV, for maior que 10% deve se usar os perfis de espessura. O COV é o desvio padrão dividido pela média das medidas.

## 2.6 ENSAIOS

Segundo Garcia (2008), há duas finalidades mais importantes na execução dos ensaios, a primeira seria permitir a obtenção de informações rotineiras do produto e a segunda desenvolver novas informações sobre os materiais.

Podemos classificar os ensaios dos materiais de algumas formas, a mais usual é:

Quanto à integridade geométrica e dimensional da peça ou componente:

i) Destrutivos: provocam inutilização parcial ou total da peça; ex.: tração, dureza, fadiga, torção, flexão, tenacidade à fratura.

ii) Não-destrutivos: Não comprometem a integridade da peça; ex.: raios X, raios  $\gamma$ , ultra-som, partículas magnéticas, líquidos penetrantes. (GARCIA et al. 2008, p. 5).

Ainda para Garcia et al. (2008), existem alguns métodos para se realizar os ensaios e que devem ser realizados em função da geometria da peça, do processo de fabricação e de acordo com as normas vigentes, pode ser ensaio da própria peça, de modelos, em amostras e em corpos de provas retirados de partes da estrutura. Para a avaliação de integridade o ensaio de campo, será no próprio componente da caldeira.

### 2.6.1 Ensaio Não Destrutivos

Segundo Carvalho (1999), os ensaios não destrutivos, tem por finalidade detectar a falta de homogeneidade de um produto sem alterar fisicamente suas características, de modo a não prejudicar sua utilização posterior. Os principais ensaios não destrutivos são o ensaio visual, líquidos penetrantes, partículas

magnéticas, ultrassom, radiográficos e correntes parasitas. A Associação Brasileira de Ensaio Não Destrutivos e Inspeções (Abendi), cita ainda os ensaios de emissão acústica, estanqueidade e Termografia.

Conforme Garcia et al. (2008), nas indústrias mecânicas é comum a necessidade de inspecionar máquinas e peças durante o período de vida útil. Nestes casos não é possível a destruição da peça ou componente, pois após a inspeção realizada ele deverá retornar ao funcionamento normal, caso não seja detectado nenhum problema nele. Nesses casos se aplicam os ensaios não destrutivos, obtendo-se informações tanto quantitativas quanto qualitativas sobre a integridade dos componentes mecânico, garantindo assim ao profissional designado assegurar a sua substituição antes que falhe.

Para Garcia et al. (2008), um grande número de fatores deve ser avaliado quando da procura e da seleção do melhor ensaio não destrutivo, avaliando também a melhor técnica.

- tipo de material da peça quanto às características magnéticas, de massa específica (densidade), de composição;
- processos de fabricação aplicados à peça (fundição, forjamento, processo de revestimento.);
- geometria da peça (forma, dimensão, condições superficiais);
- defeitos possíveis esperados (superficiais, subsuperficiais, internos, localização e tamanho dos defeitos, qualificação quanto à sua importância);
- estágios em que aparece o defeito (na elaboração da matéria-prima, na fabricação da peça, na sua utilização). (GARCIA et al. 2008, p. 192);

Garcia et al. (2008), infere que os custos têm como principais influências o número de peças a serem inspecionadas, tamanho e peso, facilidade de manejo das peças no recinto da fábrica, sistema de inspeção adotado pode ser manual ou mecânico, sensibilidade do ensaio, porcentagem de peças defeituosas e o grau de instrução dos operadores e inspetores.

## 2.7 APLICAÇÃO DOS ENSAIOS NÃO DESTRUTIVOS

A evolução dos ensaios não destrutivos nos últimos anos foi considerável, pode-se notar melhorias em diversos fatores principalmente como na confiabilidade e segurança, fator importante foi o avanço tecnológico na eletrônica e da informática principalmente.

Fator que pode influenciar o desempenho e o resultado esperado dos ensaios é o exercido pelo profissional técnico no planejamento e execução dos mesmos. Para melhor ser controlado e monitorado estes procedimentos criou-se organizações de classe, instituições e fundações governamentais para qualificar e treinar pessoas para aplicação e interpretação dos resultados, como o principal pode-se citar o Sistema Nacional de Qualificação e Certificação – SNQ&C que é gerenciado pela Associação Brasileira de Ensaio Não Destrutivos e Inspeção - ABENDI

Com isso tornou-se cada vez mais comum a aplicação dos procedimentos que utilizam as técnicas dos ensaios não destrutivos, na avaliação de integridade das caldeiras. Os principais ensaios não destrutivos utilizados são:

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

## 2.7.1 Exame Visual

### 2.7.1 Princípio

Para Furtado et al. (2013), o ensaio visual é realizado nos casos onde a superfície a ser ensaiada for de fácil acesso, pode ser realizado a olho nu ou com o auxílio de lente de aumento ou até uma câmara de vídeo, busca detectar quaisquer condições da superfície da peça ou componente que possa dificultar ou atrapalhar um determinado ensaio posterior, fazendo assim com que a perda de tempo e recursos seja evitada.

Hellier (2001), define uma sequência de passos para observação que o examinador pode seguir para um exame visual de condição geral.

1. A observação de uma anomalia - algo diferente, não normal ou irregular.
2. A indicação visual é avaliada e determinada como relevante ou não.
3. A indicação relevante é comparada com o padrão, código, especificação ou requisitos do cliente apropriados.
4. A indicação relevante é considerada aceitável, não registrável, registrável ou inaceitável e rejeitada.

### 2.7.1.2 Aplicação e desenvolvimento

A aplicação é extensa muitas peças ou praticamente todas podem ser submetidas a este ensaio, Furtado et al. (2013), diz que além das peças, partes e componentes podem ser submetidos a este ensaio, porém nas caldeiras, onde pode ser ressaltado seu valor para este tipo de equipamento são: nos tubos em condensadores de vapor e geradores de vapor na região próxima aos espelhos; verificação de espaçamento mínimo entre tubulações; avaliação do estado do isolamento térmico, para isolamento à quente: verificar existência de danos que possam representar uma condição insegura (risco de queimadura, desmoronamento), ou que provoque perda de energia ou afete o processo.

### 2.7.1.3 Utilização

Utilizado em muitas situações como a identificação de vibrações excessivas, corrosão, amassamentos, fraturas, vazamentos, esfoliações, entre outros.

A tecnologia associada ao teste visual inclui um espectro de aplicações, incluindo vários produtos e setores, como: tanques, embarcações, edifícios, usinas de energia fóssil, central nuclear, turbinas, geradores, plantas de refinaria e aeroespacial (HELLIER, 2001).

Para situações que exijam, Furtado et al. (2013), infere que algumas superfícies podem ser inspecionadas utilizando equipamentos como endoscópios com fibras óticas rígidas ou flexíveis permitindo o acesso a áreas complexas e internas, além disso deve acompanhar o ensaio visual os demais sentidos, tato, olfato, audição para que auxiliem na identificação de vazamentos, aquecimento e vibração.

### 2.7.1.4 Limitações

Para Furtado et al. (2013), as limitações estão presentes nas possibilidades de se detectar apenas descontinuidades superficiais e as demais ficarem omissas neste ensaio, além da técnica ser susceptível ao profissional que aplicará o ensaio e sua experiência com os equipamentos observados. Hellier (2001), infere que outra limitação é que muitas vezes o aprimoramento artificial que pode ser feito na imagem nem sempre é possível e as restrições de acesso podem limitar a visualização.

## 2.7.2 Ensaio Por Líquidos Penetrantes

### 2.7.2.1 Princípio e Aplicação

Hellier (2001), diz que o princípio básico sobre o qual o ensaio de líquidos penetrantes é baseado é o da atração ou ação capilar. A ação capilar é um fenômeno de tensão superficial que permite que líquidos sejam atraídos para aberturas apertadas como resultado das energias que estão presentes nas superfícies de as aberturas.

Andreucci (2019), infere que o método consiste em fazer com que o líquido penetre na abertura do defeito ou descontinuidade e a remoção do excesso da superfície, após isto o líquido que ficou retido é absorvido por um revelador, que então deixa a imagem na superfície da peça onde fica localizada a descontinuidade, ainda diz que o ensaio pode ser descrito em 6 etapas, que são a preparação da superfície – Limpeza inicial, aplicação do penetrante, remoção do excesso de penetrante, revelação, avaliação – inspeção e Limpeza pós ensaio. Segundo Furtado et al. (2013), são as etapas de limpeza da superfície, aplicação do líquido penetrante, medição de tempo, remoção do líquido penetrante, aplicação do revelador, medição de tempo, obtenção de sinal, análise dos resultados, registro, comparação com critérios de aceitação normatizados, como exemplo simples demonstrado na figura 5.

**Figura 5 - sequência de aplicação do ensaio de líquido penetrante**

1. Peça trincada



2. Líquido Penetrante Aplicado



3. Remoção do Líquido Penetrante



4. Aplicação do Revelador



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

O resultado depende muito também dos materiais utilizados, principalmente o líquido penetrante e o revelador utilizado.

#### 2.7.2.1.1 Penetrantes

O nome penetrante para Andreucci (2019), é oriundo da propriedade essencial que ele deve ter, ser capaz de penetrar em aberturas finas, ou seja, penetrar na menor fenda ou trinca que ele puder. O penetrante deve ter boas propriedades e atender os seguintes requisitos:

- a) ter habilidade para rapidamente penetrar em aberturas finas;
- b) ter habilidade de permanecer em aberturas relativamente grandes;
- c) não evaporar ou secar rapidamente;

- d) ser facilmente limpo da superfície onde for aplicado;
- e) em pouco tempo, quando aplicado o revelador, sair das descontinuidades onde tinha penetrado;
- f) ter habilidade em espalhar-se nas superfícies, formando camadas finas;
- g) ter um forte brilho. O fabricante deve verificar a concentração do corante vermelho no penetrante com base na Lei de Beer
- h) a cor ou a fluorescência deve permanecer quando exposto ao calor, luz ou luz negra;
- i) não reagir com sua embalagem nem com o material a ser testado;
- j) não ser facilmente inflamável;
- k) ser estável quando estocado ou em uso;
- l) não ser demasiadamente tóxico ;
- m) ter baixo custo. (ANDREUCCI, 2019, p. 7).

Os penetrantes são classificados segundo Furtado et al. (2013), de duas formas conforme a visibilidade e o processo pelo qual são removidos do objeto avaliado. Podendo ser segundo sua visibilidade do Tipo I caso possa ser visto sob iluminação normal ou Tipo II caso só possam ser visto com luz ultravioleta, quanto ao processo de remoção podem ser do tipo A, B/D) ou C, ou seja, tipo A removíveis por Água, tipo B/D removíveis por pós-emulsificáveis e tipo C removíveis por solvente.

Segundo Furtado et al. (2013), os penetrantes também são selecionados pela sua sensibilidade, ou seja, pelo tamanho das descontinuidades que ele consegue detectar, são separados em 5 classes. Quanto maior o nível menor será a descontinuidade detectada, mas também pode apresentar maior número de indicações não relevantes no processo.

Nível  $1/2$  – Sensibilidade ultrabaixa

Nível 1 – Baixa sensibilidade

Nível 2 – Média sensibilidade

Nível 3 – Alta sensibilidade

Nível 4 – Sensibilidade ultra alta.

Os penetrantes fluorescentes possuem corantes que fluorescem quando expostos a luz fluorescente e os de visualização por luz normal apresentam um corante vermelho.



Para a remoção dos penetrantes Furtado et al. (2013), infere que os removíveis por solvente geralmente são fornecidos em aerossol e utilizados para inspeção em regiões pequenas, os removíveis por água são mais fáceis de serem utilizados e apresentam um custo menor para aplicação em grandes áreas e os pós-emulsificáveis que são removíveis por água somente após a reação química de um agente emulsificador com a água, esse processo se torna necessário pois ele não dissolve em água e a remoção possa retirar penetrante das descontinuidades prejudicando o desempenho do ensaio por isso o tempo de reação é crítico e medido em rigorosos ensaios em laboratório. Os penetrantes removíveis por solvente não podem ser aplicados direto sobre a peça ensaiada deve-se primeiro remover o excesso com um pano seco e após feito isso utilizar um pano levemente umedecido com solvente, o solvente não deve ser aplicado diretamente sobre a peça pois pode remover penetrante das descontinuidades, para os removíveis por água, o excesso pode ser removido por imersão, manualmente ou borrifo, lembrando sempre que a temperatura da água deve estar entre 10 e 38 °C e a pressão deve ser inferior a 280 kPa.

#### 2.7.2.1.2 Revelador

A função do revelador para Furtado et al. (2013), é de revelar onde as descontinuidades estão presentes, ele fica na superfície do material e absorve o penetrante que está nas descontinuidades, sendo assim o penetrante vem para a superfície e evidencia onde a descontinuidade está presente e o tamanho dela.

Segundo Andreucci (2019), um bom revelador deve:

- a) ter ação de absorver o penetrante da descontinuidade ;
- b) servir com uma base por onde o penetrante se espalhe - granulação fina ;
- c) servir para cobrir a superfície evitando confusão com a imagem do defeito formando uma camada fina e uniforme;
- d) deve ser facilmente removível;
- e) não deve conter elementos prejudiciais ao operador e ao material que esteja sendo inspecionado;
- f) não pode ser fluorescente. (ANDREUCCI, 2019, p. 11).

Os reveladores estão disponíveis em três formas, pó secos, solução aquosa e suspensão do pó revelador em solvente.

Os reveladores para Furtado et al. (2013), na forma de pós secos são considerados os mais acessíveis em questão de preço e em facilidade de aplicação, mas em compensação são os menos sensíveis, é aplicado como fornecido, ou seja, logo após a secagem da superfície ensaiada, comum utilizado em câmaras fechadas onde forma uma nuvem de revelador. Os de Solução aquosa, consiste no grupo que é dissolvido na água e forma uma camada de revelador sobre a peça, são aplicados na forma de spray e quando a água evapora o revelador fica na superfície e demonstra as descontinuidades. A suspensão do pó em solvente, o solvente é volátil e o pó é mantido suspenso, aplicado normalmente por spray.

#### 2.7.2.2 Utilização

Segundo Furtado et al. (2013), o ensaio é recomendado quando o objetivo é detectar descontinuidades superficiais, como falhas em processos de soldagem e de fundidos tais como: trinca de tensão, costuras, dupla laminação, entre outras, mas também como trincas de fadiga e corrosão sob tensão. O líquido mostra a localização das descontinuidades superficiais com precisão e simplicidade embora as dimensões sejam aumentadas.

O ensaio por líquido penetrante, segundo Andreucci (2019), é utilizado para detectar descontinuidades que ocorrem na superfície, desde que estejam abertas podem ser invisíveis ao olho nu, como trincas, poros e dobras. Podem ser aplicados em materiais sólidos e que não sejam muito porosos ou com superfície grosseira.

A Principal vantagem deste ensaio, para Andreucci (2019), é a sua simplicidade, sendo fácil de se aplicar o ensaio e também de interpretar os resultados encontrados. Outra vantagem importante é a não limitação para o tamanho e forma das peças a serem ensaiadas, nem limite de material, se usado de acordo com as recomendações pode revelar trincas da ordem de 0,001 mm de abertura.

#### 2.7.2.3 Limitações

Segundo Furtado et al. (2013), descontinuidades fechadas na superfície ou subsuperficiais não são detectadas, dificuldade em superfícies rugosas e muito

porosas podem por vezes não ser ensaiadas como em certas cerâmicas e limitado a áreas de fácil acesso. O ensaio também é normalmente limitado a uma temperatura entre 12 e 56 °C, pode ser fora dessa margem de temperatura, mas precisa de produtos especiais para o tal. A sensibilidade depende do acabamento superficial, da limpeza da superfície e se existem contaminantes dentro das fendas e poros das peças.

Andreucci (2019), diz que a superfície do material não pode ser porosa ou absorvente, pois não se conseguiria remover o excesso de penetrante e o resultado seria mascarado e a superfície deve permitir a limpeza da mesma. Hellier (2001), inclui os problemas com a variação da temperatura e as muitas variáveis de processamento que são envolvidas.

### 2.7.3 Ensaio Por Partículas Magnéticas

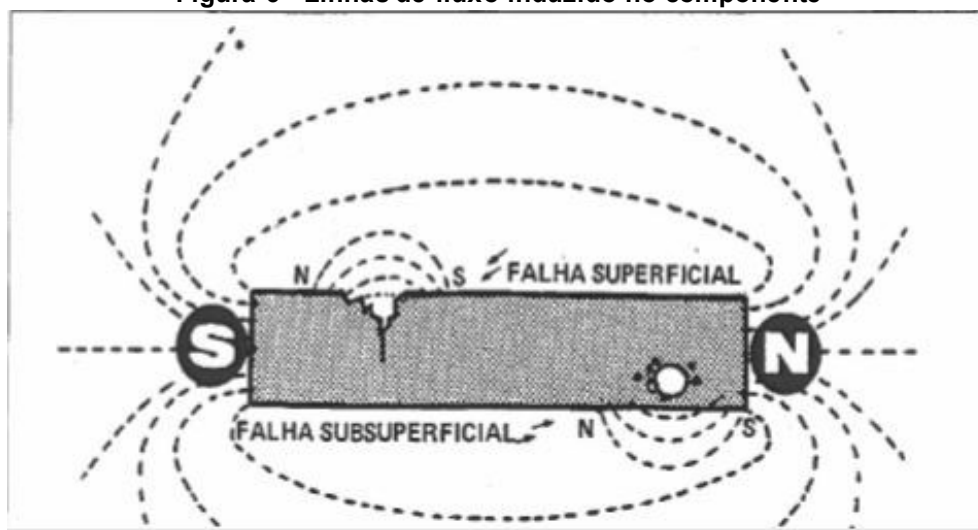
#### 2.7.3.1 Princípio

O ensaio de partículas magnéticas é um ensaio que tem o principal objetivo a detecção de descontinuidades superficiais e subsuperficiais, em componentes ferromagnéticos (MARCÍÓ 2014, apud NESS et al., 1996; HELLIER, 2001; SHULL, 2001).

Conforme Garcia et al. (2008), um campo magnético aplicado em um material ferromagnético, faz com que as linhas de campo penetrem no material, se nesse processo existir algum obstáculo, ou seja, como uma descontinuidade as linhas devem contorná-lo, se ocorrer próximo a superfície elas devem sair da peça, se jogado partículas magnéticas no contorno da peça, elas deverão se acumular nesta região.

Furtado et al. (2013), acrescenta que para que as descontinuidades sejam detectadas é importante que sejam cruzadas ou interceptadas pelas linhas de campo, conforme figura 6, além de ressaltar a importância de magnetizar a peça em duas direções defasadas em 90°.

**Figura 6 - Linhas de fluxo induzido no componente**



Fonte: Adaptado de Furtado et al. (2013)

Andreucci (Nov/2018), diz que o ensaio por partículas magnéticas pode ser aplicado em qualquer etapa do processo de fabricação, ou seja, em peças acabadas, semiacabadas ou durante as etapas, serve para detectar descontinuidades superficiais e subsuperficiais, em materiais ferromagnéticos.

### 2.7.3.2 Partículas Magnéticas

Segundo Furtado et al. (2013), as partículas magnéticas que devem ser utilizadas no ensaio devem apresentar algumas características que maximizem a eficiência do ensaio, logo o material que as partículas são constituídas devem apresentar alta permeabilidade magnética e baixa retentividade. A alta permeabilidade faz com que as partículas sejam atraídas mais facilmente, ou seja, atraídas por descontinuidades pequenas. A baixa retentividade faz com que as partículas não se aglomerem umas às outras na superfície. Outro ponto é relacionado as cores das partículas que são selecionadas para dar maior contraste com a cor da superfície da peça se a peça for clara as partículas serão escuras e vice-versa.

#### 2.7.3.2.1 Partículas Magnéticas por Via Seca e para Via Úmida

Andreucci (Nov/2018), diz que as partículas por via seca são aplicadas a seco e são mais sensíveis a descontinuidades próximas a superfície, além de poderem ser reaproveitadas caso não sejam contaminadas no processo. Por via

úmida as partículas são menores e conseqüentemente detectam trincas menores, até trincas por fadiga podem ser detectadas.

Conforme Furtado et al. (2013), as partículas secas são selecionadas buscando o melhor contraste com a superfície do componente e geralmente são amarelas, vermelhas, cinzas, brancas e pretas. As partículas para via úmida como o próprio nome sugere são aplicadas em destilado de petróleo ou água, muito em função de seu tamanho menor e assim também conseguem detectar descontinuidades menores. São geralmente utilizadas em ensaios com luz branca ou ultravioleta e fluorescem emitindo luz em tonalidade verde.

### 2.7.3.3 Utilização

Segundo Furtado et al. (2013), o ensaio muito utilizado em casos onde procuram-se descontinuidades superficiais e subsuperficiais em materiais ferromagnéticos, os principais defeitos que ele encontra são trincas, junta fria, inclusões, gota fria, dupla laminação, falta de penetração, etc. Aplicações comuns em aço ferrítico, forjados, extrudados e soldas.

Andreucci (Nov/2018), infere que as principais vantagens do ensaio são, o resultado do ensaio é imediato, detecta descontinuidades subsuperficiais, pode ser aplicado a alta e a baixa temperatura, apresenta alta sensibilidade, pode ainda ser automatizado e sua aplicação pode ser feita de forma rápida. Hellier (2001), complementa inferindo que o ensaio pode ser realizado em qualquer etapa dos processos desde a fabricação até o uso final, pode ser usado para inspecionar através de revestimentos metálicos e não metálicos, com algumas técnicas. Deve-se notar, no entanto, que uma redução na sensibilidade ocorrerá à medida que a espessura do revestimento aumenta. A espessura máxima do revestimento deve ser estabelecida através de testes de qualificação ou estipulados nas especificações do cliente ou requisitos de código.

### 2.7.3.4 Limitações

As principais limitações do ensaio de partícula magnética para se detectar as descontinuidades para Furtado et al. (2013), são: aplicável apenas em materiais ferromagnéticos, apresenta dificuldade de detecção para as descontinuidades

tridimensionais, pode ser automatizado, mas apenas nas etapas manuais, necessita de pessoa qualificada e experiente para a interpretação dos resultados, apesar da existência de especificações e padrões, sempre existirá o elemento subjetivo na interpretação dos resultados, geralmente limitado a áreas com fácil acesso, apresenta também alguns riscos para os envolvidos como: choque elétrico, inalação de partículas durante a sua aplicação, exposição à luz ultravioleta e o manuseio das partículas e concentrados. Andreucci (2018), diz que algumas das desvantagens além dos materiais, algumas técnicas prejudicam a superfície da peça e ainda algumas indicações não são facilmente observadas. Hellier (2001), complementa e infere que podem surgir indicações não relevantes devido a mudanças abruptas no perfil do componente ou mudanças locais nas propriedades do material que possam dificultar a interpretação.

## 2.7.4 Ensaios Radiográficos

### 2.7.4.1 Princípio

Furtado et al. (2013), diz que o ensaio se baseia na propriedade de absorção diferenciada da radiação pela matéria, fazendo passar pelo componente um feixe de radiação  $\gamma$ , radiação x ou nêutrons, chamados de gamagrafia, radiografia e feixe de nêutrons respectivamente. Bastante similar a radiografia feita em humanos, são registradas as características da radiação emergente do objeto, utilizando um meio adequado como um filme radiográfico, uma tela fluorescente ou até dispositivos eletrônicos. Marció (2014 apud SHULL 2001; e ANDREUCCI 2013), acrescenta que o objetivo é criar um registro fotográfico do componente, que é gerado pela passagem destes raios, ainda pode ser utilizado para detectar descontinuidades, trincas, vazios e inclusões.

### 2.7.4.2 Aplicação e Desenvolvimento

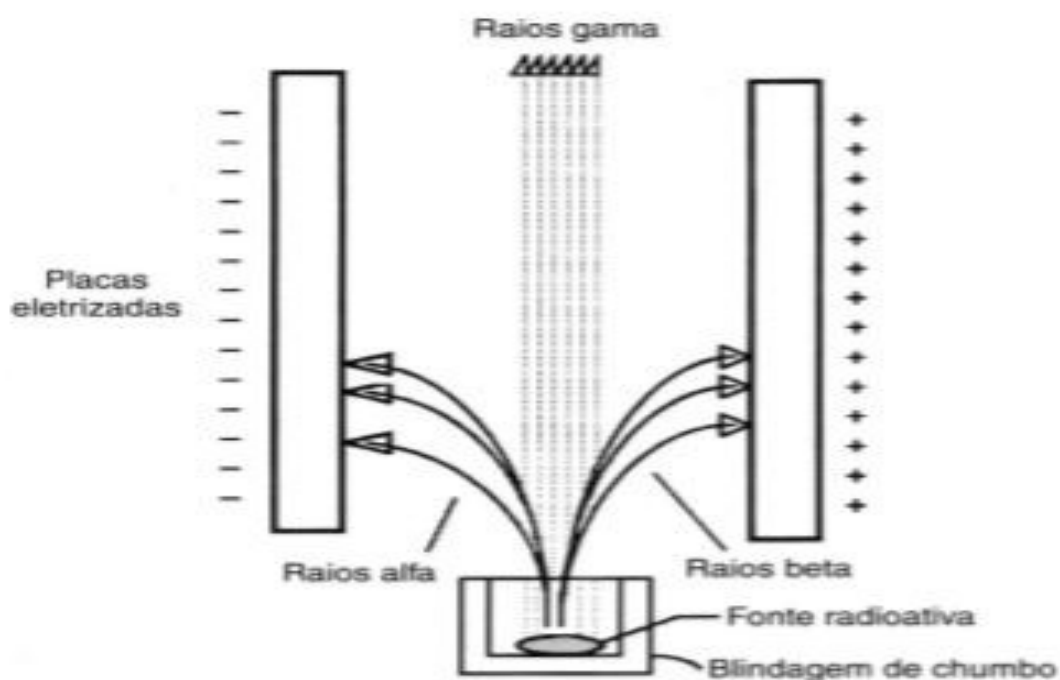
A radiografia industrial pode ser executada segundo Furtado et al. (2013), através de aparelhos industriais, fontes de Radiação Gama, Filmes de Raio X e a Radiografia Digital.

Para Furtado et al. (2013), os filmes de Raio X consistem de uma base de poliéster que é revestida por um substrato que ainda sobre ele recebe uma camada de emulsão com haletos de prata. Assim que atingidos por radiação X, gama ou luz as regiões que recebem uma quantidade suficiente sofrem uma mudança. A prata recebe alguns íons oriundos desta mudança e está prata metálica que se forma se distribui em maior e menor quantidade formando uma imagem radiográfica.

As fontes radioativas Gama, segundo Furtado et al. (2013), são geralmente isótopos formados principalmente por reatores nucleares, entre eles estão o Cobalto-60, Iridio-192 e Cério-137. Por medida de segurança quando não utilizados estes isótopos são mantidos em recipientes blindados a radiação.

Segundo Garcia et al. (2008), a radiação gama possui natureza eletromagnética e alto poder de penetração pois o comprimento de suas ondas é menor que o raio X o que lhe garante maior penetração, além de que podemos separar as ondas gama das alfa e beta com o uso de um campo elétrico, como podemos ver na figura 7.

**Figura 7 - Separação dos raios gama**



**Figura 7: Adaptado de Garcia et al. (2008)**

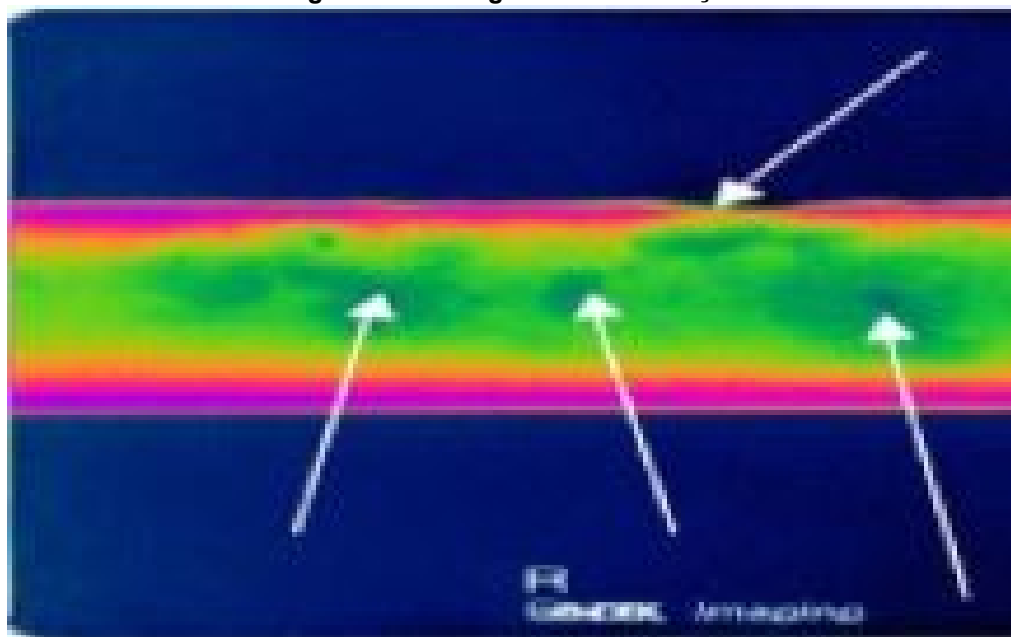
A radiografia Industrial vem sendo afetada pelas novas tecnologias surgentes e segundo Furtado et al. (2013), novos detectores foram sendo inseridos no mercado a partir da década de 90, tornando possível verificar estas imagens on-line. Pois apresentam boas vantagens em relação aos filmes convencionais, como

sensibilidade, faixa dinâmica, além dos vários softwares de tratamento de imagens que podem ser utilizados e aumento da segurança aos operadores dos ensaios.

#### 2.7.4.3 Utilização

A aplicação da Gamagrafia é muito importante para a inspeção de sistemas complexos, soldas, além da análise de fundidos, desgastes e redução da espessura, como podemos ver indicado na figura 8.

**Figura 8 - Gamagrafia em tubulação**



**Figura 8: Adaptado de Furtado et al. (2013)**

O ensaio é muito utilizado, segundo Marció (2014), é utilizado em indústrias petrolíferas, nuclear, alimentícia, farmacêutica e bélica, principalmente na detecção de descontinuidades em soldas.

Segundo Hellier (2001), uma ampla gama de configurações de soldas, espessuras e materiais são usados em usinas de energia. O teste radiográfico requer fontes de radiação capazes de fornecer energia desde o extremo inferior do espectro até o mais alto disponível comercialmente. Vasos de pressão são estruturas complexas que exigem exames iniciais de alta qualidade. Os sistemas de tubulação associados, com suas muitas geometrias de juntas soldadas, fornecem desafios contínuos para o técnico em radiologia. Exames em serviço oferecem desafios ainda maiores. Há outras condições com que o técnico de radiologia deve lidar, como acessibilidade, o ambiente (temperatura; no caso de usinas nucleares, radiação,



qualidade do ar e circulação, etc.), o transporte e posicionamento de equipamentos, a preocupação com a segurança das áreas de radiação, e o tempo quando os exames são conduzidos ao ar livre. Existem outras aplicações não convencionais para a radiografia em usinas de energia. Há preocupações contínuas com relação à degradação de estruturas e componentes como resultado de corrosão, vibração e desgaste. Muitas vezes, as áreas são cobertas com isolamento ou são muito difíceis de alcançar. Existem unidades radiográficas portáteis que fornecem o exame dessas condições e fornecem dados de contorno através do isolamento.

A gamagrafia apresenta como vantagens sobre o raio x para Garcia et al. (2008), o equipamento é relativamente pequeno e de fácil transporte, o custo do equipamento é baixo, não depende de energia elétrica e água para seu funcionamento, permite maiores variações de espessura de componentes avaliados sem perda na qualidade da imagem, além da maior penetração devido ao comprimento de onda ser menor.

Furtado et al. (2013), ainda acrescenta que é possível realizar sem a retirada dos isolamentos térmicos, o resultado do ensaio independe da temperatura do componente, diz ainda que a espessura para aços chega a 500mm enquanto nos raios X é de até 20 mm, além do conhecimento dos processos que o componente foi submetido ser importante durante sua avaliação e a utilização destas fontes deve seguir a legislação pertinente à proteção, o que pode implicar significativamente em seu custo total.

As desvantagens em relação ao uso do Raio X, segundo Garcia et al. (2008), é necessário maior tempo de exposição pois os raios são de menor intensidade, algumas fontes de vida curta necessitando reposição mais rápida, necessário proteção especial ao operador.

As principais vantagens do ensaio radiográfico, segundo Hellier (2001), fornece um registro extremamente preciso e permanente, é muito versátil e pode ser usado para examinar muitas formas e tamanhos, bastante sensível, supondo que a descontinuidade cause uma redução razoável da espessura da seção transversal, permite a caracterização das descontinuidades e é um método não destrutivo volumétrico.

#### 2.7.4.4 Limitações

As principais desvantagens segundo Furtado et al. (2013), algumas descontinuidades podem não ser detectadas se estiverem em determinados ângulos em relação ao feixe de radiação, o custo associado a cumprimento das legislações pertinentes, além do conhecimento dos processos pelo qual o componente passou, como tratamento térmico e soldagem, o que por muitas vezes é difícil de se obter este histórico apenas visualizando o componente.

Segundo Hellier (2001), existem riscos de segurança com o uso de dispositivos de radiação, tem limitações de espessura, com base na densidade do material e energia utilizada, pode ser demorado, exige ampla experiência e treinamento do pessoal que faz as radiografias e durante a interpretação.

#### 2.7.5 Ensaio Por Ultrassom

##### 2.7.5.1 Princípio

Para Andreucci (Jun/2018), o objetivo do ensaio de ultrassom é detectar descontinuidades internas e defeitos presente nos componentes avaliados podendo eles serem ferrosos ou não, sendo que nós não ferrosos é mais difícil se executar o ensaio, necessitando de um procedimento especial.

Segundo Garcia et al. (2008), o ensaio utiliza ondas ou impulsos ultrassônicos, para detecção de defeitos superficiais ou internos nos componentes avaliados. Dois métodos podem ser utilizados o método da Transparência, que utiliza vibrações constantes ultrassônica e o método de reflexão, utilizando pulsos ultrassônicos. Em ambos os métodos quanto maior a frequência de vibração menor é o tamanho dos defeitos e descontinuidades que podem ser detectadas, por outro lado maior será a absorção do sinal, dificultando o ensaio.

Para Furtado et al. (2013), o ensaio baseia na reflexão das ondas acústicas quando encontram obstáculos à sua propagação, o pulso é transmitido para o componente e se algum obstáculo estiver em posição normal e for atingido pela propagação da onda o pulso refletido será captado por um transdutor, além das marcações de seu tempo entre ida e volta do pulso serão convertidos em sinais

eletrônicos e mostrados em uma tela preparada para mostrar a localização do obstáculo. Como mostrado na figura 9.

**Figura 9 - Ensaio de Ultrassom**



**Figura 9: Adaptado de Furtado et al. (2013)**

#### 2.7.5.2 Aplicação e Desenvolvimento

Provavelmente, a aplicação ultrassom mais comum é a medição da espessura do componente. A condição de “um único lado de acesso” para medição de espessura ultrassônica é muito desejável. Medição de espessura de tubos e tubulações (HELLIER, 2001).

Duas técnicas principais de aplicação do ensaio são utilizadas conforme Furtado et al. (2013), o cabeçote que transmite as ondas é que define, técnica de contato com o cabeçote em contato com a peça utilizando como meio acoplante é água ou óleo e sem contato ou técnica de imersão, o cabeçote não entra em contato direto com a peça ele é mantido a uma certa distância da peça e varia conforme sua espessura.

O ultrassom é concorrente direto com os ensaios radiográficos, por razão de ambos detectarem descontinuidades internas, porém a imagem radiográfica é mais confiável e fácil de ser interpretada se comparada com a imagem dos aparelhos de ultrassom, pois algumas vezes não se consegue identificar o tipo de descontinuidade encontrada (ANDREUCCI, Jun/2018).

A definição de quais peças devem ser ensaiadas por qual processo para Furtado et al. (2013), segue alguns critérios como a sensibilidade necessária, forma geométrica da peça, tipo e orientação da descontinuidade, simplicidade de operação, velocidade de inspeção, entre outros, ou seja a técnica de contato é utilizada em peças

e componentes maiores, além de estruturas soldadas, a técnica sem contato, é usada para ensaiar grandes quantidades de peças, pequenas e geralmente idênticas entre si, comum em sistemas automatizados para inspeção da qualidade. O resultado é comparado com um bloco padrão que é utilizado para a calibração e isso mostra o resultado.

### 2.7.5.3 Utilização

Segundo Furtado et al. (2013), um dos métodos mais utilizados e com maior crescimento de utilização na detecção de descontinuidades internas, pela sua alta sensibilidade, tempo curto para execução, várias espessuras que podem ser utilizadas, aliada a facilidade de aplicação. Almeida (2012), diz que é muito utilizado e útil para medir espessuras de chapas, tubos e a taxa de corrosão.

Para Hellier (2001), quando o ensaio não destrutivo é especificado, as seguintes informações devem ser fornecidas, a descrição do componente, o método de teste especificação para o teste. A especificação para o teste é mais importante. Se não houver uma definição acordada sobre o tipo, tamanho e quantidade de descontinuidades, a determinação significativa de aceitação ou rejeição não será possível. A especificação usada deve considerar a adequação à finalidade do componente. Isso significa que o componente não deve ter descontinuidades que levariam à sua falha. Essa determinação deve ser feita pelo projetista do componente específico, que usará mecânica de fratura para fazer esse julgamento. A avaliação de qualquer indicação deve ser feita levando-se em consideração o código ou especificação referenciada no pedido ou contrato de compra (HELLIER, 2001).

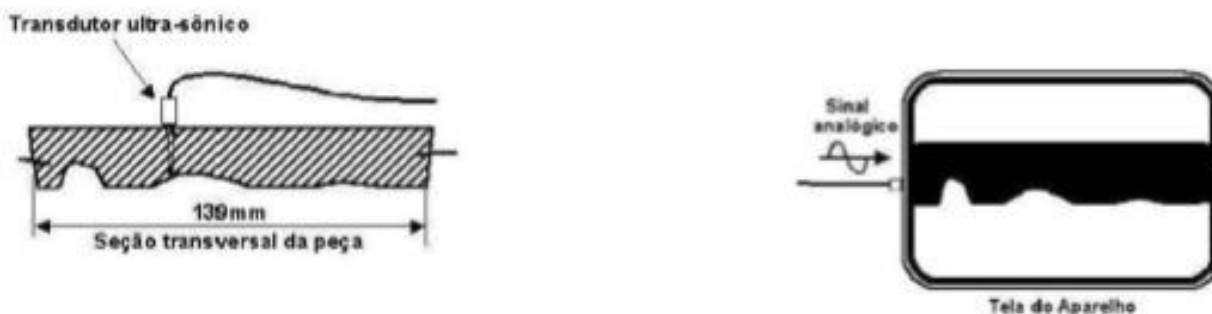
O ensaio de ultrassom passou por constante evolução ampliando sua utilização, novas tecnologias embargadas nos equipamentos, fazendo possível fazer a varredura de grandes áreas e diversos defeitos serem localizados, Furtado et al. (2013), diz que, qualquer tipo de descontinuidade pode ser mostrada através do ultrassom. Vários equipamentos e processos surgiram, como o B-Scan e o C-Scan.

O B-Scan é uma forma gráfica de apresentação dos resultados como mostrado na figura 10, ainda segundo Furtado et al. (2013):

**B-Scan** é um método de apresentação gráfica dos resultados de uma série de medições de espessura que mostra, em escala, o perfil da seção transversal do componente ou peça inspecionada, conforme Figura 10. O rastreamento de espessuras em B-Scan, permite a localização, identificação

e dimensionamento de perdas de espessura e alvéolos, fornecendo um registro permanente através de uma impressora ou fita de vídeo e mapeamentos em croquis com vista planificada. (FURTADO et al. 2013, p. 89 e 90)

**Figura 10 - B-Scan**



**Figura 10: Adaptado de Furtado et al. (2013)**

Os resultados mais significativos para Furtado et al. (2013), são para a identificar e dimensionar regiões danificadas por alvéolos e desgastes por processos corrosivos.

O C-Scan segundo Furtado et al. (2013), é um processo automatizado, ou seja, controlado remotamente, possui diversas aplicações, as imagens mostram mapas de espessuras coloridos e com alta resolução capaz de localizar baixas espessuras. As principais vantagens são:

- a possibilidade de inspeção em superfícies planas ou curvas;
- operação remota, dispensando a montagem de andaimes;
- resolução programável e ajustável via software;
- visualização imediata das falhas em tela colorida de computador;
- possibilidade de medição dimensional (comprimento e largura) das falhas. (FURTADO et al. 2013, p 90).

Segundo Andreucci (Jun/2018), o método possui como principais vantagens e melhor resultado em diversas situações, o ultrassom apresenta alta sensibilidade na detecção de pequenas descontinuidades internas, como pequenas trincas, facilidade na interpretação dos resultados, não requer planos especiais de segurança como os por radiações, além da localização, avaliação do tamanho e interpretação das descontinuidades serem fatores intrínsecos ao exame ultrassônico e dependendo das condições físicas do local pode ser até automatizado. Segundo Hellier (2001), exames de peças grossas e longas, equipamento leve e portátil e não se faz necessária licenças especiais como as necessárias nos exames de radiografia.

#### 2.7.5.4 Limitações

Os principais problemas acontecem devido a fatores que dificultem ou geram camuflagem nos resultados, influenciam a propagação da onda e podem causar desvios nos resultados.

Segundo Furtado et al. (2013), os principais problemas são os materiais com atenuação acústica, alta temperatura, peças com formato complexo, em certos casos necessita-se a retirada da camada de proteção, condição superficial afeta o resultado, o executor deve ser treinado e ter certa experiência para garantir maior confiabilidade e uma dificuldade na medição da espessura de quando a espessura do componente for muito pequena.

Andreucci (Jun/2018), aponta como limitações a realização e interpretação dos resultados, o grande conhecimento teórico e experiência necessária por parte do inspetor, espessuras muito finas geram uma dificuldade para a aplicação do método, necessária preparação prévia da superfície do componente a ser ensaiado.

Algumas das limitações do exame ultrassônico são as seguintes: Descontinuidades orientadas paralelamente à energia do feixe geralmente não serão detectadas. A orientação da descontinuidade é o fator mais importante na sua detecção. Descontinuidades semelhantes ou menores que a estrutura de grãos do material podem não ser detectadas. O registro permanente dos resultados do exame não é típico. Os registros estão limitados à documentação física em vez de uma reprodução real do teste, por exemplo, como é possível com radiografia (HELLIER, 2001).

#### 2.7.6 Ensaio IRIS

##### 2.7.6.1 Princípio

Ensaio foi desenvolvido em 1979 por engenheiros e técnicos da Shell e no Brasil foi utilizado em 1992 (SABINO, 2008, apud MADUREIRA et al, 2004 e OLIVEIRA e CARNEVAL, 1993).

Sistema de inspeção por rotação interna, tem a sigla associada ao seu nome em inglês Internal Rotary Inspection System (IRIS), conforme Furtado et al. (2013), é um procedimento que utiliza um ensaio ultrassônico especial, no qual as

medições são executadas por um equipamento que faz uma varredura circunferencial completa das tubulações e mostra em uma tela de computador, imagens em tempo real do componente.

A técnica de Pulso-eco, é uma técnica onde o transdutor é o equipamento que emite e que recebe as ondas ultrassônicas e pode ser verificada a profundidade da descontinuidade, suas dimensões e localização na peça (ANDREUCCI, 2018).

#### 2.7.6.2 Aplicação e Desenvolvimento

O ensaio é baseado na técnica de Pulso-eco, segundo Furtado et al. (2013), o ensaio é ultrassônico porque o transdutor converte o pulso elétrico em ultrassom (US). Para aumentar a eficiência do ensaio como meio acoplante é utilizado água, pois se for meio gasoso esta transferência é ineficiente, logo é enchida a tubulação com água para se poder realizar o ensaio.

Para a realização do ensaio Furtado et al. (2013), diz que primeiro o pulso é transmitido para a água, ela transporta até a parede interna do tubo onde cerca de 10% desta energia é absorvida pelo tubo e o demais refletida, esta reflexão faz com que a onda volte até o transdutor, esta energia absorvida vai até a parede externa quando novamente é refletida para o interior da tubulação, passa para a água e volta até o transdutor. Além do movimento de rotação é também inserido um movimento de translação pelo operador, fazendo com que o equipamento execute um movimento helicoidal, varrendo toda a superfície da tubulação.

Para se dimensionar a espessura da tubulação ou perda dela, Sabino (2008), infere que o tempo entre a geração da onda sonora e o seu retorno é registrado, sendo conhecida a velocidade do som no material, a distância percorrida pela onda é calculada, podendo então ser definida a espessura do material.

#### 2.7.6.3 Utilização

Apesar de ser relativamente novo o IRIS é amplamente utilizado, segundo Furtado et al. (2013), na avaliação de tubos de caldeiras e trocadores de calor. Utilizado para medição de espessura de tubos além da sua espessura consegue indicar a espessura das fendas e áreas danificadas, seja por corrosão quanto por erosão. O ensaio é geralmente aplicado em tubos de pequeno diâmetro, pelo seu

princípio e propagação do pulso eco. Ele quantifica os defeitos, fendas e áreas danificadas, além da indicação da perda de espessura, de certa forma consegue mapear todo o estado do tubo. Todas as imagens são mostradas na tela do equipamento facilitando a visualização.

Apresenta vantagens, detecta a corrosão, abrasão e furos, pode ser aplicado em uma ampla faixa de diâmetros, materiais e espessuras, além de sua fácil interpretação (SABINO, 2008, apud AL QADEEB, 2005).

#### 2.7.6.4 Limitações

Os resultados dependem da superfície ensaiada, se a qualidade da limpeza não for muito boa pode influenciar negativamente, além da dificuldade em apresentar bons resultados em tubos aletados, principalmente se eles apresentarem continuidade com o material. O aparelho é de grande influência no resultado, além de não detectar trincas (FURTADO et al, 2013). Sabino (2008), ainda diz que o ensaio IRIS, não apresenta boa sensibilidade a trincas ou pequenos furos, dependendo da orientação destas descontinuidades podem refletir energia insuficiente para a detecção.

#### 2.7.7 Exame Através de Ensaio por correntes Parasitas

##### 2.7.7.1 Princípio

Para Furtado et al. (2013), consiste basicamente na indução de corrente elétrica, nos materiais que são condutores, esta corrente será gerada por um campo magnético, ou seja, uma bobina alimentada com corrente alternada. Conforme esta bobina vai sendo passada ao longo do componente ela produz correntes parasitas que sofrem alterações quando encontram descontinuidades em seu caminho, são também afetadas pela condutividade elétrica, permeabilidade magnética e a geometria do material. A medição que esta variação apresenta é comparada a um padrão já determinado, isto produz os dados analisados e as indicações das imperfeições.

Quando aplicado a tubulações, Sabino (2008 apud BIRRING, 2001), diz que o ensaio consiste basicamente na medição da variação de impedância da bobina



quando interage com o tubo testado, estas variações se dão devido principalmente a mudanças de espessura ou presença de descontinuidades.

#### 2.7.7.2 Aplicação e Desenvolvimento

Segundo Furtado et al. (2013), neste ensaio são requeridos alguns parâmetros como, equipamento apropriado para poder se selecionar a frequência correta, sondas superficiais envolventes ou de furos, padrão de calibração e ajuste do equipamento, ter noções da localização e tamanho das descontinuidades, procedimento descrito para ter critério de aceitação e operador qualificado.

O ensaio de correntes parasitas é bem versátil e apresenta uma série de aplicações, entre as principais Hellier (2001), destaca a inspeção em serviço de tubulações em usinas nucleares e de combustíveis fósseis, em plantas químicas e petroquímicas, em submarinos nucleares e em sistemas de ar condicionado, inspeção de estruturas e motores aeroespaciais, teste de produção de tubulações, tubulação, fio, haste e estoque de barras

#### 2.7.7.3 Utilização

São aplicados, segundo Furtado et al. (2013), para detectar trincas em trocadores de calor, detecção de trincas superficiais, o ideal para este caso, é que o padrão definido para calibração contenha trincas parecidas com as que o equipamento ensaiado possa ter e também para detecção de imperfeições em núcleos magnéticos. O ensaio ainda é muito utilizado para outras aplicações, como medição de condutividade, medição de espessura de camadas, medição de espessura de materiais não-condutores e Dureza.

A técnica possui alta velocidade de aplicação e pode inspecionar de forma integral tubos de até 6 metros de comprimentos em menos de 1 minuto (SABINO, 2008, apud BIRRING, 2001 e CARNEVAL, 2002).

#### 2.7.7.4 Limitações

Para Furtado et al. (2013), o método só é aplicável em materiais condutores de eletricidade para detecção de descontinuidades superficiais, ou sub superficiais,

em ferromagnéticos e materiais com alta condutividade a espessura decresce drasticamente. O acesso deve ser permitido a superfície ensaiada pela sonda de teste, se faz necessária também a calibração do equipamento e como um número elevado de padrões que existem conforme o componente ensaiado isto pode acarretar no aumento do custo de realização, os operadores devem estar treinados e capacitados a realizarem o ensaio, porque a interpretação dos resultados e conhecimento das descontinuidades influenciam diretamente no resultado e devem receber atenção especial, além das descontinuidades paralelas ao fluxo da corrente serem difíceis de ser detectadas.

Para Hellier (2001), uma das principais vantagens do método de corrente parasita é também uma das suas mais severas limitações. Ou seja, o método da corrente parasita é sensível a muitas variáveis incluindo condutividade e espessura do material, tamanho das descontinuidades superficiais e subsuperficiais, espessura do revestimento ou revestimento em metais básicos, espaçamento entre camadas condutoras, espaçamento entre bobina de teste e material de teste e variações da permeabilidade. No entanto, a principal limitação do método da corrente parasita é que a resposta a essas variáveis é vetorialmente aditiva, com o resultado que quando mais de uma variável é detectada pela bobina de teste, todas as variáveis se combinam em uma única resposta que pode ser difícil de resolver. A capacidade de suprimir e processar variáveis separadamente identificáveis é um elemento importante do conhecimento do usuário. As técnicas utilizadas para superar esse problema variam de relativamente simples a complicadas e potencialmente caras, como o uso de instrumentos multifrequenciais.

## 2.7.8 Exame através de ensaios metalográficos por réplica

### 2.7.8.1 Princípio

Quando a obtenção de uma amostra específica do material não é possível é então desenvolvida uma réplica da estrutura do componente, para após isto se analisar em laboratório as propriedades do componente.

### 2.7.8.2 Aplicação e Desenvolvimento

A metalografia estuda a morfologia e a estrutura dos metais, é utilizada para a verificar as fases presentes na microestrutura dos materiais. Para a análise, um plano de interesse da amostra é cortado e embutido em resina constituindo assim um corpo de prova metalográfico (ZIMER, 2009).

Segundo Furtado et al. (2013), para ser aplicada a técnica se faz necessária a preparação da região que vai ser analisada, além de lixamento e polimento até que a superfície fique bem polida e isenta de riscos. Após isto é feito um ataque com reagentes químicos específicos para o material, considerando também qual a descontinuidade ou defeito que se pretende visualizar. A visualização se faz com folhas de acetato, umedecidas com solvente. Após currar a microestrutura fica estampada no acetato, pode ainda ser metalizado para melhor contraste.

Para aplicar e executar esta técnica, Furtado et al. (2013), alguns equipamentos são necessários, para polir o componente necessita-se de diversas lixas de várias granulometrias, além de um equipamento para polir, microscópio para verificar a estrutura e poder comparar com a sua réplica, além do solvente e das folhas de acetato.

### 2.7.8.3 Utilização

Zimer (2009) apud LE PERA (1980), que o que pode ser visualizado no microscópio são as diferenças cristalinas e mecânicas evidenciadas em função da dissolução seletiva, ou da coloração seletiva do ataque químico escolhido.

Utiliza-se este ensaio para se avaliar a microestrutura e com isso avaliar as suas propriedades e a perda das mesmas, Furtado et al. (2013), diz que é usado para determinar a vida remanescente, avaliar os danos provocados por operação fora da especificada, ou seja, por mecanismos causadores de mudanças microestruturais, além dos provocados pela utilização, como danos causados por utilização contínua em temperaturas elevadas e a identificação de mecanismos de degradação de superfícies.

Uma amostra metalográfica de seção de tubo completa permite obter dados precisos de diâmetro, espessura de parede, camada de óxidos interna e externa e dimensões descarburadas/cementadas. Dureza, dados metalográficos e variações

circunferenciais nestas e nas características acima mencionadas podem ser obtidas. Os dados laboratoriais mais precisos podem frequentemente ser usados para dados racionais e de campo (MIDDLETON, et al. 1996).

#### 2.7.8.4 Limitações

Furtado et al. (2013), diz que as principais limitações estão associadas ao alto custo que a realização deste ensaio envolve, além de ser demorado se realizado em uma quantidade suficiente de tubos por exemplo, ainda depende muito da experiência e conhecimento do executor, principalmente conhecimento em estrutura dos materiais.

Segundo Zimer (2009), a precisão dos resultados tem influência de diversos fatores como:

A precisão dos resultados depende não só do conhecimento prévio das estruturas, mas também é muito importante uma superfície bem preparada. Para que uma micrografia ofereça bons resultados é necessário fazer a escolha do local de onde serão retiradas as amostras a serem analisadas, execução do corte de modo que não altere as propriedades do material analisado, embutimento, lixamento, polimento, lavagem, secagem, ataque com reagente químico adequado e observação ao microscópio de modo a revelar as interfaces e os distintos constituintes que compõe o material metálico. (ZIMER 2009 apud FASANO 1980 e KAUCZOR 1972).

#### 2.7.9 Ensaio Por Extensometria

##### 2.7.9.1 Princípio

Extensometria é uma técnica de medição de deformações nos corpos solicitados, com o uso de extensômetros (MAGALHÃES, 2008).

Segundo Furtado et al. (2013), quando se quer analisar as tensões tomando como base na deformação que o componente sofre, utilizamos o que chamamos de extensômetros para medi-la, sendo o extensômetro de resistência variável, que converte deformação mecânica em variação da resistência elétrica é o comumente utilizado. As deformações então quando acontecessem provocam pequenas oscilações nos sinais elétricos emitidos, como esta deformação e o sinal

elétrico são pequenos, para poder converter em gráficos e ou relatórios são usadas uma série de aparelhos para fazer o tratamento do sinal.

#### 2.7.9.2 Aplicação e Desenvolvimento

Segundo Furtado et al. (2013), um dos métodos mais utilizado que medem está variação é o método da ponte de Wheatstone, onde o extensômetro faz parte de um ou mais braços da ponte.

Na ausência de deformação a ponte se encontra em equilíbrio. Com a deformação e a conseqüente variação da resistência do extensômetro, a ponte sofre um desbalanceamento que é proporcional à deformação. Outro método é a medida direta das variações da resistência do extensômetro, que apresenta a vantagem de eliminar os efeitos de variação da temperatura e do comprimento dos cabos, que interferem com as medições ao se usar um circuito de Ponte de Wheatstone. - a possibilidade de inspeção em superfícies planas ou curvas; (FURTADO et al. 2013, p. 100).

Hibbeler (2004), diz que quando uma força é aplicada em um corpo, este tende a mudar sua forma e o tamanho, esta mudança é denominada de deformação, que pode ser visível a olho nu ou praticamente imperceptíveis sem o uso de equipamentos para realizar estas medições precisas.

Segundo Furtado et al. (2013), os extensômetros são muito utilizados e importantes, devido a suas características principais como alta precisão de medida, apresentam um baixo custo, excelente resposta dinâmica, fácil instalação, pode ser imerso em água ou em atmosfera de gases corrosivos com tratamento adequado, além da possibilidade de realizar medidas à distância.

#### 2.7.9.3 Utilização

Furtado et al. (2013), diz que a sua utilização é vasta e aplicável onde desejamos encontrar:

- acompanhar os níveis de tensão em um componente, ou como técnica de medição de deformações ocorridas em materiais, até mesmo sem retirar o equipamento de operação. É essencial para monitoramento dinâmico de estruturas sujeitas a carregamentos.

- buscar conhecimento à respeito das condições de tensões residuais em dutos nos quais produtos são transportados. As tensões mecânicas devidas ao carregamento são consideradas nos cálculos de dimensionamento, porém

o nível de tensões residuais é raramente considerado e a medição raramente é executada em campo. A técnica permite que seja feita esta medição de forma rápida e com custo vantajoso se comparada a outras técnicas.

- Acompanhamento do nível de tensão em ensaios de carga.: visa monitorar os níveis de tensão enquanto um equipamento é ensaiado, evitando uma falha catastrófica. (FURTADO et al. 2013, p 103).

Pode também ser utilizado para medir deslocamento, força, aceleração, temperatura, vazão, pressão, entre outros (FURTADO et al. 2013).

#### 2.7.9.4 Limitações

As principais limitações segundo Furtado et al. (2013), são:

- Necessita compensação da variação da temperatura, considerando-se que a temperatura gera deformações em corpos sólidos e que estas poderiam ser confundidas com a provocada pela ação da força a ser medida. - Os adesivos para colagem dos extensômetros têm de apresentar elevada resistência mecânica, boa aderência, facilidade de aplicação e baixa sensibilidade ao efeito da temperatura sobre o seu desempenho. - Necessita acesso à superfície a ser ensaiada. - Necessita de uma ótima calibragem. - É sensível à condição de acabamento da superfície e da condição de aderência. - Tem limitações relativas à temperatura da peça. (FURTADO et al. 2013, p 103).

#### 2.7.10 Análise Físico Química Dos Materiais

##### 2.7.10.1 Princípio

O ensaio baseia-se na análise dos elementos fundamentais presentes no componente avaliado, esta análise geralmente é laboratorial, mas existem equipamentos portáteis que detectam tais componentes.

##### 2.7.10.2 Aplicação e Desenvolvimento

A composição de um depósito, para Furtado et al. (2013), pode ser definida realizando a análise química ou espectrográfica dele, as substâncias podem ser identificadas por microscopia ou difração de raios X e os organismos por métodos microscópicos ou biológicos. Conhecendo a composição química dos depósitos formados nas tubulações e caldeiras, pode-se então com essas informações aplicar tratamentos preventivos e corretivos na água utilizada para evitar futuros problemas.

Vários métodos de análise de incrustações foram testados e Furtado et al. (2013), infere que os resultados apresentavam um problema a grande variação de resultados obtidos entre eles, sendo assim a ASTM criou um método o ASTM D-887, que define como a coleta da amostra deve ser realizada.

#### 2.7.10.3 Utilização

Furtado et al. (2013), diz que a principal utilização é para a análise dos materiais dos depósitos e incrustações em caldeiras e tubulações, ocasionadas pelos minerais, produtos químicos oriundos dos tratamentos, além de contaminantes da própria caldeira ou de sistemas ligados a caldeira que podem estar presentes nas águas utilizadas.

#### 2.7.10.4 Limitações

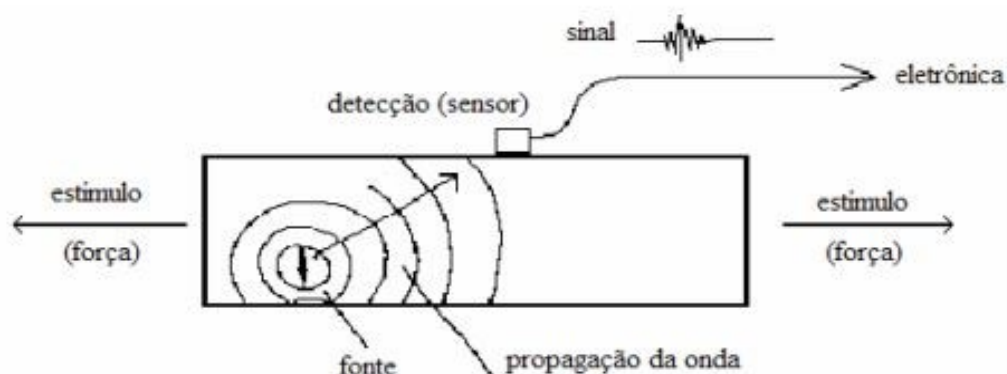
Segundo Furtado et al. (2013), as limitações estão ligadas à retirada da amostra, explicação e interpretação dos resultados, além do trabalho e aparelhagem necessária a execução do exame, o autor explica que para realizar uma análise completa é necessária uma aparelhagem especial, em virtude de que a retirada da amostra é complexa e de difícil padronização e tem influência direta nos resultados, além da dificuldade em explicar os resultados e estar sujeita a várias interpretações.

#### 2.7.11 Emissão Acústica

##### 2.7.11.1 Princípio

O princípio da técnica de emissão acústica segundo Tiboni (2011 apud SOARES e MOURA, 2007), é o fato que o crescimento de descontinuidades, quando causadas por um campo localizado de tensões, acaba por liberar ondas elásticas transientes, de natureza mecânica, que viajam pelo material e são capturadas por transdutores, que transforma esta oscilação em sinal elétrico, que posteriormente é tratado por um sistema de emissão acústica. Como apresentado na figura 11.

**Figura 11 - Princípio do ensaio de emissão acústica**



**Fonte: Adaptado de Soares 2008**

Para Furtado et al. (2013), o ensaio por emissão acústica é baseado na detecção de ondas de natureza mecânica, que são emitidas pelas discontinuidades e defeitos presentes no componente, durante a sollicitação dos materiais e equipamentos. Esta área com defeitos quando sofre estímulo ou sollicitação, libera ondas de tensões que estão na forma de ondas mecânicas transientes, que são captadas por transdutores piezoelétricos e com equipamentos especiais pode-se localizar a região com presença dos defeitos.

#### 2.7.11.2 Aplicação e Desenvolvimento

Furtado et al. (2013), diz que a instalação dos transdutores requer que a superfície seja preparada, mas somente no ponto de instalação é necessária a preparação. Soares (2008), complementa dizendo que os sensores piezoelétricos são mais utilizados em função do seu custo e facilidade de fabricação e em relação a resposta do sensor:

A resposta do sensor é determinada, inicialmente, pela forma e dimensão do cristal piezoelétrico e pelas constantes elásticas e piezoelétricas; em seguida pela forma com que o cristal é amortecido e montado dentro da caixa do sensor e, finalmente, pelo acoplamento e montagem do sensor na estrutura em teste e pelas propriedades acústicas da estrutura em teste. (SOARES 2008, p. 15).

Furtado et al. (2013), ainda infere que o componente a ser ensaiado deve ser submetido a carga até um ponto onde suas falhas internas sejam ativadas e comecem a progredir gerando as ondas mecânicas.



### 2.7.11.3 Utilização

O método é bastante utilizado e pode ser aplicado sobre diversas condições como inserido por Tiboni (2011):

A inspeção por EA é um método global, em outras palavras, pode ser realizada simultaneamente por toda a amostra (em oposição à inspeção por ultra-som, por exemplo, que é caracterizada como pontual) e pode ser aplicada sobre uma ampla variedade de estruturas, tais como: tanques de armazenamento, tubulações, vasos de pressão, transformadores de potência, entre outros. Esta técnica é também aplicável em uma ampla variedade de materiais e espessuras à temperatura ambiente ou altas temperaturas (TIBONI et al., 2009). (TIBONI 2011, p. 43. apud TIBONI et al., 2009).

Para determinar a localização dos defeitos e descontinuidades que geram as ondas mecânicas Soares (2008) diz que deve se seguir o princípio geométrico:

A localização de fontes de sinais de emissão acústica segue o princípio geométrico de que dois pontos definem uma reta, três pontos um plano e quatro pontos um volume. Sendo assim, para efetuar a localização de uma fonte de emissão acústica em uma linha reta será necessário, no mínimo, a instalação de dois sensores; para definir uma fonte em uma superfície, três sensores; e para definir uma fonte na seção transversal de um componente, quatro sensores. (SOARES, 2008, p. 23).

Segundo Soares (2008), quando relacionada com a integridade estrutural o ensaio de emissão acústica seria realizado simplesmente para indicar regiões ativas acusticamente ou seja regiões onde se detectava o início da propagação das ondas mecânicas e essas regiões posteriormente deveriam ser inspecionadas por métodos pontuais de ensaios não destrutivos, para que fosse detectado mais precisamente o defeito, indicando sua dimensão e definindo também sua morfologia.

Segundo Furtado et al. (2013), este procedimento pode ser aplicado a um grande número de estruturas, como: sistemas de tubulações, tanques de armazenamento e todos os tipos de vasos de pressão, além de vários materiais e espessuras que podem ser ensaiadas.

### 2.7.11.4 Limitações

Furtado et al. (2013), diz que os principais problemas estão relacionados a sensibilidade do sistema que a técnica não deve ser utilizada com exclusividade, mas em combinações com outros ensaios não destrutivos, além de sofrer interferência de

diversos ruídos como o de vazamentos e a necessidade obrigatória de contato entre o sensor e o componente.

Soares (2008 apud HSU, 1977), diz que várias formas de sinais padrões foram testados para a calibração e o mais aceito e mundialmente conhecido é o sinal gerado pela quebra de um comprimento de 2 a 3 mm de uma barra de grafite 2 H com diâmetro 0,3 mm, como padronizado pela NBR 15194.

## 2.7.12 Termografia

### 2.7.12.1 Princípio

A termografia baseia-se na percepção da radiação térmica que é emitida por um corpo, Cortizo (2007), infere que todo corpo em que sua temperatura for superior ao zero absoluto está emitindo radiação térmica e que a termografia percebe a temperatura superficial do corpo. Furtado et al. (2013), corrobora dizendo que a termografia, é uma técnica de estudo dos corpos através dos raios infravermelhos que por ele são emitidos. Cortizo (2007 apud HOLST, 2000), deverá haver um diferencial de temperatura entre o alvo e o meio, pois somente neste caso será possível ocorrer uma diferenciação entre o alvo e o meio, neste caso o alvo seria o componente a ser avaliado.

### 2.7.12.2 Aplicações e Desenvolvimento

Segundo Cortizo (2007 apud MALDAGUE, 2001) duas técnicas principais são utilizadas na termografia, chamadas de técnicas passivas e técnicas ativas, o que difere é a forma como os corpos absorvem ou possuem a energia térmica suficiente para que ocorra a liberação de radiação térmica, nas técnicas passivas os corpos já possuem energia suficiente, uma fonte interna ou são estimulados por alguma fonte natural e nas técnicas ativas os corpos são aquecidos ou resfriados por mecanismos, que geram fluxo de calor e o gradiente térmico necessário. Furtado et al. (2013), diz que as técnicas consistem na aplicação de tensões térmicas, medição da temperatura que desta maneira as anomalias e descontinuidades possam ser detectadas.

Segundo Cortizo (2007) apud MALDAGUE (2001), quando o componente recebe um pulso de energia térmica, esta energia se propaga por difusão e quando

existe a presença de descontinuidades ou defeitos a taxa de difusão é modificada, logo ele apresentará temperaturas diferentes, com relação a sua vizinhança.

A termografia é um método de inspeção muito versátil, Hellier (2001), ainda acrescenta que as aplicações em que a termografia é eficaz são numerosas. A indústria aeroespacial está agora ampliando e, em alguns casos, suplantando a ultrassônica e a radiografia para determinar a localização de falhas e inclusões no subsolo em compósitos de última geração. Usando técnicas semelhantes, um empreiteiro de telhados pode localizar áreas de isolamento de teto molhado para substituição. Desde identificar problemas de produção em placas de circuito impresso, até encontrar conexões frouxas em sistemas elétricos, até o mapeamento térmico de máquinas industriais complexas, a lista de aplicações de termografia é grande e diversificada. Quando o calor é um subproduto de um processo, ou quando um objeto sofre um ciclo térmico, a termografia pode muito bem ter a capacidade de fornecer informações sobre a operação e / ou a integridade interna de um componente.

### 2.7.12.3 Utilização

A termografia é uma técnica simples e muito utilizada, Furtado et al. (2013), diz que pode se utilizar termografia em qualquer situação em que exista calor envolvido, além do treinamento para a execução do mesmo ser bem específico e de baixa duração. Infere também que é um ensaio eficiente para determinar pontos quentes, sobrecargas de origem elétrica e térmica, perda de eficiência e vazamentos em sistemas isolados, se adotada uma periodicidade para se realizar este ensaio é possível perceber pequenas mudanças apenas comparando os resultados.

Inspeções mecânicas abrangem uma variedade de equipamentos. A tecnologia provou ser uma ferramenta inestimável para observar motores, equipamentos rotativos, purgadores de vapor, refratários e produtos de tanques, entre outros. A maioria desses aplicativos é de natureza qualitativa, geralmente comparando a imagem térmica atual com uma anterior e entendendo a causa e a extensão de quaisquer alterações. Tal como acontece com os equipamentos elétricos, é benéfico estabelecer rotas de inspeção e frequências periódicas com base nas necessidades e recursos (HELLIER, 2001).

Em algumas aplicações, a termografia provou ser uma técnica de inspeção altamente eficaz e muito fácil de usar, enquanto outras aplicações podem exigir análises sofisticadas. Provavelmente, as duas vantagens que a termografia tem sobre muitas outras técnicas de inspeção é que ela é rápida e pode criar uma imagem térmica. Para muitas aplicações, um termógrafo experiente e treinado pode determinar a condição quase imediatamente ao visualizar a imagem térmica com o equipamento certo, e bons termógrafos podem criar uma excelente imagem térmica em segundos (HELLIER, 2001).

#### 2.7.12.4 Limitações

As principais limitações e dificuldades de aplicação deste ensaio são:

- As variações na distribuição das temperaturas podem ser muito pequenas para serem detectadas;
- Discrepâncias muito pequenas podem ser mascaradas, pelo "ruído de fundo", e permanecer sem detecção;
- As principais organizações de normalização ainda não reconhecem a termografia como um método confiável de END para avaliação e certificação dos produtos ensaiados.
- Os custos de investimento em um termovisor ainda é relativamente alto, entretanto com o desenvolvimento tecnológico, os aparelhos vem se tornando mais acessíveis.
- Diversas empresas prestam serviços, entretanto, muitas vezes os relatórios não são bem estruturados, não mapeiam adequadamente as posições do objeto e apenas apresentam conclusões qualitativas em relação ao trabalho pontual, desconsiderando mapeamentos anteriores
- Necessita da radiação infravermelha emitida pelos corpos;(FURTADO et al. 2013, p.113 e 114).

## 2.8 ENSAIO HIDROSTÁTICO

### 2.8.1 Princípio

O ensaio hidrostático se baseia em exercer no equipamento um carregamento crescente e limitado de pressão e observar seu resultado. Como o ensaio pode conduzir a diversos tipos de falhas, na ótica de muitos técnicos não é

considerado um ensaio não destrutivo, podendo ser considerado, como semi-destrutivo ou até destrutivo (FURTADO et al. 2013).

### 2.8.2 Aplicação e Desenvolvimento

Segundo Furtado et al. (2013), para realizar-se o teste hidrostáticos deve-se isolar o trecho de tubulação por meio de raquetes ou flanges cegos. As soldas que forma recentemente feitas e demais ligações (flanges, roscas, uniões) devem estar expostas durante a realização do ensaio.

A pressão durante o teste de estanqueidade deve ser definida pelo profissional responsável em função dos parâmetros de projeto. Atenção especial deve ser dada à temperatura com que o fluido de teste é utilizado, com relação ao material da tubulação, muito em função do risco de ocorrer fratura frágil (FURTADO et al. 2013).

O teste hidrostático pode ser dispensado, seguindo critério do profissional responsável, contudo as linhas devem ser submetidas a outros ensaios ou técnicas de inspeção que permitam ser disponível garantir a segurança do componente avaliado (FURTADO et al. 2013).

A NR-13, em sua última atualização em 2018 infere no seu artigo 13.4.4.3 as caldeiras devem obrigatoriamente ser submetidas a Teste Hidrostático (TH) em sua fase de fabricação, com comprovação por meio de laudo assinado por profissional habilitado (PH), e ter o valor da pressão de teste afixado em sua placa de identificação.

### 2.8.3 Utilização

O teste hidrostático é utilizado principalmente em caldeiras e vasos de pressão e deve ser realizado após a aplicação dos ensaios não destrutivos, é obrigatório por norma ser executado e recomenda-se que seja feito o acompanhamento através de outro método para avaliar se algum defeito sub crítico não se torne crítico ou um defeito inativo torne-se ativo pois a pressão do teste é acima da pressão máxima de trabalho admissível pelo equipamento (FURTADO et al. 2013).

#### 2.8.4 Limitações

Segundo Furtado et al. (2013), os testes de pressão são realizados conforme o código de construção original. Os equipamentos em operação sofrem diversos tipos de carregamentos, sendo assim, um equipamento em uso não deve ser submetido ao mesmo carregamento de um equipamento novo sem que sejam tomados os devidos cuidados.

O Teste deve ser realizados com pressões máximas de operação normal e se possível com o próprio fluido de trabalho. Verificando então a estanqueidade, e para somente para verificação de estanqueidade, para detectar vazamentos, gaxetas e ligações (FURTADO et al. 2013).

### 3 METODOLOGIA

Visando um melhor entendimento das avaliações de integridade realizadas e sobre os métodos utilizados para o tal, este trabalho busca analisar os métodos e os ensaios não destrutivos que são utilizados para avaliar os danos sofridos pelas caldeiras durante o seu período de utilização. O desenvolvimento deste trabalho consistiu das seguintes etapas:

A – Avaliação de integridade: Nesta etapa o objetivo foi inferir informações sobre a avaliação de integridade.

B - Identificação dos métodos: Objetivo dessa etapa foi identificar os métodos utilizados para a avaliação de integridade, levantando os pontos a ser estudados. Para este trabalho foi realizada pesquisa bibliográfica para identificação dos métodos mais utilizados, com foco nos ensaios não destrutivos utilizados;

C – Ensaios não destrutivos: O objetivo dessa etapa foi a análise dos ensaios não destrutivos utilizados, apontando seu princípio, aplicação, utilização e limitações que cada um apresenta.

D – Pesquisa com profissionais que realizam avaliações de integridade: o objetivo desta etapa foi de observar a utilização dos métodos estudados. Buscou-se identificar que ensaios e com quais objetivos são utilizados. Aponta-se, na opinião destes profissionais, quais as vantagens e quais as dificuldades na aplicação desses.

#### 3.1 PESQUISA COM PROFISSIONAIS HABILITADOS

Realizou-se pesquisa com 03 profissionais habilitados, engenheiros mecânicos, que atuam na região de abrangência da UTFPR Campus Pato Branco. Estes, por questão de privacidade, foram identificados como profissional A, profissional B e profissional C. Os mesmos realizam a avaliação de integridade em caldeiras (objetivo deste trabalho) bem como outros serviços como instalação de caldeiras, inspeções periódicas e extraordinárias conforme NR-13.

A pesquisa, foi estruturada, buscando melhor entendimento sobre a forma de aplicação dos ensaios, além de poder comparar com a teoria e verificar se estão sendo selecionados corretamente.

A pesquisa baseou-se em algumas perguntas simples, foram elas:

1. Quais ensaios você utiliza?

2. Com qual objetivo são realizados estes ensaios?
3. Tem algum componente que obrigatoriamente você utiliza algum ensaio específico?
4. Quais as Vantagens, ou por que é utilizado este ensaio?
5. Quais as limitações ou desvantagens?
6. Após a detecção, qual o critério ou tamanho de trinca e porosidade que é considerado para intervenção, reparo ou insignificante para o processo e a caldeira pode operar normalmente?

Sobre os profissionais A, B e C:

Profissional A: Com experiência de 3,5 anos atuando com avaliações de integridade.

Profissional B: Com experiência de 7,5 anos atuando com avaliações de integridade.

Profissional C: Com experiência de 6,5 anos, mas com 4 anos de experiência atuando com avaliações de integridade.



## 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

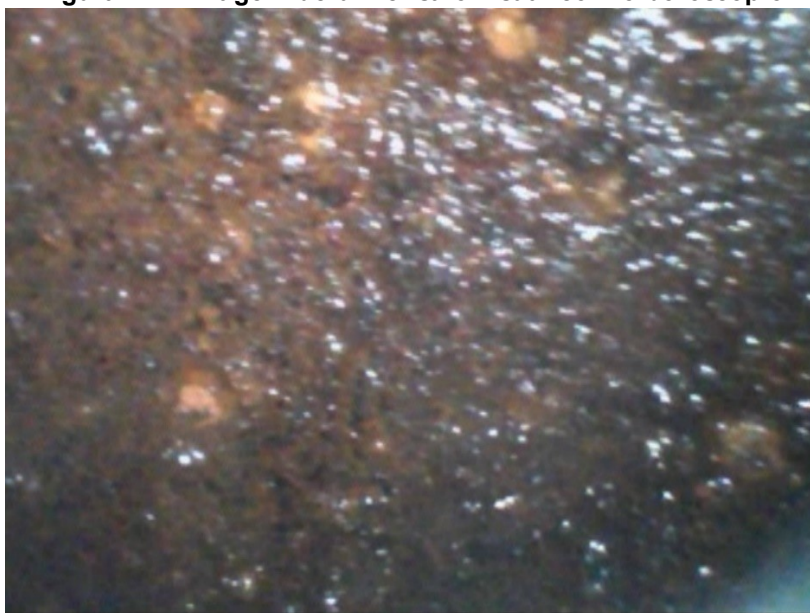
Com objetivo de observar a utilização dos métodos estudados, realizou-se pesquisa com 03 profissionais habilitados, engenheiros mecânicos, que atuam na região de abrangência da UTFPR Campus Pato Branco. Estes, por questão de privacidade, foram identificados como profissional A, profissional B e profissional C. Os mesmos realizam a avaliação de integridade em caldeiras (objetivo deste trabalho) bem como outros serviços como instalação de caldeiras, inspeções periódicas e extraordinárias conforme NR-13.

Buscou-se identificar que ensaios e com quais objetivos são utilizados. Aponta-se, na opinião destes profissionais, quais as vantagens e quais as dificuldades na aplicação desses.

### 4.1 DADOS DO ENSAIO VISUAL

O exame visual foi definido como de grande importância por todos, o profissional A, infere que é de extrema importância a realização deste ensaio para se ter uma avaliação inicial, além de se poder definir pontos para aplicação de ensaios mais específicos como líquido penetrante e partícula magnética, muitas vezes é utilizado o boroscópio para visualizar a parte interna, principalmente dos tubos, infere ainda que a experiência e conhecimento do profissional que executará o ensaio é de grande importância, para a interpretação e análise do componente. O profissional B, cita que o ensaio é barato consegue-se uma boa avaliação inicial e auxilia principalmente na definição da estratégia para a realização dos ensaios, ou seja, qual ensaio aplicar nos pontos já detectados com possíveis defeitos ou complicações presentes, além disso com o boroscópio é possível também visualizar a parte interna de alguns componentes mesmo em condições ruins, como dificuldade diz que a câmera, muitas vezes pode sujar durante a execução do ensaio e dificultar a visualização e interpretação, além de dizer que o ensaio permite apenas visualização da superfície, logo defeitos internos não são detectados, O profissional C, comenta principalmente do ensaio nas soldas conseguindo assim avaliar quais devem passar por um ensaio posterior de líquido penetrante. O ensaio é feito de diversas formas exemplifica nas figuras 12 e 13.

**Figura 12 – Imagem de um ensaio visual com o boroscópio**



**Fonte: Adaptado de engenheiro A**

**Figura 13 – Ensaio Visual do Isolamento dos tubos**



**Fonte: Adaptado BREMER (2014).**

#### 4.2 DADOS ENSAIO DE LIQUIDO PENETRANTE

O ensaio de líquido penetrante foi bastante considerado para inspeção em soldas, principalmente as que não são originais da caldeira, ou seja, que foram feitas após a sua instalação. O profissional A diz que é um dos ensaios que ele mais utiliza principalmente nas soldas e também onde julgar necessário durante a inspeção visual,

ainda diz que o líquido penetrante detecta os defeitos superficiais, como trincas e porosidades, fala ainda da importância de todas as etapas que devem ser seguidas para a aplicação e o bom resultado dos ensaios. O profissional B, concorda dizendo que utiliza o ensaio para detecção de defeitos superficiais e ainda diz que o ensaio é barato, com exceção do detector de falha e a principal desvantagem assim dizendo é de não poder aplicar internamente e a não detecção dos defeitos internos. O profissional C, infere que além das colocações anteriores aplica o ensaio de líquido penetrante no espelho onde se encontra a junção dos tubos, podemos visualizar o resultado nas figuras 14, 15 e 16.

**Figura 14 – Solda que será submetida ao ensaio de líquido penetrante**



**Fonte: Adaptado de engenheiro A**

**Figura 15 – Líquido penetrante Aplicado**



**Fonte: Adaptado de Engenheiro A**

Figura 16 – Visualização do ensaio de líquido penetrante com luz ultravioleta



Fonte: Adaptado de engenheiro A

#### 4.3 DADOS ENSAIO DE ULTRASSOM

O ensaio de ultrassom foi também lembrado por eles, o profissional A, infere que utiliza o ultrassom para a medição de espessura em toda a caldeira, se for um com phased array é possível verificar os defeitos no interior das soldas, mas é muito mais caro que o equipamento normal de ultrassom. O profissional B, comenta que verifica a redução da espessura original, ainda diz que com este valor é recalculada a pressão suportada pelos componentes, ou seja, pode ser mantida ou diminui a pressão máxima de trabalho admissível (PMTA), ainda infere que uma dificuldade é a questão do acesso ao local da inspeção, sendo possível apenas a inspeção de locais aparentes, pode ser necessário lixar a superfície e é demorado. O profissional C, diz que faz uso de um equipamento de ultrassom industrial, para realizar a medida da espessura apresentada e que esta é comparada com a anterior apresentada no prontuário da caldeira, para poder recalculer a PMTA segundo o código ASME e conseqüentemente o novo valor para se realizar o teste hidrostático, ainda diz que efetua o ensaio nos espelhos e do corpo da caldeira. Como pode-se observar na figura 17 a realização de um ensaio e na figura 18 os pontos marcados na inspeção visual para se verificar a espessura por ultrassom.

**Figura 17 – Realização de medição de espessura**



Fonte – Adaptado de engenheiro A

**Figura 18 – Pontos marcados para se realizar a medição de espessura por ultrassom**



Fonte: Adaptado de engenheiro A

#### 4.4 DEMAIS ENSAIOS NÃO DESTRUTIVOS DISCUTIDOS

Outros ensaios são utilizados por alguns destes engenheiros durante a execução da avaliação de integridade, mas nem todos os utilizam por serem mais onerosos e difíceis de se aplicar, como por exemplo, os ensaios de partículas magnéticas e de Raio X.

O ensaio de partículas magnéticas, segundo o profissional A, é utilizado para detectar os defeitos internos dos componentes. Se comparado com o líquido penetrante, as partículas magnéticas apresentam os defeitos internos até determinada espessura, enquanto o primeiro não atinge as mesmas espessuras, além de ser de rápida execução.

O ensaio de Raio X, para o profissional A, é o que apresenta melhor resultado, consegue alta eficiência em soldas e é muito bom para se realizar o cálculo da nova PMTA (resultante do processo de análise de integridade estrutural), porém o custo para sua execução é alto.

#### 4.5 TESTE HIDROSTÁTICO

Durante a realização dos ensaios são detectados os defeitos presentes na estrutura do componente, segundo o profissional A, após a detecção, os defeitos mais críticos são recuperados e caso exista uma descontinuidade ou porosidade pequena é realizado o teste hidrostático para verificar se a pressão calculada não altera as condições destes defeitos.

O teste hidrostático busca segundo o profissional B, verificar se os danos diversos que o componente sofreu não comprometam a segurança durante o seu funcionamento, além de forçar o equipamento para que apareçam problemas para se poder condenar ou reformar o equipamento, infere ainda que permite uma maior garantia que o equipamento resiste ao processo até a próxima inspeção e como limitante diz que o ensaio pode ser destrutivo pois trabalha-se com pressão acima da especificada como máxima para o equipamento. O profissional C infere também que o ensaio é realizado para se poder verificar se a nova PMTA está realmente condizente com a realidade do componente.

#### 4.6 AVALIAÇÃO DOS ENSAIOS UTILIZADOS

Os ensaios não destrutivos são parte muito importante nas inspeções periódicas realizadas em caldeiras, mais ainda nas inspeções que fazem a avaliação de integridade. Mostrou-se que existem vários ensaios e dentro de um ensaio vários equipamentos que auxiliam na detecção das descontinuidades e dos defeitos que podem estar presentes nos componentes das caldeiras.

Os ensaios são utilizados 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, além de avaliar as necessidades para realizar o ensaio nos componentes que serão avaliados.

Durante a discussão com os profissionais habilitados, levantou o objetivo que os levavam a utilizar cada ensaio, ou seja, que defeitos queriam detectar, além do que eles no dia a dia de trabalho perceberam e percebem como pontos fortes e dificuldades na execução do mesmo. Os ensaios comentados foram: ensaio visual, líquido penetrante, ultrassom, raio x, partículas magnéticas e o ensaio hidrostático.

O exame visual se mostra muito importante na realização de uma avaliação de integridade, pôde-se perceber que pelo objetivo e forma como é aplicado pelos profissionais habilitados o ensaio é muito importante na definição da estratégia, nota-se que a experiência do profissional é de extrema importância, seja pela facilidade em julgar os defeitos encontrados ou pela economia de tempo que se tem, ou seja, selecionando o próximo ensaio corretamente consegue-se especificar os defeitos mais precisamente, além de marcar os pontos que necessitam de outro ensaio, como mostrado anteriormente na figura 18, pontos definidos por ensaio visual para ser medida a espessura por ultrassom.

O ensaio visual tem várias vantagens e por isso é muito utilizado, muito do ensaio é realizado a olho nu ou com auxílio de uma lente, isso faz com que o ensaio se torne barato, mas não é um ensaio suficiente para se obter todas as informações para se avaliar a integridade das caldeiras, com o boroscópio consegue-se visualizar o interior das tubulações, ensaio muito utilizado e de baixo custo.

O ensaio de líquido penetrante é muito utilizado para se verificar os defeitos superficiais de cada componente, os profissionais destacam o caso das soldas que são feitas, principalmente as não originais, ou seja, se foi feita alguma solda após a instalação do equipamento, segundo o profissional A neste local ele realiza

obrigatoriamente o ensaio de líquido penetrante. O ensaio não demonstra defeitos internos e isto é um ponto fraco discutido do ensaio.

O ensaio de líquido penetrante é relativamente barato, detecta as descontinuidades, porosidades e trincas que estão abertas para a superfície, por isso exigem uma boa preparação da superfície do componente a ser ensaiado, além da mesma não pode ser muito porosa ou absorvente pois podem camuflar o resultado do ensaio.

O ensaio de ultrassom é amplamente utilizado e tem várias funções variando com seus equipamentos, o mais comum e indicado pelos profissionais é a medição da espessura de parede, que verifica o tamanho real e comparando com a original consegue-se definir o quanto a espessura diminuiu, além de com esses valores definir a PMTA e a pressão para se realizar o teste hidrostático, demora mais tempo para se executar, mas quando feito o resultado é imediato e mostrado no visor do equipamento como mostrado na figura 17.

O ensaio de ultrassom tem muitos usos e detecta descontinuidades internas, trincas, porosidades, além de medir a espessura, tem uma ampla faixa de espessuras que pode ser utilizado, o que implica na utilização apenas do equipamento que mede a espessura é o custo associado aos equipamentos que detectam as demais características. Como o ensaio é demorado a definição prévia de locais específicos para se medir a espessura auxilia em muito na execução, tendo pontos com concentradores de tensões como os principais a serem avaliados, estes pontos são geralmente definidos pela profissional que faz uso da sua experiência e da análise de tensões.

O ensaio de raio x apresenta melhor resultado na detecção dos possíveis defeitos dos componentes, mas em compensação tem alto custo e o acesso aos locais pode ser difícil. O ensaio de raio x detecta os mais diversos defeitos, trincas, vazios, descontinuidades e inclusões sejam superficiais ou subsuperficiais, o principal problema é a não detecção de algumas descontinuidades que estejam em determinados ângulos em relação ao feixe de radiação, por isso aconselha-se a executar o ensaio em dois sentidos.

As partículas magnéticas são um substituto ao líquido penetrante porém com detecção para maiores espessuras, ou seja, detectam defeitos internos do componente, as dificuldades apresentam-se no acesso ao local de execução do ensaio, componentes maiores e complexos demandam equipamentos maiores que



podem acarretar nesta dificuldade, além de ser necessário remover o isolamento, em condições ideais o ensaio é muito rápido e eficiente.

O ensaio hidrostático é considerado um ensaio destrutivo, mas é muito executado neste tipo de avaliação, o que percebeu-se é que ele é utilizado para verificar se a nova PMTA 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, recomenda-se o monitoramento da execução com algum método não destrutivo como emissão acústica para realizar este monitoramento, além de que a NR-13 atualizada em 2018, especificar que o teste hidrostático não é obrigatório neste caso.

Considerando os ensaios apresentados e discutidos, pode-se concluir analisando a discussão com os profissionais habilitados, que os ensaios estão sendo utilizados corretamente, ou seja, o objetivo dele está correto e é o mesmo que a teoria infere, mas vale ressaltar a importância de se verificar as limitações e necessidades de cada ensaio. Equipamentos necessários para se poder realizar os ensaios, além de que o equipamento de ultrassom mais comumente utilizado é o que mede a espessura da parede.

#### 4.7 COMPARAÇÃO ENTRE OS ENSAIOS NÃO DESTRUTIVOS

Os variados ensaios não destrutivos, são muito utilizados, mas para sua aplicação ser mais assertiva e com excelentes resultados, deve-se verificar as condições em que eles podem ser aplicados, quais as etapas a serem realizadas, ou seja, o que é necessário a sua execução e principalmente os defeitos e imperfeições que se quer detectar, como exemplificado na tabela 2 criada por Furtado et al. (2013), contendo 7 ensaios e os demais que foram acrescentados pelo autor.

Tabela 2- Características dos ensaios não destrutivos

ENSAIO	DETECÇÃO	VANTAGENS	LIMITAÇÕES	NECESSIDADES PARA APLICAÇÃO
VISUAL	Defeitos superficiais; Deformações; Corrosão; Trincas de soldas; Trincas no metal base; Fraturas; Erosão; Protuberâncias; Empeno; Desalinhamentos; Incrustações;	Baixo Custo; Portabilidade; Resultados imediatos; Pouca habilidade requerida; Mínimo preparo da peça;	Somente para superfícies expostas; Geralmente só detecta defeitos maiores; Má interpretação de trincas ou ranhuras;	Boa preparação de superfície; Boa iluminação; Experiência profissional;
LIQUIDO PENETRANTE	Descontinuidades muito pequenas; Porosidades; Falta de Fusão; Trincas de soldas; Trincas no metal; Fraturas.	Simple, Barato e de fácil interpretação; Análise de peças de geometria complexas; Portabilidade; Resultados imediatos; Sistema facilmente automatizável;	Só detecta descontinuidades abertas à superfície; Não pode ser utilizado em superfícies porosas ou absorventes; Temperatura de trabalho entre 10° a 52° C.	Excelente preparação de superfície; Boa iluminação; Experiência profissional;
PARTÍCULAS MAGNÉTICAS	Detecta defeitos superficiais e subsuperficiais;	Semi-portátil; Sensível a pequenas indicações; Sensível a inclusão e trincas; Habilidade moderada para execução;	Não utilizável em áreas, onde há forte campo magnético; Requer remoção de revestimentos superficiais e vedante (selo); Inspeção semidirecional, exigindo orientação do campo para defeitos; Peça deve ser desmagnetizada após a inspeção;	Peça deve ser fisicamente e visualmente acessível para execução do ensaio;
ULTRASSOM	Descontinuidades internas; Trincas; Falta de Fusão; Porosidades; Medição de espessura; Corrosão;	Adequado para defeitos de superfície; Sensível a pequenos defeitos; Resultados do ensaio imediatos; Pouca preparação da peça; Ampla faixa de espessuras de atuação.	Peças de formatos complexos; Materiais com alta atenuação acústica (madeira, concreto, certos fundidos e metais não ferrosos) ou alta temperatura são ensaios de difícil realização;	Superfície da peça a ser inspecionada deve ser acessível à sonda sônica; Experiência profissional;

Tabela 2 - Continuação

ENSAIO	DETECÇÃO	VANTAGENS	LIMITAÇÕES	NECESSIDADES PARA APLICAÇÃO
IRIS	Detecta descontinuidades, trincas e vazios.	Ele quantifica os defeitos, fendas e áreas danificadas; indica a perda de espessura; as imagens são mostradas na tela do equipamento facilitando a visualização; indica a espessura das fendas e áreas danificadas,	Utilizado apenas nas tubulações; apresenta dificuldade na detecção em tubos aletados; Aparelho influencia muito no resultado e é caro; meio acoplante; Pode refletir energia insuficiente, dependendo da orientação das descontinuidades;	Equipamento; Superfície possa ser limpa; Para aumentar a eficiência colocar água nos tubos para atuar como meio acoplante;
METALOGRAFICOS POR RÉPLICA	Verifica as fases presentes na microestrutura do material e com isso avaliar as suas propriedades e a perda das mesmas;	Permite obter dados precisos de diâmetro, espessura de parede, camada de óxidos interna e externa e dimensões descarburadas/cementadas. Dureza, dados metalográficos e variações circunferenciais	Custo associado ser elevado; Tempo até a obtenção dos resultados ser mais longo; sofre influência da experiência do executor;	preparação da região que vai ser analisada, além de lixamento e polimento até que a superfície fique bem polida e isenta de riscos e um ataque com reagentes químicos.
EXTENSOMETRIA	Detecta a deformação apresentada; acompanha os níveis de tensão em um componente; Pode ser usado para medir deslocamento, força, aceleração, temperatura, vazão e pressão.	Acompanhamento do nível de tensão em ensaios de carga, evitando uma falha catastrófica; Não precisa necessariamente ser retirado de campo o equipamento a ser ensaiado;	Não detecta os defeitos em si, é associado a medição de mudanças que podem acontecer durante o processo.	Necessita compensação da variação da temperatura; Adesivos para colagem devem apresentar elevada resistência mecânica, boa aderência, facilidade de aplicação e baixa sensibilidade ao efeito da temperatura; acesso a superfície; calibragem; acabamento da superfície
ANÁLISE FÍSICO QUÍMICA	Detecta a composição de um depósito; Análise das incrustações;	Aplicação de tratamentos preventivos e corretivos na água utilizada para evitar futuros problemas	Explicação e interpretação dos resultados; Aparelhagem e execução; não demonstra defeitos internos;	Equipamentos especiais; Operador qualificado;

Tabela 2 - Continuação

ENSAIO	DETECÇÃO	VANTAGENS	LIMITAÇÕES	NECESSIDADES PARA APLICAÇÃO
EMISSÃO ACÚSTICA	Detecta descontinuidades em início de operação;	Executa análise da superfície como um todo; Em um único ensaio e possível analisar equipamentos de grandes dimensões;	O ensaio identifica e fornece uma região aproximada da descontinuidade, mas não quantifica suas dimensões e o seu local exato; É necessário utilizar ensaios complementares para determinar a descontinuidade como Ultrassom ou Partícula Magnética;	O local do ensaio não pode ter muito ruído; No momento do ensaio o equipamento não pode sofrer nenhum toque ou esbarrão;
CORRENTES PARASITAS	Pequenas trincas; descontinuidades superficiais e subsuperficiais; separação de materiais; medição de espessura; determinação de profundidade de dureza em tratamento térmico;	Pouca ou nenhuma preparação da superfície; elevada velocidade de inspeção; Aplicável a temperaturas de até 1200°C; utilizado em peças de geometria complexa;	Profundidade de inspeção limitada; dificuldade de interpretação de resultados; Treinamento rigoroso do operador;	Profissional altamente qualificado; Adequação da sonda ao tipo de ensaio; Necessidade de padrões para realização do ensaio (comparação)
TERMOGRAFIA	Padrões diferenciais de distribuição de calor; medição de temperaturas;	Inspeção pode ser feita com o equipamento em funcionamento; inspeciona muitos itens em pouco tempo;	Necessita da radiação infravermelha emitida pelos corpos;	Peça deve ser fisicamente e visualmente acessível para execução do ensaio; experiência profissional.
RADIOGRÁFICOS	Detecta descontinuidades, trincas, vazios e inclusões.	Fornecer um registro extremamente preciso e permanente; muito versátil e pode ser usado para examinar muitas formas e tamanhos; bastante sensível, permite a caracterização das descontinuidades; um método não destrutivo volumétrico.	Algumas descontinuidades podem não ser detectadas se estiverem em determinados ângulos em relação ao feixe de radiação; o custo associado a cumprimento das legislações pertinentes; necessário conhecimento dos processos pelo qual o componente passou.	Local ser acessível, experiência profissional, em caso de raios gama necessita de proteção e atendimento as normas devido a radiação.

Fonte: Adaptado de Furtado et al. 2013

## 5 CONCLUSÃO

Foi apresentada a avaliação de integridade, descrita em 3 etapas principais, sendo elas a etapa de planejamento, a etapa de inspeção e a etapa de análise de resultados. Onde a etapa de planejamento ficou evidenciada como muita importância devido principalmente aos recursos e o tempo que podem ser economizados se bem executada esta etapa.

Foi demonstrada a necessidade em se realizar uma avaliação de integridade nas caldeiras, além da NR-13 inferir a obrigação na realização foram levantados outros momentos em que se faz necessária avaliar a integridade dos componentes, além de garantir a segurança para os operadores e a instalação industrial.

Vários métodos foram desenvolvidos para se estimar a vida remanescente são eles: degradação microestrutural, relação entre dureza e resistência a fluência – medição de 3 durezas em campo, medição de espessura da camada de óxido e análise dimensional, além de mostrar pela avaliação com os profissionais que os mais utilizados estão relacionados a análise dimensional, pela medição da espessura de camada e pela degradação microestrutural verificando como a estrutura do material se encontra.

Como apresentado existem vários ensaios não destrutivos que podem ser utilizados, saber as características é fundamental na etapa de planejamento, ou seja, na hora de decidir qual ensaio utilizar e em qual componente, otimizando processo, diminuindo retrabalho e reduzindo custos nas avaliações de integridade das caldeiras. Ainda se evidenciou que os mais utilizados pelos profissionais são o exame visual, líquido penetrante, ultrassom e o ensaio hidrostático este último sendo considerado ensaio destrutivo.

## REFERÊNCIAS

ALMEIDA, Jayann Ismar Lira. **ANÁLISE NUMÉRICA DA INTEGRIDADE ESTRUTURAL DE VAOS DE PRESSÃO COM CORROSÃO USANDO A NORMA API 579**. 2012. 131 f. Tese (mestrado) - Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2012.

ALTAFINI, Carlos Roberto. **Curso de Engenharia Mecânica**. Rio Grande do Sul: Universidade de Caxias do Sul, 2002, 36p.

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.

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

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

BRAGA, R. M. **Medição da Camada de Óxidos em Tubos de Superaquecedores de Caldeiras Aquatubulares por Ultrassom**, Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRGS. Porto Alegre, 2009. Originalmente apresentado como tese de doutorado.

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

CALLISTER, Jr. W. D. **Ciência e engenharia de materiais uma introdução**. LTC. Rio de Janeiro. 7. ed. 2007.

CARDOSO, B. R.; COMELI, F. W.; SANTANA, R. M.; FURTADO, H.C. Previsão de vida em tubos de caldeiras com base na medição da espessura da camada de óxido por ultrassom. **Revista Matéria**, Rio de Janeiro, v. 16, p 819-829, 2011.

CORTIZO, Eduardo Cabaleiro. **AVALIAÇÃO DA TÉCNICA DE TERMOGRAFIA INFRAVERMELHA PARA IDENTIFICAÇÃO DE ESTRUTURAS OCULTAS E**

**DIAGNÓSTICO DE ANOMALIAS EM EDIFICAÇÕES: Ênfase em Edificações do Patrimônio Histórico**". 2007. 177 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2007.

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.

GENTIL, V. **Corrosão**. LTC. Rio de Janeiro. 6.ed. 2011.

HELLIER, Charles J. **HANDBOOK OF NONDESTRUCTIVE EVALUATION**. Mc Graw-hill, 2001. 603 p.

HIBBELER, R. C. **Resistência dos Materiais**, Pearson Prentice Hall, São Paulo, 5. Ed. 2004.

KOHLHOFER, W.; PENNY, R. K. Hardness Testing as a Means For Creep Assessment. **International Journal of Pressure Vessels and Piping**, v. 66, Elsevier. Africa do Sul, p. 333-339, 1996.

MAGALHÃES, Ricardo Rodrigues. **AVALIAÇÃO DO USO DA EXTENSOMETRIA NA ANÁLISE DE TENSÕES RESIDUAIS DE SOLDAGEM**. 2008. 128 f. Tese (Mestrado) - Curso de Engenharia Mecatrônica, Universidade Federal da Bahia, Salvador, 2008.

MARCIÓ, Bruno Silva. **AVALIAÇÃO DE ESTANQUEIDADE EM VASOS DE PRESSÃO DE PEQUENO PORTE**. 2014. 113 f. Tese (Mestrado) - Curso de Engenharia Mecânica, Centro Tecnológico, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2014.

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

MIDDLETON, C. J.; TIMMINS, R.; TOWNSEND, R. D. The Integrity of Materials in High Temperature Components; Performance and Life Assessment. **International Journal of Pressure Vessels and Piping**, v. 66, Elsevier. Africa do Sul, p. 33-57, 1996.

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.

**ORIENTAÇÕES GERAIS PARA AVALIAÇÃO DE INTEGRIDADE ESTRUTURAL E CONTINUAÇÃO DE VIDA ÚTIL DE CALDEIRAS DE RECUPERAÇÃO**, Recomendação do Comitê de Segurança em Calderias De Recuperação do Brasil, Sub-comitê de Manutenção, Inspeção e Instrumentação.

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

**REGULAMENTO TÉCNICO DO SISTEMA DE GERENCIAMENTO DA INTEGRIDADE ESTRUTURAL DAS INSTALAÇÕES TERRESTRES DE PRODUÇÃO DE PETRÓLEO E GÁS NATURAL (RTSGI)**, Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis, Anp.

SABINO, Ricardo Shayer. **INSPEÇÃO DE FEIXES TUBULARES DE TROCADORES DE CALOR**. 2008. 98 f. Tese (Mestrado) - Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2008.

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.

TIBONI, Gustavo Borges. **APLICAÇÃO DA TÉCNICA DE EMISSÃO ACÚSTICA EM ENSAIOS DE DESGASTE EROSIVO**. 2011. 124 f. Tese (Mestrado) - Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2011.

ZIMER, Alexsandro Mendes. **ESTUDODA CORROSÃO DO AÇO AO CARBONO EM MEIO DE SULFETO**. 2009. 241 f. Tese (Doutorado) - Curso de Química, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2009.