



UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE MATERIAIS

JEDAÍAS JANUÁRIO DA SILVA

**ESTUDO E APLICAÇÕES DOS ENSAIOS NÃO DESTRUTIVOS NO MEIO
INDUSTRIAL**

Recife

2021

JEDAÍAS JANUÁRIO DA SILVA

**ESTUDO E APLICAÇÕES DOS ENSAIOS NÃO DESTRUTIVOS NO MEIO
INDUSTRIAL**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Graduação em Engenharia de Materiais da Universidade Federal de Pernambuco, como requisito parcial para obtenção do grau em Engenharia de Materiais.

Orientador: Prof. Dr. Edval Gonçalves de Araújo.

Recife

2021

S586e Silva, Jedaías Januário da.
Estudo e aplicações dos ensaios não destrutivos no meio industrial /
Jedaías Januário da Silva. – 2021 .
112 folhas, fig., qds., tabs.

Orientador: Prof. Dr. Edval Gonçalves de Araújo.

TCC (Graduação) – Universidade Federal de Pernambuco. CTG.
Departamento de Engenharia Mecânica, 2020.
Inclui Referências.

1. Engenharia de materiais. 2. Ensaios não destrutivos. 3. END.
4. Aplicações. 5. Técnicas de inspeção. I. Araújo, Edval Gonçalves de
(Orientador). II. Título.

UFPE

620.11 CDD (22. ed.)

BCTG/2021- 143

JEDAÍAS JANUÁRIO DA SILVA

**ESTUDO E APLICAÇÕES DOS ENSAIOS NÃO DESTRUTIVOS NO MEIO
INDUSTRIAL**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Graduação em Engenharia de Materiais da Universidade Federal de Pernambuco, Centro de Tecnologia e Geociências, como requisito parcial para a obtenção do grau em Engenharia de Materiais.

Aprovada em: 23/04/2021.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Edval Gonçalves de Araújo (Orientador)
Universidade Federal de Pernambuco

Profa. Dra. Magda Rosângela Santos Vieira (Examinadora Interna)
Universidade Federal de Pernambuco

Profa. Dra. Dayanne Diniz de Souza (Examinadora Interna)
Universidade Federal de Pernambuco

A Deus, que tem me dado graça para suportar as adversidades encontradas ao longo da formação. Aos meus pais, Ana e Jozadaque, pelo amor, atenção, e incentivo dedicados a mim durante todos estes anos.

AGRADECIMENTOS

A Deus, que me deu graça, sabedoria e inteligência ao longo desses anos para enfrentar as todas as dificuldades durante a graduação.

Ao meu orientador Prof^o Dr.^o Edval Gonçalves de Araújo, meus sinceros agradecimentos pelos conselhos, conhecimento, oportunidades de crescimento profissional e paciência no ensino.

Agradeço a Prof^a Dr.^a Magda Rosângela Santos Vieira pelos conselhos, oportunidades, conhecimento e acolhimento transmitidos durante todo este período de graduação, tanto em laboratório, em sala e fora de sala. A esta sou e serei eternamente grato.

À Eng^a. MSc. Ivana dos Santos Araújo meus sinceros agradecimentos por todo apoio, conselhos, palavras de motivação e experiências compartilhadas durante a iniciação científica.

Aos meus pais Jozadaque e Ana, pelo apoio, força e compreensão pelas ausências em casa, e por acreditar no meu esforço, todos os dias, desde o ensino fundamental, médio, técnico, pré-vestibular e graduação.

A esta Universidade, pela estrutura oferecida para realização do curso. Ao COMPOLAB, onde comecei a trilhar o caminho da pesquisa na iniciação científica voluntária e a aprender o potencial da Engenharia de Materiais para a sociedade. Em especial agradeço aos colegas de laboratório Walter, Rafael, Isabel, Diana, Janaína, Rubens e Ivaldo, que compartilharam experiências, boas conversas e pelo apoio.

RESUMO

Os ensaios não destrutivos (END) englobam um conjunto de métodos desenvolvidos para avaliar amostras. A utilização de ensaios assegura a qualidade dos produtos, desde a matéria-prima até os produtos finais, além de promover segurança na utilização dos mesmos, como também a continuidade na utilização de equipamentos industriais. Tais ensaios são aplicados com frequência nas indústrias metalúrgica, nuclear, naval, do petróleo, automobilística, têxtil, cerâmica, de polímeros, entre outras. Os END ampliam a percepção humana, podendo inclusive ser considerados extensões dos sentidos humanos. Este trabalho traz aspectos pertinentes para que um END seja realizado, entre eles são abordadas as qualificações que um inspetor deve possuir para realizar ensaios, as condições para realização de um ensaio eficaz, as classificações das descontinuidades e suas origens na produção primária de materiais, como a fundição, descontinuidades em solda, descontinuidades oriundas de deformações plásticas, corrosão e descontinuidades induzidas por fadiga e fluência. Os ensaios não destrutivos abordados serão inspeção visual, líquidos penetrantes, partículas magnéticas, correntes parasitas, radiografia industrial, termografia e ultrassom. Associados a estes ensaios o trabalho também apresentará contexto histórico, princípios físicos, técnicas e métodos de inspeção, alguns dos principais equipamentos utilizados nas inspeções, normas que regem a maneira com a qual o ensaio deve ser realizado e classificação de descontinuidades, instruções de análise, condições operacionais e algumas inovações tecnológicas, servindo como fonte teórica para consultas no âmbito universitário e industrial.

Palavras-chave: ensaios não destrutivos; descontinuidades; aplicações; técnicas de inspeção.

ABSTRACT

Nondestructive tests (END) encompass a set of methods developed to evaluate samples. The use of tests ensures the quality of the products, from the raw material to the final products, in addition to promoting safety in their use, as well as the continuity in the use of industrial equipment. They are frequently applied in the metallurgical, nuclear, naval, oil, automotive, textile, ceramics, and polymer industries, among others. ENDs expand human perception, and can even be considered extensions of human senses. This work brings pertinent aspects for an END to be carried out, among them are addressed the qualifications that an inspector must have to carry out tests, the conditions for carrying out an effective test, the classifications of discontinuities and their origins in the primary production of materials, such as casting, welding discontinuities, discontinuities arising from plastic deformations, corrosion and discontinuities induced by fatigue and creep. The non-destructive tests covered will be visual inspection, penetrating liquids, magnetic particles, eddy currents, industrial radiography, thermography and ultrasound. Associated with these tests, the work will also present historical context, physical principles, techniques and inspection methods, some of the main equipment used in inspections, standards that govern the way in which the test should be carried out and classification of discontinuities, analysis instructions, operational conditions and some technological innovations, serving as a theoretical source for consultations at the university and industrial levels.

Keywords: nondestructive testing; discontinuity; applications; inspection techniques.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Vantagens e desvantagens dos ensaios (a) destrutivos e (b) não destrutivos.	24
Figura 2 - Imagem de elétrons retro-espalhados. Aspecto de Mn-Silicato-(Mn, Fe)S em amostra retirada após a remoção da escória.	28
Figura 3 - Radiografia de uma peça fundida apresentando porosidades.	29
Figura 4 – Descontinuidades em solda. (a) Porosidade; (b) Falta de fusão; (c) Penetração incompleta; (d) Inclusão de escória.	30
Figura 5 - Superfície de fratura de um eixo rotativo de aço que apresentou falha por fadiga. Nervuras de marcas de praia estão visíveis na fotografia.	31
Figura 6 - Equipamento boroscópio modelo Autel MaxiVideo MV400.	34
Figura 7 – Espelho utilizado durante inspeção visual.	34
Figura 8 - (a) líquido penetrante em lata aerossol. (b) à esquerda, removedor de LP, meio, LP fluorescente, à direita, revelador. (c) fonte de luz negra.	38
Figura 9 – Linha típica para aplicação de líquido penetrante fluorescente.	39
Figura 10 - Fluxograma para realização de um ensaio por líquido penetrante.	40
Figura 11 – Curva de histerese magnética X Força magnetizante.	47
Figura 12– Unidade Compacta para Inspeção por Partículas Magnéticas, série AHD.	48
Figura 13 – (a) Máquina móvel para inspeção por PM, modelo M2060; (b) Máquina portátil para inspeção por PM, modelo P1500.	48
Figura 14 – Método de magnetização circular.	49
Figura 15 - Máquina para ensaio por PM de uma peça fundida, usando a técnica multidirecional.	50
Figura 16 – Elérodos para aplicação da técnica.	50
Figura 17 – Representação da técnica.	52
Figura 18 - Yoke Eletromagnético de Corrente Alternada, modelo Y1.	52
Figura 19 - Resumo dos métodos e técnicas.	53
Figura 20 – Partículas magnéticas via úmida.	54
Figura 21 – Evolução dos filmes radiográficos.	57
Figura 22 – Raios incidentes (I0) e raios transmitidos (I) através do objeto.	58
Figura 23 - Fótons incidem sobre a superfície do material e os fotoelétrons são ejetados.	59
Figura 24 - Incidência de raios X em um elétron provoca o deslocamento de um elétron e criação de outra onda com o comprimento de onda maior que a do feixe de ondas incidente.	60

Figura 25 - Grãos de BaFX: Európio em uma placa de imagem.....	61
Figura 26- Estrutura cristalina do BaFX (X=Cl, Br, I).....	62
Figura 27 - fluxograma para obtenção das imagens via radiografia computadorizada.	63
Figura 28 - Irradiador gama específico para fontes radioativas de Selênio-75	64
Figura 29 – Posicionamento do IQI durante um ensaio.	65
Figura 30 – Comportamento da onda em uma interface.	69
Figura 31 – Interferência entre as ondas (a) uma fonte (b) duas fontes e (c) cinco fontes.....	71
Figura 32 – Representação transdutor reto.	74
Figura 33 – Utilização dos transdutores.	75
Figura 34 – (a) Representação transdutor angular e (b) transdutor angular Olympus, descontinuidade em destaque.	75
Figura 35 – (a) Representação transdutor duplo-cristal (b) Transdutor MTD705 – Olympus.	76
Figura 36 – Sonda A32 phased array para solda.	77
Figura 37 – Diagrama de blocos de um equipamento de inspeção ultrassônica via pulso eco.	79
Figura 38 – Limalha de ferro espalhada em um pedaço de cartolina forma círculos concêntricos quando uma corrente atravessa o fio central.....	84
Figura 39 – Correntes parasitas induzidas em uma amostra.	85
Figura 40 – Distorção das correntes em meio a uma descontinuidade.....	85
Figura 41 – sinais de referência de (a) um furo com 2 mm de diâmetro, (b) corte superficial e (c) um sulco superficial longitudinal.	86
Figura 42– Unidade de exibição por correntes parasitas, modelo NORTEC 600.....	89
Figura 43 – Configurações de sondas absolutas. (a) de contato e (b) com ponta dobrada.....	89
Figura 44 – Sondas diferenciais.	90
Figura 45 – Sondas arrays (a) duas fileiras de bobinas dispostas em uma superfície plana. (b) sonda cilíndrica para inspeção no interior de tubos.	90
Figura 46 – Imagem térmica de um disjuntor (a) sem equipamento e (b) com o equipamento termográfico.	93
Figura 47 – Aparelhos de termografia industrial. (a) câmera térmica pontual, TG165 (b) câmera termográfica de bolso, FLIR C2.....	95
Figura 48 – Termografia do acoplamento de motor elétrico.	97
Figura 49 – Inspeção de isolamentos.....	98
Figura 50 – Imagem termográfica do nível do líquido em tanques.....	98

LISTA DE QUADROS

Quadro 1- Cronologia da criação dos ensaios não destrutivos.....	22
Quadro 2 - Tipos de indicação segundo a norma cch-70/pt 70-2.....	42
Quadro 4 – Limitação da corrente na técnica dos eletrodos.....	51
Quadro 5 – Vantagens e limitações do ensaio por pm.	55
Quadro 6 – Vantagens e limitações do ensaio por radiografia industrial.....	67
Quadro 7 – Vantagens e limitações do ensaio por ultrassom.	82
Quadro 8 – Vantagens e limitações do ensaio por correntes de foucault.	91
Quadro 9 – Vantagens e limitações do ensaio por termografia.	98
Quadro 10 – Categorização dos ensaios de acordo com os parâmetros elencados	101

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Propriedades acústicas de alguns materiais.....	70
Tabela 2 - Valores de atenuação para o aço Cr-Ni.....	73
Tabela 3 - Profundidade padrão de penetração de metais.....	87
Tabela 4 - Parâmetros criados para avaliar os ensaios.....	100

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

A	Área da superfície plana
A, A _o	Atividade do elemento radioativo após um tempo transcorrido
B	Campo magnético
C	Velocidade da luz
CA	Corrente alternada
CC	Corrente contínua
D	Diâmetro
D _{ef}	Diâmetro efetivo do cristal
END	Ensaaios não destrutivos
f	Frequência
F _b	Força
h	Constante de Plank
I	Intensidade da radiação transmitida que atinge o detetor
I ₀	Intensidade de referência
I _o	Radiação incidente sobre a superfície do objeto
IQI	Indicador de Qualidade de Imagem
k	Condutividade térmica
L	Comprimento ou Calor latente
LP	Líquido Penetrante
m	Massa
N	Extensão
P, P _o	Pressões acústicas
PM	Partículas magnéticas
Q	Calor
t	Tempo transcorrido
V, v	velocidade
Z	Impedância acústica
α	Coefficiente de atenuação
β	Bell. Nível sonoro
δ	Profundidade de penetração
ΔT	Variação de temperatura

ε	Emissividade
λ	Constante de desintegração
μ	Coefficiente de atenuação linear
μ_r	Permeabilidade relativa
ρ	Densidade do material ou Resistividade
σ	Constante de Stefan-Boltzmann
Ω	Ângulo entre comprimentos de onda
Θ	Ângulo
Φ	Fluxo magnético

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	17
2	OBJETIVOS	19
2.1	OBJETIVOS GERAIS	19
2.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	19
3	METODOLOGIA	20
4	FUNDAMENTOS TEÓRICOS	21
4.1	O QUE É O ENSAIO NÃO DESTRUTIVO (END)?	21
4.2	PREOCUPAÇÕES ENVOLVENDO END	21
4.3	BREVE HISTÓRICO DOS ENSAIOS NÃO DESTRUTIVOS.....	21
4.4	ENSAIOS NÃO DESTRUTIVOS X ENSAIOS DESTRUTIVOS	23
4.5	CONDIÇÕES PARA UM END EFICAZ.....	25
4.6	QUALIFICAÇÕES DO PROFISSIONAL	26
4.7	DESCONTINUIDADES: ORIGENS E CLASSIFICAÇÕES.....	27
4.7.1	Produção primária dos metais	27
4.7.2	Fundição	28
4.7.3	Trincas	29
4.7.4	Descontinuidades em solda	29
4.7.5	Descontinuidades resultantes de deformações plásticas	30
4.7.6	Descontinuidades promovidas por corrosão	31
4.7.7	Descontinuidades induzidas operacionalmente – por fadiga	31
4.7.8	Descontinuidades induzidas operacionalmente – por fluência	32
4.8	ENSAIOS NÃO DESTRUTIVOS	32
4.8.1	Inspeção visual (is)	32
4.8.1.1	Equipamentos e acessórios	33
4.8.1.2	Aplicações	35
4.8.2	Líquido penetrante (LP)	35
4.8.2.1	História e desenvolvimento do líquido penetrante	35
4.8.2.2	Teorias e princípios	36
4.8.2.3	Equipamentos e materiais.....	38
4.8.2.4	Controle qualidade do ensaio	39
4.8.2.5	Procedimentos	40
4.8.2.6	Avaliação e disposição das amostras ensaiadas	40
4.8.2.7	Aplicações do líquido penetrante	43

4.8.2.8	Vantagens e limitações do ensaio por líquido penetrante	43
4.8.3	Ensaio por partículas magnéticas (PM)	44
4.8.3.1	História e desenvolvimento	44
4.8.3.2	Teoria e princípios.....	45
4.8.3.3	Equipamentos e acessórios	47
4.8.3.4	Métodos e técnicas de magnetização.....	48
4.8.3.5	Desmagnetização.....	53
4.8.3.6	Métodos de ensaio e tipos de partículas	53
4.8.3.7	Avaliação dos ensaios	54
4.8.3.8	Aplicações	55
4.8.3.9	Vantagens e limitações do ensaio por partículas magnéticas.....	55
4.8.4	Ensaio por radiografia industrial	56
4.8.4.1	Histórico e desenvolvimento	56
4.8.4.2	Teoria e princípios.....	57
4.8.4.3	Formação de imagem na radiografia computadorizada	61
4.8.4.4	Equipamentos e acessórios.....	63
4.8.4.5	Variáveis.....	64
4.8.4.6	Técnicas e procedimentos	65
4.8.4.7	Aplicações	66
4.8.4.8	Vantagens e limitações da radiografia.....	66
4.8.5	Ensaio por ultrassom.....	67
4.8.5.1	Teoria e princípios.....	68
4.8.5.2	Equipamentos	73
4.8.5.3	Técnicas de inspeção	77
4.8.5.4	Aplicações	80
4.8.5.5	Avaliação dos ensaios	80
4.8.5.6	Vantagens e limitações do ensaio por ultrassom.....	82
4.8.6	Ensaio por correntes parasitas	82
4.8.6.1	Teoria e princípios.....	83
4.8.6.2	Técnicas e equipamentos.....	88
4.8.6.3	Aplicações	91
4.8.6.4	Vantagens e limitações do ensaio por correntes parasitas.....	91
4.8.7	Termografia	92
4.8.7.1	Teoria e princípios.....	93

4.8.7.2	Equipamentos e acessórios.....	95
4.8.7.3	Técnicas de inspeção.....	96
4.8.7.4	Aplicações.....	96
4.8.7.5	Vantagens e limitações do ensaio por termografia.....	98
5	RESUMO DOS ENSAIOS ABORDADOS.....	100
6	CONCLUSÕES.....	105
7	PERSPECTIVAS FUTURAS.....	106
	REFERÊNCIAS.....	107

1 INTRODUÇÃO

Os ensaios não destrutivos (END) têm se desenvolvido bastante no mundo devido a praticidade e celeridade dos resultados, sendo utilizados com frequência na indústria como método de classificação de qualidade e confiabilidade de uso dos produtos.

Os sentidos do corpo humano podem ser considerados um dos melhores instrumentos de medição não destrutivos já criados, o olfato pode detectar a presença de uma substância perigosa no meio, a pele pode sentir o calor que irradia de uma superfície indicando se esta está muito quente ou muito fria, o tato pode também sentir as dimensões e o formato de um objeto, como também a rugosidade de uma superfície. A audição permite a avaliação de vários tipos de sons que podem ser importantes para o desempenho e qualidade de um processo. E a visão é uma das melhores ferramentas do corpo humano capaz de proporcionar alto nível de avaliação não destrutiva, utilizada no teste visual. Os ensaios não destrutivos podem ser considerados extensões dos sentidos humanos, tornando-os mais precisos quando associados a equipamentos que identificam características além da sensibilidade humana, como as condições internas de um material que será submetido a um processo de conformação.

Os ENDs compõem um conjunto de técnicas de inspeção que minimizam o risco de falha de uma estrutura e são muito presentes no cotidiano, por exemplo, uma moeda antes de chegar ao mercado passa por uma série de verificações de tamanho, peso, forma e propriedades metalúrgicas, se a moeda estiver dentro da faixa de propriedades estabelecida pelo Banco Central do Brasil estará disponível para distribuição no mercado, se uma dessas moedas estiver fora da faixa de especificação não passará através da fenda de uma máquina automática de bebidas ou de *snacks*.

Uma das grandes causas de acidentes é a corrosão, e através da realização de ensaios não destrutivos é que podem ser identificados potenciais fontes de falhas ou vazamentos e atuação de uma equipe de manutenção para sanar os problemas.

Em 1988 o Boeing 737 da empresa Aloha, com 19 anos de uso, sofreu um acidente em pleno voo, boa parte de sua fuselagem se despreendeu do avião a uma altitude de 7,31 km. Felizmente o piloto foi capaz de pousar o avião em solo salvando todos os passageiros, porém uma comissária foi ejetada do avião durante o voo, não resistindo ao impacto. A falha da fuselagem foi atribuída ao processo corrosivo que ocorreu entre duas placas da fuselagem, o produto volumoso de corrosão formado entre as placas as afastava até se romperem em pleno voo. Portanto, se a equipe de manutenção realizasse um ensaio por ultrassom ou tivesse

acesso a uma termografia, teria sido percebido a presença de corrosão e o acidente poderia ter sido evitado. (CORROSION DOCTORS).

Tubulações subterrâneas são amplamente utilizadas no mundo para transporte de fluidos como combustíveis, água e gás e é fundamental que sejam realizadas manutenções para que sejam identificados pontos de vazamento, pontos de risco biológico e até mesmo de corrosão que venham depreciar a qualidade do fluido, por exemplo os Estados Unidos mais de 500 pessoas perderam as suas vidas desde 1986 por intoxicação na água, e oleodutos com mais de 50 anos de uso tem somado um prejuízo de 300 bilhões de dólares. Como tais tubulações estão enterradas torna-se inviável desenterrar quilômetros para manutenção, como também parar o fluxo de fluido para realização das manutenções, sendo assim, foram desenvolvidos os *pigs inteligentes* que varrem toda a tubulação sem parar o fluxo de fluido. Durante a manutenção os *pigs* limpam a tubulação e aplicam ensaios por partículas magnéticas e ultrassom para identificação de vazamentos e pontos de corrosão que podem provocar acidentes ou vazamentos. (DYNAGARD).

Os ENDS são aplicados com frequência em diversas indústrias como a têxtil, automobilística, metalúrgica, nuclear, aeroespacial, naval, do petróleo, da cerâmica e de polímeros com os objetivos de avaliar a matéria-prima para processamento, os materiais intermediários durante o processamento, controle dos parâmetros de processo, inspeção de produtos acabados, avaliação de produtos e estruturas em funcionamento.

Ensaio não destrutivo faz parte do escopo de assuntos que um engenheiro de materiais deve conhecer, pois possibilita a análise de descontinuidades presentes no material decorrentes de seu uso ou da produção primária. Ao estudar o tema percebeu-se uma deficiência de literária em português, sendo este assunto abordado em diversos periódicos e livros estrangeiros. A fim de sanar lacuna literária foi realizada uma revisão bibliográfica dos principais ensaios não destrutivos utilizados na indústria como o ensaio por inspeção visual, líquidos penetrantes, partículas magnéticas, correntes parasitas, radiografia industrial, termografia e ultrassom, gerando um conhecimento teórico e técnico bastante embasado.

2 OBJETIVOS

A seguir serão apresentados os objetivos gerais e específicos deste trabalho de conclusão de curso.

2.1 OBJETIVOS GERAIS

- Proporcionar um material de consulta acessível e embasado para pessoas que ainda não tiveram contato com os ensaios não destrutivos, como também para estudantes de qualquer engenharia de que queiram se aprofundar nos principais aspectos dos ensaios não destrutivos, com ênfase para os estudantes de engenharia de materiais que necessitam de conhecimentos mais aprofundados de análise e caracterização de materiais para a prática da engenharia.
- Esta obra também visa tornar-se um material de consulta rápida para a gestão da qualidade em uma indústria, através de um quadro que compila todos os ensaios de acordo com parâmetros comuns a todos os ensaios.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- a) Fornecer, através de pesquisa bibliográfica, informações sobre o histórico dos ensaios, qualificação profissional, condições para a realização de um ensaio eficaz, tipos de descontinuidades presentes nos materiais;
- b) Apresentar as teorias e princípios, metodologias de ensaio, equipamentos existentes, aplicações, vantagens e limitações dos seguintes ensaios não destrutivos: inspeção visual, líquido penetrante, ultrassom, partículas magnéticas, correntes parasitas, radiografia industrial, termografia e emissão acústica;
- c) Publicação de um artigo em um periódico.

3 METODOLOGIA

Para o desenvolvimento deste trabalho foi realizada uma pesquisa descritiva. Foram utilizadas diversas referências encontradas em livros estrangeiros, dissertações, artigos em vários periódicos como o *NDT&E International*, *Insight*, *Journal of Nondestructive Evaluation*, foram consultadas algumas normas da *American Society of Mechanical Engineers* (ASME), da *International Organization for Standardization* (ISO) e da *American Society for Testing and Materials* (ASTM), também foram utilizados dados do meio virtual, como lojas online e sites/blogs de engenharia, cujas informações são de domínio público.

Antes de apresentar os ensaios não destrutivos, foi realizada uma contextualização do tema, de forma a preparar melhor o leitor para o assunto. Com o intuito de padronizar os capítulos que tratam dos ensaios, foi utilizada a seguinte sequência de tópicos na maioria dos ensaios: contextualização histórica, teoria e princípios, técnicas e metodologias de ensaio, aplicações e vantagens e limitações dos ensaios.

Por fim, foi criado um quadro com fundamentado em todo conteúdo abordado para fins práticos, que proporciona uma rápida verificação das principais características dos ensaios com relação a uma escala também criada pelo autor, as características analisadas neste quadro são: execução do ensaio, geometria dos corpos de prova, interpretação dos resultados, detecção das descontinuidades, automatização, tipo de material do corpo de prova, custo, riscos a saúde segurança e meio ambiente.

4 FUNDAMENTOS TEÓRICOS

Nesta seção serão apresentadas algumas fundamentações teóricas que serão necessárias para entendimento do conteúdo.

4.1 O QUE É O ENSAIO NÃO DESTRUTIVO (END)?

Ensaio não destrutivo é definido como: exame, teste ou avaliação de um objeto sem modificá-lo, com o propósito de determinar a ausência ou presença de condições ou discontinuidades que venham afetar o desempenho do objeto. Ensaio não destrutivo também são conhecidos como exame não destrutivo (*nondestructive examination - NDE*), inspeção não destrutiva (*nondestructive inspection - NDI*) ou avaliação não destrutiva (*nondestructive evaluation NDE*). Tem sido usado por décadas pelo homem para avaliação de objetos e estruturas, eles minimizam as possibilidades de catástrofes através do acompanhamento da evolução das discontinuidades. Outros fatores também podem influenciar na falha de uma estrutura como design e escolha de materiais, mesmo realizando ENDS com regularidade. (HELLIER, 2003).

4.2 PREOCUPAÇÕES ENVOLVENDO END

Todo o método de ensaio não destrutivo possui limitações, ele não garante que não ocorrerá falha ou mal funcionamento. Na maioria das vezes, uma avaliação dependerá no mínimo de dois métodos: um que apresente as condições internas de um objeto e outro as condições superficiais. (HELLIER, 2003).

O avanço tecnológico nas técnicas envolvendo END tem levantado uma falsa ideia de que não seja necessário a presença de um profissional mais capacitado, porém a associação entre equipamentos sofisticados e melhores técnicas podem apresentar resultados altamente insatisfatórios se analisados com um inspetor desqualificado.

4.3 BREVE HISTÓRICO DOS ENSAIOS NÃO DESTRUTIVOS

É impossível precisar um momento na história da humanidade que os ensaios não destrutivos começaram, porém há evidências ao longo do tempo que demonstram a utilização de alguns métodos como indicadores de qualidade para aplicação de um objeto no cotidiano. Antigamente os ferreiros utilizavam a audição para ouvir o som que as espadas faziam ao serem atritadas com um determinado objeto, a depender do som emitido a espada era classificada como boa ou não para o combate (possuía resistência para o combate), os fabricantes de sinos também utilizavam as ondas sonoras para aprovar ou não a utilização de

um sino. O Quadro 1 apresenta uma breve linha do tempo da evolução tecnológica dos ensaios não destrutivos, certamente o advento de novas descobertas, novos materiais e o aumento da capacidade de armazenar dados levará as técnicas existentes a um nível de acurácia muito mais elevado. (HELLIER, 2003)

Quadro 1 - Cronologia da criação dos ensaios não destrutivos

D.C.	Criação do ensaio visual
1800	Primeiras observações termográficas por Sir William Herschel.
1831	Primeiras observações de indução eletromagnética por Michel Faraday.
1840	Primeira imagem infravermelho produzida por John Herschel
1868	Primeira referência ao ensaio de partículas magnéticas por S.H. Saxby, ao observar o efeito de barris de armas magnetizados em uma bússola.
1879	E. Hughes utiliza correntes de Eddy para detectar diferenças de condutividade, permeabilidade magnética e temperatura.
1880 - 1920	Técnica do “óleo e revelador” (<i>oil and whiting</i>), precursor do ensaio com líquido penetrante, utilizada para eixos ferroviários e caldeiras.
1895	Descoberta dos raios-X por W.C. Roentgen.
1898	Descoberta do rádio por Marie e Pierre Curie.
1922	Radiografia industrial de metais desenvolvida por Dr. H. H. Lester.
1927 - 1928	Sistema de detecção de indução de corrente elétrica/campo magnético desenvolvido pelo Dr. Elmer Sperry e H. C. Drake para inspeção de ferrovia.
1929	Desenvolvimento de partículas magnéticas e de equipamentos por V. DeForest e F.B. Doane.
1929	Uso de transdutores de quartzo para criar vibrações ultrassônicas em materiais por S. Y. Sokolov, na Rússia.
1930	Aplicações práticas para radiografia gama usando rádio foram demonstradas por Robert F. Mehl.
1935 - 1940	Técnicas de líquido penetrante desenvolvidas por Betz, Doane e DeForest.
1935 – Anos 40	Melhorias no instrumento de Eddy por H.C. Knerr, C. Farrow, Theo

	Zushlag e Dr. F. Foerster.
1940 - 1944	Método de ensaio ultrassônico desenvolvido nos EUA por Dr. Floyd Firestone.
1946	Primeiro instrumento de medição de espessura por ultrassom criado por Branson.
1950	Utilização de emissão acústica como método de END por J.Kaiser.

Fonte: Adaptado de Hellier (2003).

Muito do desenvolvimento em END se deu durante a Segunda Guerra Mundial, porém em 1920 já se tinha conhecimento das partículas magnéticas, métodos de inspeção visual e radiografia. No início da criação das ferrovias foi desenvolvido o ensaio por líquido penetrante.

No passado ocorriam muitos acidentes devido ao dimensionamento das máquinas pelos engenheiros. No ano de 1854, no estado de *Connecticut*, ocorreu uma grande explosão de uma caldeira, que levou a morte de 21 pessoas e deixou 50 pessoas seriamente feridas, mesmo sendo construída por um produtor experiente e de boa reputação. A causa da falha da caldeira foi estudada e concluiu-se que houve um acúmulo excessivo de vapor levando a explosão catastrófica. Diante do julgamento do ocorrido foram sugeridas algumas medidas para prevenção de tais acidentes no futuro, entre elas, inspeções de seguranças deveriam ser realizadas por representantes do município ou do estado. Após 10 anos o estado de *Connecticut* aprovou uma lei de inspeção de caldeiras que instituiu a inspeção anual de cada caldeira no estado. Outro acidente envolveu o barco a vapor, *The Sultana*, com duas chaminés que estava navegando pelas águas de *Memphis* quando 3 de suas 4 caldeiras explodiram. O barco usualmente carregava 375 passageiros, mas no dia do acidente estava com a capacidade excedida e comportava 2200 passageiros, estimasse que o número de mortes tenha sido entre 1200 e 1600 pessoas, sendo um dos maiores desastres marítimos que ocorreu na história, o Titanic afundou no ano de 1912 levando a morte de 1517 vidas. (HELLIER, 2003)

O período de maior desenvolvimento dos END se deu durante e após a Segunda Guerra Mundial. A evolução dos ensaios pode ser diretamente relacionada a preocupação com a segurança, desenvolvimentos de novos materiais e aumento da confiança do produto.

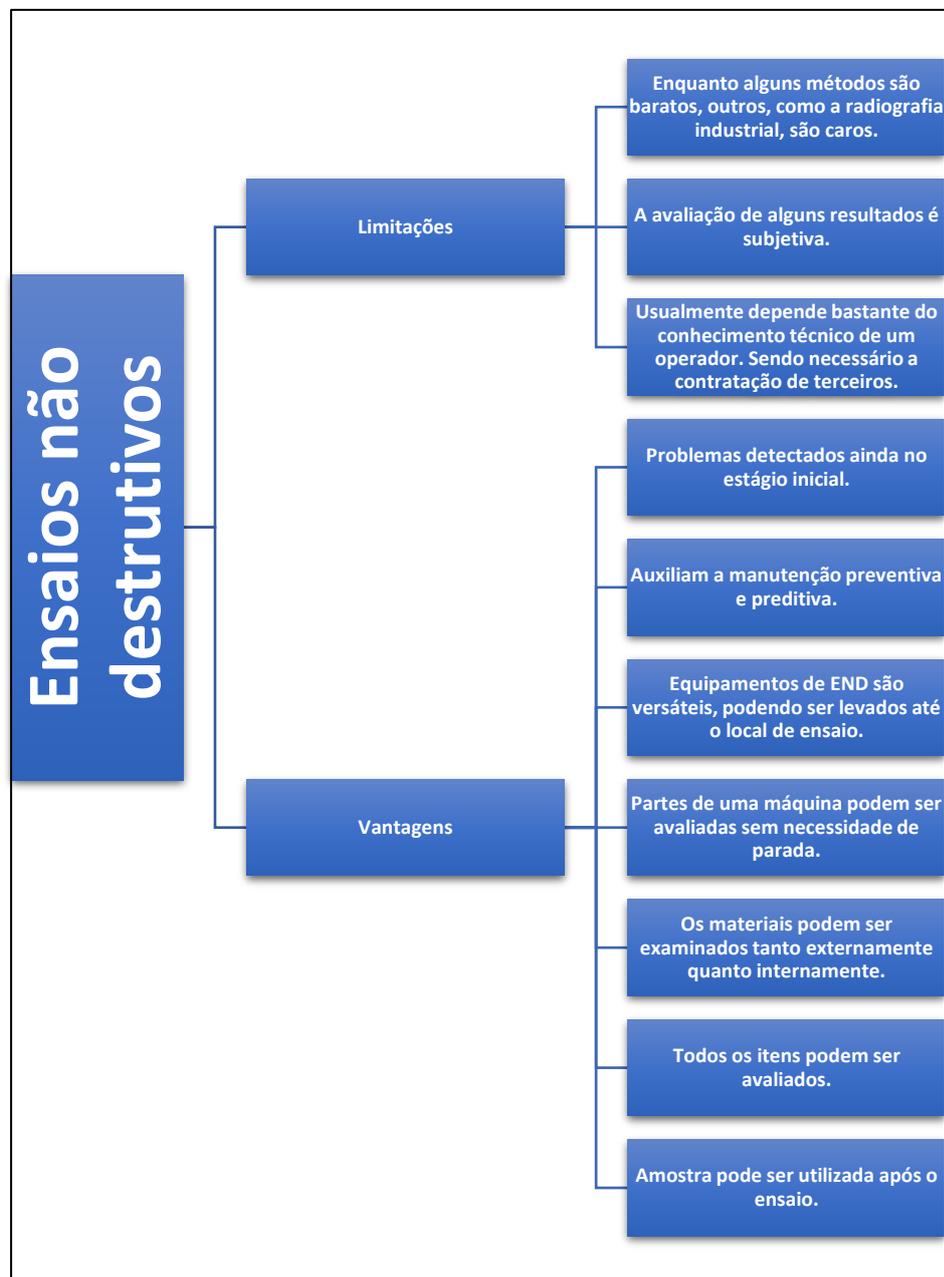
4.4 ENSAIOS NÃO DESTRUTIVOS X ENSAIOS DESTRUTIVOS

Ensaio Destrutivo (ED) são definidos como uma forma de avaliação mecânica qualitativa do material, em que características específicas deles são obtidas e avaliadas.

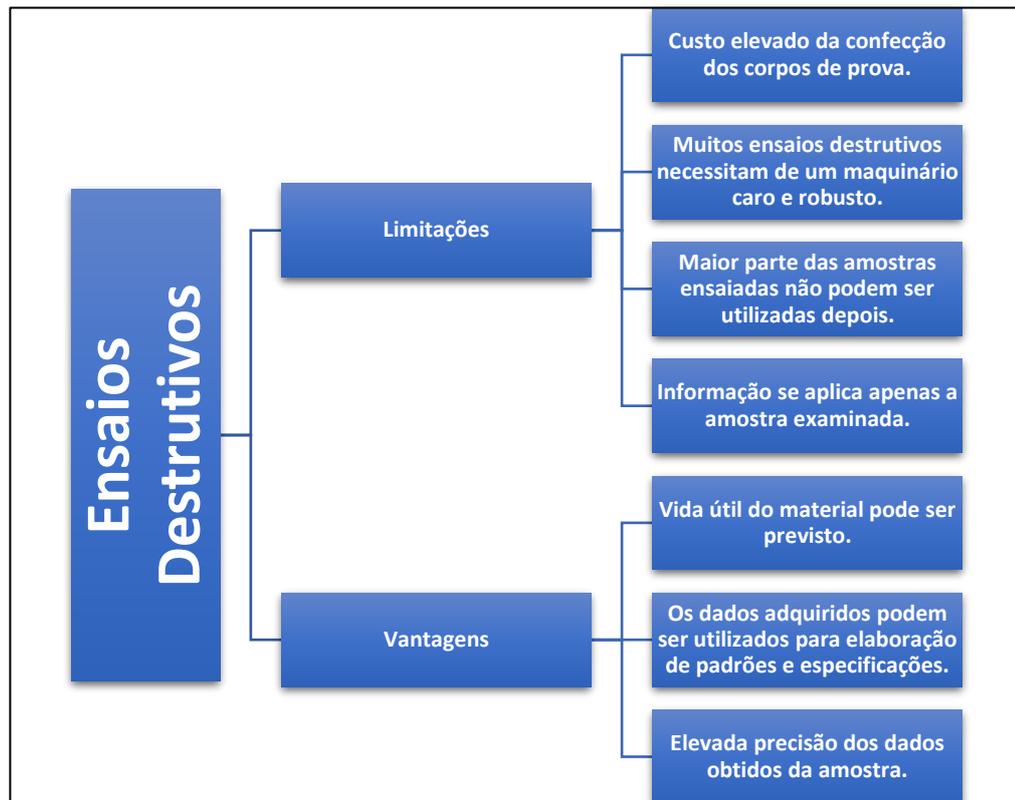
Alguns EDs são realizados sob condições que simulam a situação real de aplicação do objeto, aproximando bastante os resultados obtidos com a realidade, porém, vale ressaltar que os resultados dos EDs valem apenas para as peças ensaiadas. (HELLIER, 2003) Para validar as propriedades de objetos em uma linha de produção através de ensaios, alguns destes objetos (vergalhão, treliças, arames farpados, pregos, cadeiras de polímeros, louças sanitárias) são colhidos da produção de forma amostral. A figura 1 a seguir apresenta algumas limitações e vantagens dos Ensaio Destrutivos (ED) e Não Destrutivos (END).

Figura 1 - Vantagens e desvantagens dos ensaios (a) destrutivos e (b) não destrutivos

(a)



(b)



Fonte: Adaptado de Hellier (2003).

4.5 CONDIÇÕES PARA UM END EFICAZ

Hellier elenca algumas condições para a realização de um ensaio, é necessário ter o controle/ciência de alguns fatores:

- **O produto deve ser ensaiável.** Condições como dimensão e formato da amostra são variáveis que devem ser levadas em consideração durante a realização de um ensaio.
- **É necessário seguir os procedimentos normativos.** É importante seguir todos os procedimentos e padrões do ensaio, para garantir a detecção de discontinuidades.
- **O equipamento deve estar em condições propícias para o uso.** É fundamental que os equipamentos estejam em condições de uso, sem avaria e calibrados.
- **Documentação dos resultados do ensaio deve estar completa.** Após a realização do ensaio um relatório deve ser emitido contendo informações sobre calibração, equipamento, parte do equipamento que foi ensaiado, procedimento aplicado, identificação de discontinuidades. Um END pode ser executado corretamente, mas se as informações não forem devidamente documentadas podem gerar retrabalho.

- **Qualificação do profissional.** É importante a certificação e qualificação do profissional que atua na área de END. Qualificação concerne a realização de treinamentos e prática.

4.6 QUALIFICAÇÕES DO PROFISSIONAL

A realização de ensaios não destrutivos possui variações, a maneira com a qual os profissionais podem fazer os testes pode variar de acordo com o treinamento recebido e a experiência adquirida com o cotidiano, estas variações podem gerar um risco a qualidade do ensaio realizado. A *American Society of Nondestructive Testing* (ASNT) publicou, em 1967, a primeira edição de Práticas Recomendadas (*Recommended Practice*) para cinco métodos de ensaio. Esta primeira edição foi chamada de edição de 1968 do SNT-TC-1A, que continua sendo utilizada no mundo. (HELLIER, 2003).

O documento é uma prática americana, com objetivo de recomendar, aos fabricantes, montadoras e demais fornecedores, uma sistemática para administração dos ENDs nas instalações, plantas e unidades fabris, aplicada nos seus equipamentos em fabricação ou durante as suas instalações e montagens. (ABENDINEWS, 2017).

Os END são avaliados como processos especiais pelos sistemas da qualidade como a ISO-9001. Todos os profissionais que atuem nesse segmento devem ser treinados, qualificados e certificados em função da qualidade exigida. Entidades nacionais, como a ABENDI (Associação Brasileira de Ensaio Não Destrutivos) e internacionais como a ASME (Sociedade Norte Americana de Engenheiros Mecânicos) são capazes de validar tais exigências. (ANDREUCCI, 2003).

Para atuação na área, o profissional deve atender os requisitos presentes na norma EN ISO 9712:2012, que estabelece uma série de critérios que o candidato deve possuir para obter a certificação. A norma indica níveis de categorias de técnicos, a cada uma destas categorias são atribuídas determinadas ações. (RELACRE, 2019).

Nível 1

São técnicos, sob a supervisão dos técnicos níveis 2 e 3, autorizados a:

- Ajustar o equipamento;
- Realizar os ensaios de acordo com instruções detalhadas;
- Registrar e classificar os resultados face a critérios escritos;
- Reportar os resultados em formato pré-estabelecido.

Nível 2

Técnicos com certificação nível 2 podem ser autorizados pelo empregador a:

- Realizar ensaios não destrutivos;
- Escolher a técnica de END a aplicar no ensaio;

- Interpretar e avaliar os resultados de acordo com códigos, normas, especificações e procedimentos aplicáveis;
- Executar e supervisionar todas as tarefas de nível igual ou inferior ao Nível 2;
- Orientar pessoal de nível igual ou inferior ao Nível 2;
- Organizar e redigir relatórios de ensaio.
- Definir os limites da aplicação do método de ensaio;
- Elaborar instruções escritas, adaptadas às condições reais de trabalho, com base em códigos, normas, especificações e procedimentos;
- Preparar e adequar o equipamento ao método de ensaio;
- Realizar e supervisionar ensaios;

Nível 3

A certificação nível 3 permite ao profissional:

- Selecionar os métodos, procedimentos e instruções END a serem utilizados para um ensaio específico;
- Realizar qualquer operação END;
- Assumir inteira responsabilidade pelas instalações de ensaio ou centros de exame e seu pessoal;
- Estabelecer, rever e validar instruções e procedimentos END;
- Interpretar normas, códigos, especificações e procedimentos;
- Executar e supervisionar todas as atividades de Níveis 1 e 2;
- Avaliar e interpretar resultados em termos de códigos, normas, especificações e procedimentos;
- Estabelecer critérios de aceitação, quando não disponíveis.
- Orientar pessoal END de todos os níveis;

(RELACRE, 2019, p. 4,5)

4.7 DESCONTINUIDADES: ORIGENS E CLASSIFICAÇÕES

Algumas das propriedades importantes dos materiais sólidos dependem dos arranjos geométricos dos átomos e também das interações que existem entre os átomos ou moléculas constituintes. Os arranjos entre estes átomos podem apresentar defeitos, imperfeições, que podem ser responsáveis pela falha mecânica de um material. Estes defeitos são incorporados no material durante o processo de fabricação ou durante sua vida útil, através de esforços mecânicos, reações químicas e eletroquímicas aplicados ao mesmo em sua utilização. Nos sólidos estas falhas na estrutura atômica podem ser lacunas, impurezas, contornos de grão, discordâncias entre outros, e compreender a origem destes ajuda a entender como um material se comportará mediante certas condições.

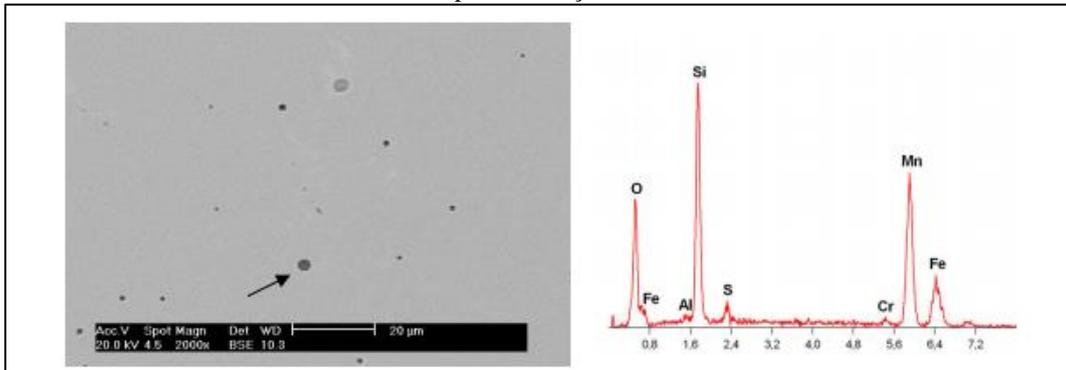
4.7.1 Produção primária dos metais

A extração de metais dos minerais através de processos industriais requer alto nível energético, também associado ao processo de formação de uma liga metálica estão as reações químicas que adicionam impurezas aos produtos. A escória, considerada uma impureza não metálica, pode ser retida nos metais durante a fabricação. (HELLIER, 2003).

Silicatos e sulfatos oriundos do minério de ferro são comumente encontrados em ligas de aço, figura 2. A presença de inclusões são aceitáveis se o tamanho total da inclusão for

relativamente pequeno e se sua distribuição for aleatória.

Figura 2 - Imagem de elétrons retro-espalhados. Aspecto de Mn-Silicato-(Mn, Fe)S em amostra retirada após a remoção da escória



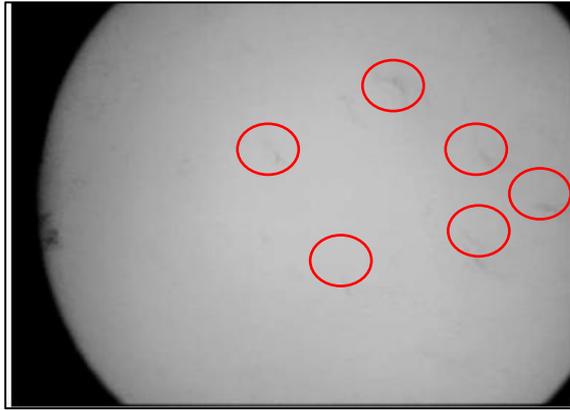
Fonte: Moraes (2009).

4.7.2 Fundição

É um processo de fabricação no qual um metal totalmente fundido (estado líquido) é derramado na cavidade de um molde que apresenta a forma desejada, com a solidificação o metal assume a forma do molde, mas sofre contração. Durante a solidificação do metal é formada a estrutura cristalina, que pode conter lacunas, porosidades, porosidade interdendríticas, escórias, microporosidades e rachaduras. O crescimento de grãos neste processo é direcional e tende a acontecer no sentido da dissipação de calor, porém quando este crescimento direcionado é severo ocorre o ingotismo (*ingotism*), este arranjo da estrutura cristalina gera dificuldades para utilização de ensaios de ultrassom. (HELLIER, 2003).

Porosidade de contração (*shrinkage porosity*) é a distribuição localizada de pequenos vazios, figura 3. É deletéria ao material pois reduz a continuidade do material e conseqüentemente promove o enfraquecimento mecânico da estrutura, quando presente em uma superfície pode reduzir a resistência à fadiga de um material. (HELLIER, 2003).

Figura 3 - Radiografia de uma peça fundida apresentando porosidades.



Fonte: Adaptado de Hellier (2003).

4.7.3 Trincas

Trincas (*crackings*) são aberturas contínuas em um material, entende-se que antes de ocorrer a trinca o material era contínuo e que alguma condição física tenha ocasionado o defeito. Podem ocorrer durante o processo de fundição. Fissuras de solidificação podem ocorrer devido ao gradiente de temperatura (que influencia as tensões internas). Outros fatores também podem ocasionar fissuras como: gases, falta de penetração em operações de solda e falta de fusão na solda. (HELLIER, 2003)

4.7.4 Descontinuidades em solda

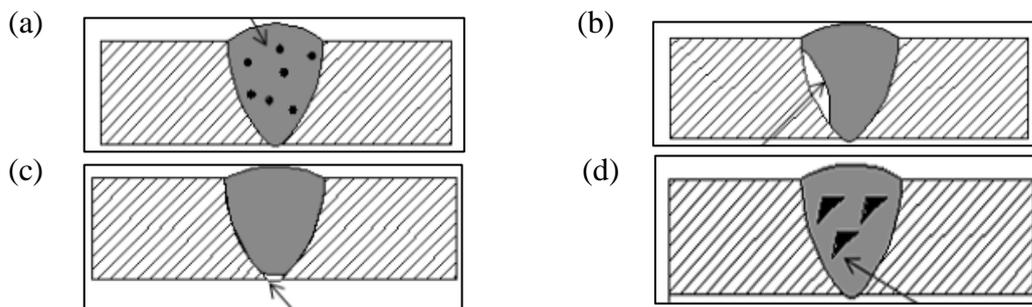
Há diversos processos de soldagem que podem gerar vários tipos de descontinuidades normalmente relacionados a fusão e solidificação, estas descontinuidades são classificadas de acordo com a norma ISO 6520, e os seus limites aceitáveis são especificados nas normas ISO 5817 e ISO 10042. Alguns destes defeitos são formação de trincas, penetração incompleta, falta de fusão, porosidade e inclusão de escória.

Há diferentes tipos de trincas, a quente, a frio ou de cratera. Trincas a quente, também conhecidas como trincas de solidificação, podem ocorrer com todos os metais, e acontece no centro da poça de fusão da solda. Trinca a frio é um dos defeitos mais comuns na soldagem, e não é aceito pela maioria dos padrões na indústria. As trincas podem aparecer na superfície, no metal de solda ou na área afetada pelo calor intenso. Ela pode ocorrer depois da solda ter sido completada e a temperatura do metal ter caído. Elas podem se formar horas ou até dias depois da soldagem. As trincas de cratera ocorrem no fim do processo de soldagem antes de o operador finalizar o passe na junta de solda. Elas normalmente se formam próximas do fim da solda, quando a poça de solda resfria e se solidifica, ela precisa ter volume suficiente para superar a contração do metal de solda, caso contrário, formará uma trinca na cratera. Podem

ser destacadas como causas: uso de hidrogênio ao soldar metais ferrosos, tensão residual causada pela contração na solidificação, contaminação do metal base, alta velocidade de soldagem e corrente baixa, ausência de pré-aquecimento antes de começar a soldagem, alto teor de enxofre e carbono no metal. (HELLIER, 2003)

A porosidade (Figura 4.a.) é decorrente da contaminação do metal através de gases retidos na solda. A falta de fusão (Figura 4.b.) ocorre quando a espessura do cordão de solda é inferior à desejada e penetração incompleta (Figura 4.c.) é um cordão de solda que não preenche corretamente o fundo do chanfro da junta soldada. Inclusões (Figura 4.d.) de escórias são geradas pelo aprisionamento de fluxo dentro da solda.

Figura 4 – Descontinuidades em solda. (a) Porosidade; (b) Falta de fusão; (c) Penetração incompleta; (d) Inclusão de escória.



Fonte: ABICOR BINZEL (2019).

4.7.5 Descontinuidades resultantes de deformações plásticas

Forjamento é um trabalho de deformação mecânica aplicada em uma peça normalmente quente, este processo é realizado a partir da aplicação de golpes sucessivos ou por compressão contínua, eles são classificados como de matriz fechada ou de matriz aberta. No forjamento de matriz fechada, uma força atua sobre duas ou mais partes de uma matriz que tem a formato desejado do produto, de tal forma que o metal é deformado dentro da cavidade entre as partes. No forjamento de matriz aberta são empregadas duas matrizes com formas geométricas simples, geralmente é aplicado para fabricação de peças grandes como, eixos de navios, ganchos, correntes ou âncoras. (CALLISTER, 2020) As forças existentes no processo de forjamento podem superar o limite de resistência do material, provocando rompimento. Este rompimento (*burst*) pode ser totalmente interno ou se estender para a superfície do material. (HELLIER, 2003).

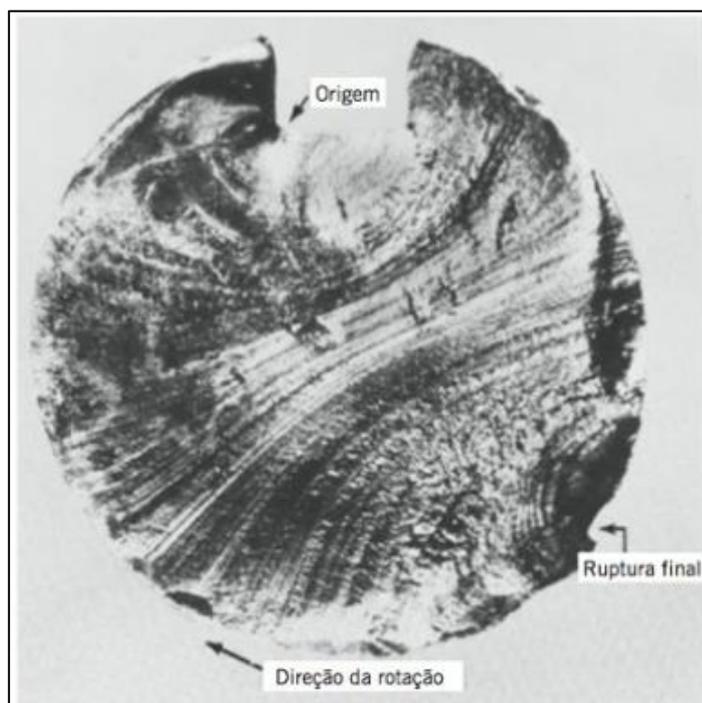
4.7.6 Descontinuidades promovidas por corrosão

Corrosão eletroquímica é um processo espontâneo, que ocorre quando um material está em contato com um eletrólito, onde acontecem, simultaneamente, reações catódicas e anódicas. É um processo que ocorre geralmente em metais, em contato com um meio corrosivo (atmosfera, solo, meio líquido). (MERCON, 2004) As descontinuidades provocadas por processos corrosivos podem ser apresentadas nas seguintes formas: corrosão uniforme, por placas, alveolar, por pite intergranular, intragranular, filiforme, por esfoliação, grafítica, denzificação, empoamento pelo hidrogênio, e em torno do cordão de solda. (GENTIL, 2011)

4.7.7 Descontinuidades induzidas operacionalmente – por fadiga

É uma falha que ocorre em estruturas sujeitas a tensões dinâmicas e variáveis, ocorre após um longo período de tempo e sob tensões cíclicas. A figura 5 mostra uma superfície fraturada por fadiga. O processo da falha por fadiga é caracterizado por 3 etapas: a iniciação da trinca em que é formado uma pequena trinca em um ponto com alta concentração de tensões, a propagação da trinca devido às tensões cíclicas e a falha final quando ocorre a ruptura do material. (CALLISTER, 2020).

Figura 5 - Superfície de fratura de um eixo rotativo de aço que apresentou falha por fadiga. Nervuras de marcas de praia estão visíveis na fotografia.



Fonte: Callister, (2020).

4.7.8 Descontinuidades induzidas operacionalmente – por fluência

Ligas metálicas operando por longos períodos de tempo a elevadas temperaturas podem apresentar descontinuidades, que levam o material a fratura. Estas descontinuidades são os vazios de fluência (*creep voids*), são pequenas e distribuídas ao longo da estrutura. (HELLIER, 2003)

4.8 ENSAIOS NÃO DESTRUTIVOS

Nas seções a seguir serão apresentados os principais ensaios não destrutivos encontrados no mercado. Os demais tópicos irão expor as características fundamentais destes ensaios, e também os respectivos princípios físicos.

4.8.1 Inspeção visual (is)

A inspeção visual a olho nu certamente é o ensaio mais antigo utilizado pela humanidade, a operação consiste na observação da superfície de um objeto a procura de irregularidades. É um método utilizado cotidianamente por todos, ao olhar para uma xícara de café para saber se está cheia, está se fazendo uma inspeção visual do conteúdo da xícara, e baseado em conhecimentos anteriores (experiências) é possível avaliar se a mesma está muito cheia ou muito vazia. O exemplo anterior também pode ser aplicado a um copo de vidro com uma fissura, a decisão de utilizar ou não o copo será tomada de acordo com as condições de integridade física do copo ou de sua aplicação. A inspeção visual é um método antigo e utilizado até hoje em indústrias imediatamente antes da entrega dos produtos nas empresas de logística e durante a própria fabricação do produto. (ENKVIST, 2002).

O instrumento mais importante no ensaio por inspeção visual certamente é o olho humano, embora algumas pesquisas apresentem soluções automatizadas (GUI, 2020) para este tipo de inspeção. Os olhos sofrem deterioração com o passar do tempo, a habilidade dos olhos de perceber cores pode reduzir e o nervo ótico pode se deteriorar por efeitos do álcool, medicamentos, alucinógenos e doenças neurológicas, acarretando em uma inspeção visual menos confiável. Os olhos são os mais importantes componentes no sistema de inspeção visual, seria impossível executar a inspeção sem eles. (HELLIER, 2003).

Outros equipamentos que aumentam a capacidade ótica do olho humano também utilizados durante a inspeção visual, como câmeras, tuboscópios, lentes de aumento ou drones, além do aumento da capacidade ocular alguns equipamentos possibilitam armazenar os dados coletados durante a inspeção para avaliações futuras, também é possível inspecionar áreas submersas, que podem apresentar riscos ao homem.

A visão humana é imperfeita e a acuidade ocular, que é a capacidade de percepção, varia de pessoa para pessoa podendo influenciar nos resultados da inspeção. Outros fatores além da visão podem afetar os resultados de um ensaio visual, como o ângulo de visão, distância, fatores psicológicos, fisiológicos e de ambiente.

Durante uma inspeção o técnico deve ser ativo e manter o foco na atividade desempenhada, isto pode causar fadiga dos músculos ao redor dos olhos, causando baixa eficiência na inspeção. O fator psicológico influencia na aquisição dos resultados pelos inspetores, pois estados emocionais podem influenciar na capacidade de visualizar discontinuidades. O ambiente para realização do ensaio deve estar com iluminação adequada, a principal tarefa para o inspetor é coletar informação, ser capaz distinguir os sinais de interesse de ruídos. (HELLIER, 2003).

4.8.1.1 Equipamentos e acessórios

Alguns dos equipamentos utilizados durante uma inspeção visual podem ser encontrados a seguir.

a) Câmeras digitais

São dispositivos que armazenam dados digitais como fotos ou vídeos em uma memória. Uma vez armazenados nas câmeras, estes dados podem ser transferidos para computadores com softwares de edição de imagem e vídeo, e posteriormente para outros locais de armazenamento como, pen drive, disco rígido, nuvem e até enviados via e-mail. A manipulação das imagens permite realçar detalhes observados durante a inspeção.

b) Boroscópio

O boroscópio é um equipamento de inspeção visual que permite examinar o interior de uma estrutura através de um pequeno orifício, o equipamento é composto por uma câmera na ponta de uma sonda, um sistema de controle e monitoramento que permite visualizar e gravar a imagem capturada pela câmera, sendo utilizada em obras de engenharia (cabeario elétrico, tubulações, detecção de vazamentos, foco de bolor e infestação de insetos) e no ambiente industrial (bloco de motor, fuselagem de aeronaves, detecção de contaminações e detritos, motores elétricos, compressores). (AUTEL, 2021) O boroscópio possibilita visualizar o interior de uma peça sem precisar desmontá-la, o que ocasiona economia de tempo e dinheiro para as indústrias. A figura 6 apresenta um boroscópio presente no mercado, a câmera na extremidade da sonda transmite a imagem através de um cabo até um monitor.

Figura 6 - Equipamento boroscópio modelo Autel MaxiVideo MV400.



Fonte: AUTEL, (2021).

c) Lupas e microscópios

Estes equipamentos formam imagens maiores que o objeto e possuem escala graduada para dimensionar as descontinuidades.

d) Espelhos

Na indústria os espelhos, figura 7, também são usados para inspeção de cantos, soldas e superfícies onde a visão humana não alcança.

Figura 7 – Espelho utilizado durante inspeção visual.



Fonte: Oliveira, (2013).

e) Drones

A inspeção visual com drone é um processo novo que vem ganhando espaço no mercado. Este tipo de equipamento permite a visualização de áreas de difícil acesso e inspeção em espaços confinados proporcionando uma maneira mais segura e econômica de

obter informações. Podem ser utilizados para inspecionar caldeiras, linhas de transmissão de energia, pontes, monumentos históricos, ferrovias, oleodutos e gasodutos *onshore* e *offshore*, painéis solares, silos, torres de telefonia móvel, além de realizar análises térmicas. Entre os benefícios já citados podem ser obtidos com o uso de drones o aumento de produtividade, imagens com alta definição da estrutura, modelos tridimensionais de uma estrutura e avaliações aprimoradas do projeto.

4.8.1.2 Aplicações

Ensaio visuais possuem um amplo espectro de aplicação (vasos de pressão, construções civis, plantas nucleares, plantas de produção de combustível fóssil, geradores, turbinas, indústria automobilística, aeroespacial, entre outras), e são aplicados desde o início até o fim de uma manufatura, para identificar sujeiras, rachaduras, arranhões, defeitos de forma e superfície. (NAKAJIMA et. al., 2019) É um ensaio que requer avanços tecnológicos para sua automação, porém há estudos promissores quanto ao desenvolvimento de placas eletrônicas que possibilitam a inspeção visual automática de setores, (LIAN, 2021), tem sido desenvolvidos robôs para a inspeção visual automática em pistas de aeroportos na China, com custo menor e maior confiabilidade do que a inspeção humana. (GUI, 2020).

Vasos de pressão armazenam substâncias líquidas, gases ou vapores, que podem ser corrosivos para o equipamento, e prejudicar sua integridade. Plantas industriais e de produção de combustível, possuem tubulações, vasos, reservatórios com alta pressão que estão suscetíveis a erosão, corrosão, surgimento de trincas que através de um ensaio visual podem ser detectados e evitar um impacto ao meio-ambiente e a integridade das pessoas que trabalham ao redor. (HELLIER, 2003).

4.8.2 Líquido penetrante (LP)

O ensaio por líquido penetrante é um dos mais utilizados no mundo, aplicável para identificação de descontinuidades superficiais de materiais não porosos. Podendo ser utilizado em materiais magnéticos e não magnéticos com diversos formatos. Atrai o interesse em sua aplicação por ser um ensaio rápido e portátil.

4.8.2.1 História e desenvolvimento do líquido penetrante

Não se sabe ao certo a data em que o primeiro teste com líquido penetrante ocorreu, acredita-se que tenha acontecido no final século XIX, sendo aplicado em inspeção de eixos ferroviários. O método utilizado no começo da utilização desta tecnologia era conhecido

como “óleo e branqueamento (*oil and whiting*)” e mesmo sendo bastante rudimentar, era capaz de revelar a presença de descontinuidades (trincas) na superfície das peças. O óleo utilizado para o ensaio na época era oriundo de motores de locomotiva, era bastante viscoso, e geralmente diluído com querosene ou álcool para penetrar nas descontinuidades. Primeiramente as peças eram embebidas com o óleo e deixadas paradas por um tempo para o líquido penetrar nas descontinuidades. Após a remoção do excesso de óleo com um solvente, a superfície era revestida com um “branqueador (*whiting*)” que consistia em um pó semelhante a giz suspenso em álcool. Após um determinado tempo o óleo que havia penetrado nas descontinuidades ressurgia na superfície, identificando a localização da descontinuidade. Este método se parece muito com o método de hoje. (HELLIER, 2003).

No início da utilização do LP não haviam normas, nem padrões que proporcionassem sua melhor utilização, gerando variação na detecção de descontinuidades nas peças. Os pioneiros Carl Betz, F. B. Doane e Taber DeForest, que trabalhavam para a Magnaflux estudaram diversos tipos de líquidos e métodos (eletrólise, anodização, gravura) que poderiam gerar os melhores resultados nos ensaios, vários destes experimentos foram descartados, com exceção do processo de anodização para detectar trincas em alumínio. Esta técnica de anodização deu origem a norma militar “Processo de anodização para inspeção de ligas e partes de alumínio”, MIL-I-8474, em setembro de 1946. Anos antes da publicação da MIL-I-8474, Robert Switzer e seu irmão Joseph trabalhavam com materiais fluorescentes. Em 1937 Switzer ensaiou um grande lote de peças utilizando líquidos fluorescentes para a Ford Motor Company, as peças eram alumínio fundido e apresentavam descontinuidades que só podiam ser vistas após terem sido usinadas. Em 1941 a patente da utilização dos líquidos penetrantes fluorescentes foi concedida a Robert Switzer, e foi amplamente utilizada em diversos produtos militares durante a guerra. (HELLIER, 2003).

4.8.2.2 Teorias e princípios

Alguns dos principais fundamentos sobre este ensaio estão listados a seguir.

a) Líquidos penetrantes

Os líquidos penetrantes são chamados assim por sua habilidade de penetrar em aberturas estreitas pelo fenômeno da capilaridade. Um LP deve ser capaz de:

- Penetrar rapidamente em aberturas delgadas.
- Conseguir permanecer em aberturas relativamente grandes.
- Quando submetidos a luz negra, calor ou luz ambiente, a cor do líquido deve manter-se.

- Não volatilizar rapidamente.
- Ser facilmente removido da superfície de aplicação.
- Não deve ter afinidade química com a embalagem, nem com o material a ser testado.
- Não deve ser facilmente inflamável.
- Não volatilizar rapidamente.
- Ser facilmente removido da superfície de aplicação.
- Quando aplicado o revelador, deve sair rapidamente das descontinuidades onde penetrou.
- Espalhar-se sobre a superfície e formar camadas finas.
- Possuir um aspecto brilhoso. A concentração de corante vermelho deve ser verificada pelo fabricante através da Lei de Beer.
- Quando submetidos a luz negra, calor ou luz ambiente, a cor do líquido deve manter-se.
- Não deve ter afinidade química com a embalagem, nem com o material a ser testado.
- Não possuir toxicidade elevada.
- Não deve ser facilmente inflamável.
- Ser barato.

Para os líquidos penetrantes apresentarem as características citadas anteriormente, eles devem possuir algumas propriedades, que são, viscosidade, inércia química, volatilidade, habilidade de dissolução, tensão superficial, molhabilidade, ponto de fulgor e toxidez. (ANDREUCCI, 2016).

b) Removedores

Os removedores devem ser capazes de remover o excesso de penetrante da superfície da amostra e evaporar rapidamente sem deixar qualquer resíduo. (HELLIER, 2003)

c) Reveladores

Reveladores são substâncias aplicadas sobre a superfície ensaiada para extrair o líquido penetrante de descontinuidades, existem 4 tipos de reveladores:

- Pós secos
- Suspensão aquosa de pós reveladores
- Suspensão aquosa

- Suspensão do pó revelador em solvente

Um bom revelador deve conter as seguintes características (ANDREUCCI, 2016):

- Absorver o penetrante das discontinuidades;
- Possuir granulação fina;
- Cobrir a superfície com uma camada fina e uniforme e promover um bom contraste com o defeito.
- Ser facilmente aplicável e removível;
- Não deve ser tóxico ao inspetor, inerte à amostra e compatível com o penetrante;
- Não ser fluorescente se aplicado com penetrantes fluorescentes;

4.8.2.3 Equipamentos e materiais

Os equipamentos e materiais (*kits*) para realização de ensaios com líquidos penetrantes são poucos e portáteis, alguns deles estão apresentados na figura 8. Os *kits* contêm líquido penetrante, removedor, solvente, revelador, pincéis, cotonetes, pulverizadores, panos, escovas de aço, luz negra (para penetrantes fluorescentes). (HELLIER, 2003).

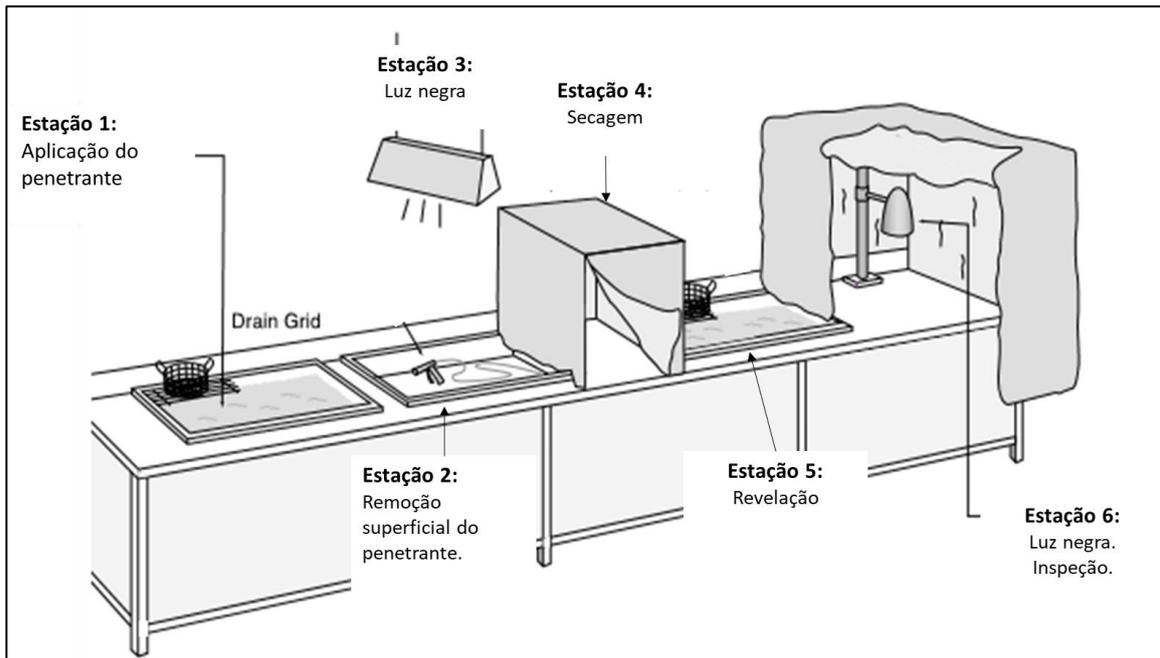
Figura 8 - (a) líquido penetrante em lata aerosol. (b) à esquerda, removedor de LP, meio, LP fluorescente, à direita, revelador. (c) fonte de luz negra.



Fonte: MECFLUX (2018)

Além dos produtos portáteis para realização de ensaios, existem também estações de ensaios para líquidos penetrantes fluorescentes, estas linhas contam com estações de aplicação do penetrante, remoção do excesso de penetrante e de visualização da discontinuidade com luz negra. (HELLIER, 2003) Uma representação de uma estação pode ser vista na figura 9.

Figura 9 – Linha típica para aplicação de líquido penetrante fluorescente.



Fonte: Hellier (2003).

4.8.2.4 Controle qualidade do ensaio

Hellier (2003), apresenta algumas variáveis de qualidade que devem ser conferidas periodicamente durante a realização do ensaio. Estas variáveis se dividem em 4 categorias: avaliação de material (novo e em uso), do sistema e do equipamento.

- Avaliação do material (novo): todos os novos produtos (LP) devem ser verificados para assegurar que estão dentro das especificações e normas. Os certificados dos produtos devem ser arquivados para referências futuras e no caso de uma auditoria.
- Avaliação do material (em uso): é uma boa prática conferir a integridade (validade do penetrante e do revelador, presença de contaminantes, quantidade de água no penetrante e concentração de emulsificantes dos materiais, para que possam atuar de maneira satisfatória.
- Avaliação do sistema: para verificação das discontinuidades encontradas podem ser utilizados painéis com algumas discontinuidades conhecidas para comparação, antes deles serem utilizados, é necessário que estes sejam muito bem limpos para que não deem respostas divergentes da realidade.
- Avaliação dos equipamentos: há conferências de rotinas que devem ser realizadas nos equipamentos como calibração, manômetros, água utilizada para remoção e intensidade da luz negra.

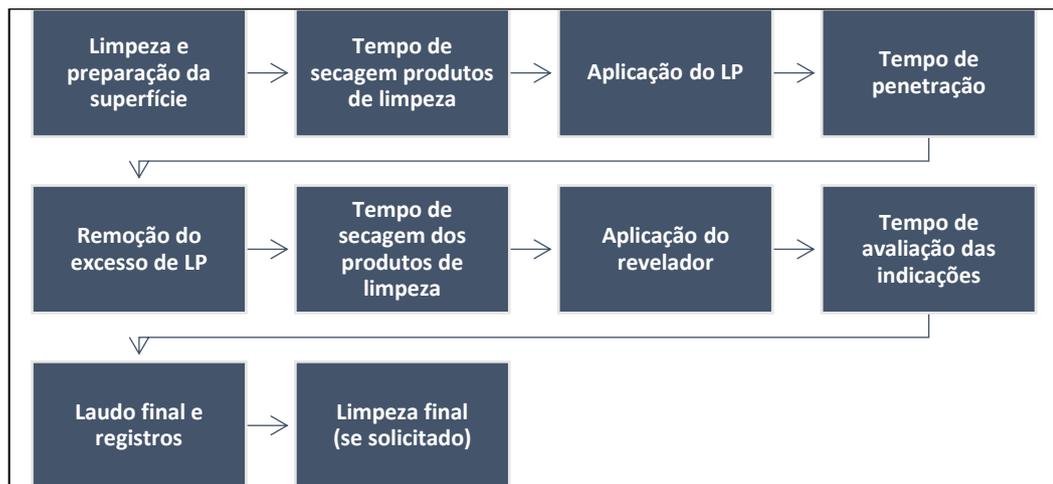
4.8.2.5 Procedimentos

É muito importante escolher a melhor técnica para o ensaio. Ao preparar o procedimento, o inspetor deve estar atento aos seguintes pontos (TELECURSO 2000):

- Compreender bem as limitações do contrato, especificação ou norma que se está trabalhando.
- Ser capaz de antecipar o tipo e tamanho de descontinuidade;
- Quais são as condições de teste da amostra (rugosidade, ambiente, oxidação, iluminação, temperatura);
- Qual a quantidade de áreas a ser examinada;
- Quais são os sistemas e equipamentos disponíveis ao inspetor;

O fluxograma do ensaio por LP está representado na figura 10.

Figura 10 - Fluxograma para realização de um ensaio por líquido penetrante.



Fonte: Adaptado de Telecurso (2000).

4.8.2.6 Avaliação e disposição das amostras ensaiadas

A inspeção de líquidos penetrantes visíveis deve ser feita sob luz branca natural ou artificial, para os líquidos fluorescentes as indicações tornam-se visíveis em ambientes escuros e sob a presença de luz negra, se apresentando na coloração amarelo esverdeado, contra um fundo de contraste entre o violeta e o azul. (TELECURSO 2000).

Após aplicação e revelação do LP basta avaliar os resultados e classificá-los como aceitáveis ou não. O tamanho e o formato da mancha formada no revelador pelo penetrante indicam o tipo/formato da descontinuidade e a profundidade, por exemplo, se a mancha

apresentar um formato linear, trata-se de uma trinca superficial, a largura desta mancha depende da profundidade da trinca, quanto maior a trinca maior será a mancha.

O critério de aceitação de descontinuidades deve seguir a norma ou especificação aplicável ao produto ou componente fabricado e inspecionado. Andreucci evidencia alguns trechos de normas da ASME, referentes a avaliação das indicações presentes no ensaio e critérios de aceitação das indicações:

Segundo a ASME SEC. VIII DIV .1 AP.8 (vasos de pressão) e a ASME SEC. I A-270 (caldeiras)

Avaliação das indicações: uma indicação é uma evidência de uma imperfeição mecânica. Somente indicações com dimensões maiores que 1/16 pol. (1,5 mm) devem ser consideradas como relevante.

- (a) Uma indicação linear é aquela tendo um comprimento maior que três vezes a largura.
- (b) Uma indicação arredondada é aquela na forma circular ou elíptica com comprimento igual ou menor que três vezes a largura.
- (c) Qualquer indicação questionável ou duvidosa, deve ser reinspecionada para determinar se indicações relevantes estão ou não presentes.

Critério de Aceitação: As superfícies ensaiadas devem estar livres de:

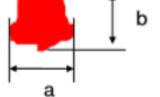
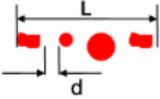
- (a) Indicações relevantes lineares;
- (b) Indicações relevantes arredondadas maiores que 3/16 pol. (5,0 mm);
- (c) Quatro ou mais indicações relevantes arredondadas em linha separadas por 1/16 pol. (1,5 mm) ou menos (de borda a borda);
- (d) Uma indicação de uma imperfeição pode ser maior que a imperfeição, entretanto, o tamanho da indicação é a base para a avaliação da aceitação.

(ANDREUCCI, 2016, p. 40)

Avaliação das Indicações

Indicações isoladas inferiores a 1,5 mm não devem ser consideradas durante a avaliação. O Quadro 2 mostra os tipos de indicações classificadas pela norma.

Quadro 2 - Tipos de indicação segundo a norma cch-70/pt 70-2

Tipo de indicação	Condição	Representação
Indicação linear	$a \geq 3b$	
Indicações arredondadas	$a \leq 3b$	
Indicações alinhada	Agregadas em L, com dimensões acima de 1,5mm arredondadas e com $d \leq 2mm$	

Fonte: Adaptado de Andreucci (2016).

Critério de Aceitação

A área inspecionada será avaliada e classificada por comparação com cinco classes de qualidade numeradas de 1 a 5, em ordem decrescente de qualidade. A área de referência para avaliação é de 1 dm² (100 cm²) na forma quadrada ou retangular com lado não superior a 250 mm.

Classe 1 de Qualidade:

1. Nenhuma indicação arredondada com dimensão $a > 3$ mm;
2. Nenhuma indicação linear;
3. Nenhuma indicação alinhada;
4. A superfície total de indicações menor ou igual a 10 mm²/dm²;

Classe 2 de Qualidade:

1. Nenhuma indicação arredondada com dimensão $a > 4$ mm;
2. Nenhuma indicação linear;
3. Nenhuma indicação alinhada;
4. A superfície total de indicações menor ou igual a 20 mm²/dm²;

Classe 3 de Qualidade:

1. Nenhuma indicação arredondada com dimensão $a > 5$ mm;
2. Nenhuma indicação linear;
3. Nenhuma indicação alinhada;
4. A superfície total de indicações menor ou igual a 50 mm²/dm²;

Classe 4 de Qualidade:

1. Nenhuma indicação arredondada com dimensão $a > 6$ mm;
2. Nenhuma indicação linear;
3. Nenhuma indicação alinhada com $L > 10$ mm;
4. A superfície total de indicações menor ou igual a 125 mm²/dm²;

Classe 5 de Qualidade:

1. Nenhuma indicação arredondada com dimensão $a > 8$ mm;
2. Nenhuma indicação linear com $a > 7$ mm;
3. Nenhuma indicação alinhada com $L > 10$ mm;
4. A superfície total de indicações menor ou igual a 250 mm²/dm²;

(ANDREUCCI, 2016, p. 42,43)

É essencial que ações corretivas sejam tomadas para tratar as discontinuidades encontradas. Na maioria dos casos a reparação das discontinuidades ocorre utilizando esmerilhamento (*grinding*), e para certificar a presença ou não da discontinuidade, aplica-se novamente o revelador, o esmerilhamento deve ser utilizado até que o revelador não mostre mais nenhum sangramento de penetrante. A este ponto, o ensaio deve ser realizado novamente

(do começo) na região, para ter certeza que não há mais nenhuma descontinuidade. As indicações do LP na amostra devem ser registradas em câmeras e anotações pessoais. (HELLIER, 2003).

4.8.2.7 Aplicações do líquido penetrante

Líquidos penetrantes podem ser utilizados para avaliar partes críticas de uma estrutura como navios, aeronaves, trens, máquinas em indústrias, sendo também utilizado como mecanismo de controle de qualidade em indústrias mecânicas pesadas, que para garantir a integridade dos produtos realizam inspeções dentro da própria instalação evitando prejuízos adicionais com logística. (FILHO, 2009) A utilização deste ensaio também é importante para identificação de trincas produzidas nos cordões de solda (ALMEIDA et. Al., 2010) (PEREIRA et. Al, 2012) e em chapas de alumínio naval (MAIA F. P. et. al., 2011). Também pode ser utilizado como ferramenta de auxílio à manutenção preditiva em equipamentos de transporte vertical na construção civil, inclusive o Comitê Permanente Regional de Pernambuco – CPR/PE tornou obrigatório a utilização do líquido penetrante de outros dois ensaios não destrutivos para prevenção de acidente. (JÚNIOR et. Al., 2010). A aplicação de líquidos penetrantes para verificação da sanidade superficial de turbinas hidroelétricas. (MENDONÇA, 2010).

4.8.2.8 Vantagens e limitações do ensaio por líquido penetrante

O Quadro 3 apresenta as principais vantagens e limitações do ensaio por líquido penetrante, importante para identificação e classificação de descontinuidades superficiais.

Quadro 3 - Vantagens e limitações do ensaio por LP

Vantagens	Limitações
Simplicidade do ensaio.	A superfície ensaiada não pode ser porosa ou absorver o penetrante.
Treinamento simples e requer pouco tempo do operador.	O ensaio pode se tornar inviável para indústrias alimentícias, hospitalar ou farmacêutica. Devido à complexidade da geometria das peças, podem não ficar completamente limpas.
Não há limitações quanto ao tamanho e geometria das peças.	Detecta apenas descontinuidades superficiais.
O ensaio pode revelar descontinuidades na ordem de 0,001 mm de largura.	Variações da temperatura influenciam o ensaio.
Tem baixo custo.	É necessário preparação da superfície, não pode ter impurezas nas descontinuidades.
Resultados de fácil interpretação.	

Fonte: HELLIER (2003) e ANDREUCCI (2012).

4.8.3 Ensaio por partículas magnéticas (PM)

Esta seção contempla pontos essenciais para a compreensão do ensaio por partículas magnéticas, como história, desenvolvimento, técnicas, princípios físicos e equipamentos.

4.8.3.1 História e desenvolvimento

Alguns dos registros mais antigos do uso das propriedades magnéticas datam do ano de 2637 a.C., o imperador chinês Huang-ti e suas tropas se perderam na planície de Tchu-lu por conta da baixa visibilidade gerada pelo nevoeiro que os rodeava. O imperador construiu uma escultura feminina de braços abertos sobre uma carruagem que girava livremente e sempre apontava para o sul, independente do curso que a carruagem tomasse. Tales registrou o primeiro fenômeno magnético na Grécia, por volta do século VI a.C., é considerado o primeiro registro não chinês, em uma rocha que apresentava comportamento magnético na região de Magnésia, denominada Magnetita. (TONIDANDEL, 2018):

Nos anos 1700 o cientista francês, Charles Coulomb, descobriu que a força magnética entre duas cargas é inversamente proporcional ao quadrado da distância entre elas, também foi o inventor do magnetoscópio e do magnetrômetro, que são dispositivos capazes de medir a

força do campo magnético da Terra. Em 1920, descobriu-se que depósitos de ferro sobre um mandril magnético formavam padrões em formato de linhas. (HELLIER, 2003).

Atualmente, há uma variedade de técnicas via partículas magnéticas utilizadas para detectar discontinuidades, são utilizados ímãs permanentes, eletroímãs com corrente alternada ou corrente contínua. São utilizados pó seco, pó em suspensão ou partículas fluorescentes para detecção das discontinuidades.

4.8.3.2 Teoria e princípios

O ensaio por partículas magnéticas é um método não destrutivo para identificar discontinuidades superficiais e subsuperficiais contidas no material. As partículas magnéticas são governadas pelas leis do magnetismo e sua aplicação está restrita a materiais que possam apresentar fluxo magnético. Os metais podem ser classificados em ferromagnéticos, paramagnéticos ou diamagnéticos. Apenas os materiais ferromagnéticos podem ser inspecionados por PM, por serem fortemente atraídos por ímãs e são facilmente magnetizáveis.

a) **Princípios do magnetismo**

- i) Polaridade – É o comportamento que um ímã ou uma haste imantada possui de se alinhar com o eixo magnético da Terra. Por convenção o lado da haste que se volta para o norte geográfico é denominado de “Polo Norte” e o outro de “Polo Sul”. (HELLIER, 2003)
- ii) Forças magnéticas – Quando dois corpos magnéticos são aproximados pode ser observado a presença de forças que irão atrair (sinais opostos) ou repelir (mesmo sinal) os corpos.
- iii) Campo magnético (B) – É uma região do espaço onde as cargas elétricas em movimento são sujeitas à ação de uma força magnética capaz de alterar sua trajetória. Seu módulo é definido pela equação 1.

$$B = \frac{F_B}{|q|v} \quad (1)$$

Onde, F_B é a força que age sobre a partícula, q é a carga da partícula e v é a velocidade da partícula no campo. (HALLIDAY, 2016)

- iv) Fluxo magnético – É uma medida do campo magnético que atravessa uma área específica, é calculado através da equação 2. (KHAN ACADEMY).

$$\Phi = B.A.\cos\theta \quad (2)$$

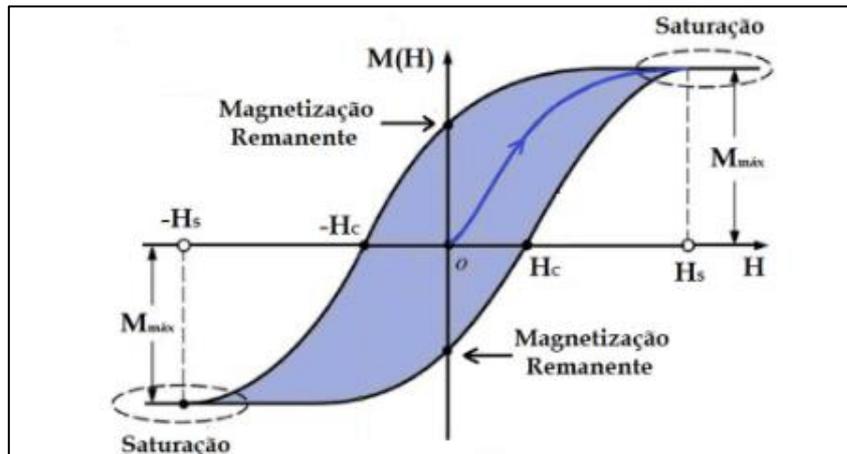
Onde, Φ é o fluxo magnético, B é o campo magnético, A é a área da superfície plana e

Θ o ângulo formado entre A e B.

- v) Permeabilidade magnética (μ) – Definida como a facilidade com que um material é magnetizado. É um número adimensional, pois é uma relação entre duas grandezas: condutividade magnética do material e a condutividade magnética do ar, ou ainda a relação entre o magnetismo adquirido pelo material devido a presença de um magnetismo externo e a força de magnetização externa. (ANDREUCCI, 2016).
- vi) Saturação - Linhas de força que fluem na mesma direção em um campo magnético se repelem e à medida que a densidade de fluxo aumenta, a repulsão entre as linhas de campo aumenta. Para um determinado material há um valor máximo para a densidade de fluxo que pode ser sustentado, este limite é denominado saturação. (HELLIER, 2003).
- vii) Histerese - Descreve como a densidade de fluxo em um material magnético varia com a força magnetizante. Ocorre em materiais ferromagnéticos e também pode ser definido como o atraso ao longo do ciclo entre a força de magnetização e a densidade do fluxo. Quando uma força magnética externa é aplicada em um material magnético, os elétrons tendem a alinhar-se e formar áreas de magnetismo espontâneo, e mesmo quando desmagnetizadas não retornam completamente a configuração inicial, apresentando um magnetismo residual conhecido como retentividade. Este magnetismo residual é anulado se for aplicado uma força coercitiva (campo externo na direção oposta) ao material.

A figura 11 apresenta o caminho descrito entre “ Φ ” densidade de fluxo (magnetismo adquirido pelo material) x H força magnetizante (força de magnetização externa) denominada curva de histerese magnética. Quando ocorre uma elevação na força magnetizante e um número máximo de domínios é atingido, mesmo que continue esse incremento não ocorrerá nenhuma variação da densidade do fluxo, pois o material encontra-se em um estado de magnetização máxima denominado ponto de saturação. (VORPAGEL, 2017).

Figura 11 – Curva de histerese magnética X Força magnetizante.



Fonte: CONCURSANDO ELÉTRICA (2019)

b) Detecção de descontinuidades

O ensaio consiste em submeter a peça ou uma região a um campo magnético, havendo a descontinuidade ocorrerá a geração de campos de fuga em função da falta de continuidade nas propriedades magnéticas da peça. As partículas ferromagnéticas são pulverizadas sobre o material, e caso ocorra uma dispersão do campo, as partículas se aglutinam na região descontínua.

É possível detectar descontinuidades superficiais e subsuperficiais de até aproximadamente 3 mm. (ZOLIN, 2011).

4.8.3.3 Equipamentos e acessórios

Há vários tipos de equipamentos disponíveis para realização do ensaio por PM, estes equipamentos estão classificados como máquinas estacionárias, equipamentos móveis e portáteis.

a) Máquinas estacionárias

São estações de processamentos de ensaios fixas que fornecem magnetização por vários tipos de correntes. A figura 12 mostra uma máquina multidirecional compacta de serviço leve/médio projetada para a inspeção de componentes ferrosos de 500 a 1200 mm de comprimento, sendo utilizada em oficinas mecânicas, ferramentarias, fundições e plantas semelhantes que exigem testes de componentes ferrosos de médio a alto volume. (MAGNAFLUX, 2019).

Figura 12– Unidade Compacta para Inspeção por Partículas Magnéticas, série AHD.

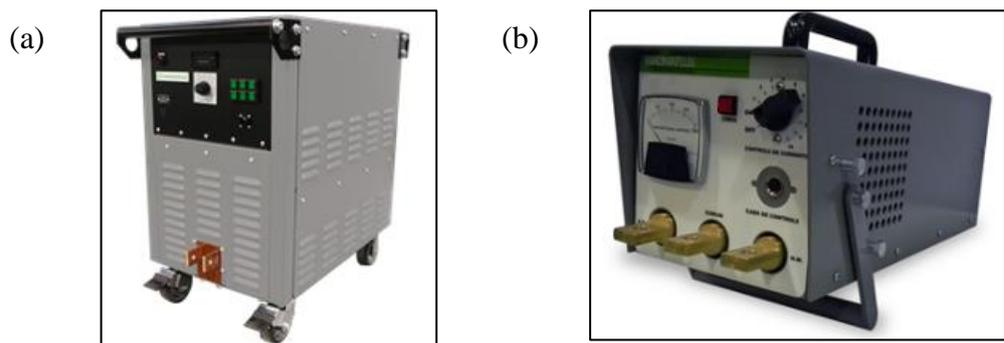


Fonte: MAGNAFLUX (2019).

b) Máquinas móveis e portáteis

A principal diferença entre unidade móvel e portátil é a capacidade de deslocamento. Usualmente uma unidade móvel, figura 13.a, é transportada de um lugar para o outro e pode pesar até 500kg. Já unidades portáteis, figura 13.b e c, geralmente podem ser transportadas por uma única pessoa e não pesam mais que 25kg. Unidades móveis podem produzir até 6000 A enquanto que unidades portáteis são limitadas a até 1500 A. (HELLIER, 2003)

Figura 13 – (a) Máquina móvel para inspeção por PM, modelo M2060; (b) Máquina portátil para inspeção por PM, modelo P1500.



Fonte: MAGNAFLUX, (2019).

4.8.3.4 Métodos e técnicas de magnetização

Segundo Andreucci (2016), os métodos de magnetização são 3: magnetização longitudinal, circular e multidirecional.

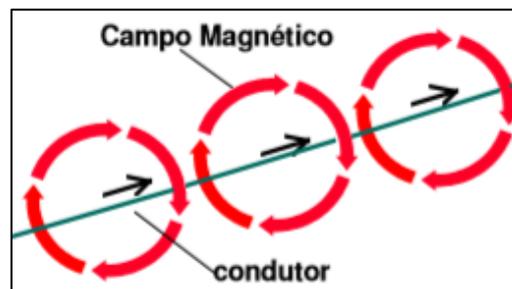
a) Método de magnetização longitudinal

É um método que produz um campo magnético longitudinal na peça e fecha o circuito através do ar, recomendado para detecção de descontinuidades transversais na peça. A magnetização é obtida através de bobinas, Yoke ou eletroímãs. (ANDREUCCI, 2016).

b) Método de magnetização circular

É um método utilizado para detecção de descontinuidades longitudinais, pode ocorrer por indução ou por passagem de corrente elétrica através da peça, as linhas de força do campo magnético circulam através da peça, figura 15. (ANDREUCCI, 2016).

Figura 14 – Método de magnetização circular.



Fonte: Andreucci, (2016).

c) Método de magnetização multidirecional

Aplica-se na peça dois ou mais campos magnéticos, longitudinal e circular, ou vários campos circulares em várias direções, figura 15. Permite observar de forma simultânea descontinuidades com diversas orientações. É recomendado o uso de corrente trifásica retificada de onda completa para magnetização neste método. Entre as vantagens desta técnica, se destacam:

- Redução do tempo de inspeção em componentes seriados;
- Redução da quantidade de partículas magnéticas no ensaio;
- Economia de tempo e de partículas magnéticas;
- Como todas as descontinuidades transversais e longitudinais são observadas simultaneamente, reduz a possibilidade de erro por parte do inspetor;
- Elevada produtividade.

Figura 15 - Máquina para ensaio por PM de uma peça fundida, usando a técnica multidirecional.



Fonte: Andreucci, (2016).

d) Técnicas de magnetização por passagem de corrente pela peça

- i) Técnica dos eletrodos - Utilizam-se eléctrodos (pontas) que quando apoiadas na superfície da peça transmitem corrente eléctrica pela peça, criando um campo magnético circular, figura 16. É usualmente aplicada em peças brutas fundidas, indústrias siderúrgicas, soldas e em caldeiras. (ANDREUCCI, 2016)

Figura 16 – Eléctrodos para aplicação da técnica.



Fonte: SERV-END, (2019).

O campo magnético gerado na peça depende da distância entre os eléctrodos e da corrente eléctrica que circula por eles, geralmente os valores de corrente aplicados estão tabelados ou normatizados. Como referência a ASME Sec.V Art.7. especifica a corrente eléctrica de acordo com o Quadro 4. Para obter a corrente aplicada durante um ensaio, descobre-se a espessura da peça para enquadrá-la em uma das duas condições e

depois multiplica-se a espessura da peça pelos valores mínimo e máximo descritos na norma.

Quadro 4 – Limitação da corrente na técnica dos eletrodos

<i>Espessura da peça</i>	<i>Corrente Elétrica aplicada por polegada de espaçamento entre os eletrodos</i>
< ¾ polegada (19 mm)	mínimo de 90 até 110 A/pol.
> ¾ polegadas	mínimo de 100 até 125 A/pol.

Fonte: Código ASME Sec. V Art. 7.

O espaçamento entre os eletrodos deve ser até 8 polegadas (203,2 mm), caso a geometria da peça não permita esta distância, espaçamentos menores podem ser aplicados, porém devem ser evitados espaçamentos inferiores a 3 polegadas (76,2 mm). É uma boa prática manter limpos os polos de contato, para minimizar as faíscas. (ANDREUCCI, 2016)

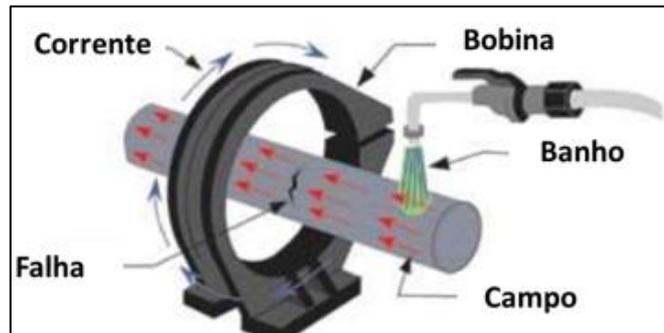
- ii) **Técnica do contato direto (magnetização por placas ou cabeçotes de contato)** - Nesta técnica a corrente elétrica passa de extremidade a extremidade da peça. É usualmente aplicada em máquinas estacionárias. Nesta técnica podem ser utilizadas corrente elétrica contínua ou alternada, e segundo a ASME o ensaio deve ocorrer entre as faixas de 300 a 800 A/polegada (diâmetro externo para peças redondas). Para geometrias não redondas a corrente elétrica é determinada pelo maior diâmetro da peça na seção perpendicular ao fluxo da corrente elétrica. (ANDREUCCI, 2016).

e) Técnicas de magnetização por indução de campo magnético

- i) *Técnica da bobina* - A peça é posicionada no interior de uma bobina, o fluxo magnético resultante do conjunto de espiras circula no centro da bobina, figura 17. No enrolamento de fios podem passar corrente contínua ou alternada. Segundo a ASME Sec.V Art 7, a intensidade do campo pode ser calculada através da equação 3, para peças onde o comprimento (L) da peça deve ser até 18 polegadas e o seu diâmetro (D) maior ou igual a 4 polegadas.

$$\text{Ampère-volta} = 35000 / (L/D) + 2 (+ 10\%) \quad (3)$$

Figura 17 – Representação da técnica.



Fonte: COPERTEC (2018).

- ii) Técnica do Yoke - É uma técnica de magnetização através da indução de um campo magnético longitudinal gerado por um eletroímã em contato com a peça, chamado de Yoke (Figura 18). Como a corrente elétrica passa pela bobina do Yoke não há aquecimento da região de contato com a peça. A cada 6 meses devem ser realizadas verificações nos Yokes, os que operam em corrente alternada devem conseguir levantar um peso morto de 4,5 kg com espaçamento de 50 a 150 mm entre os polos, e os Yokes de corrente contínua, devem levantar um peso mínimo de 13,5 kg, com espaçamento de 50 a 100mm entre os polos. (COPERTEC, 2018).

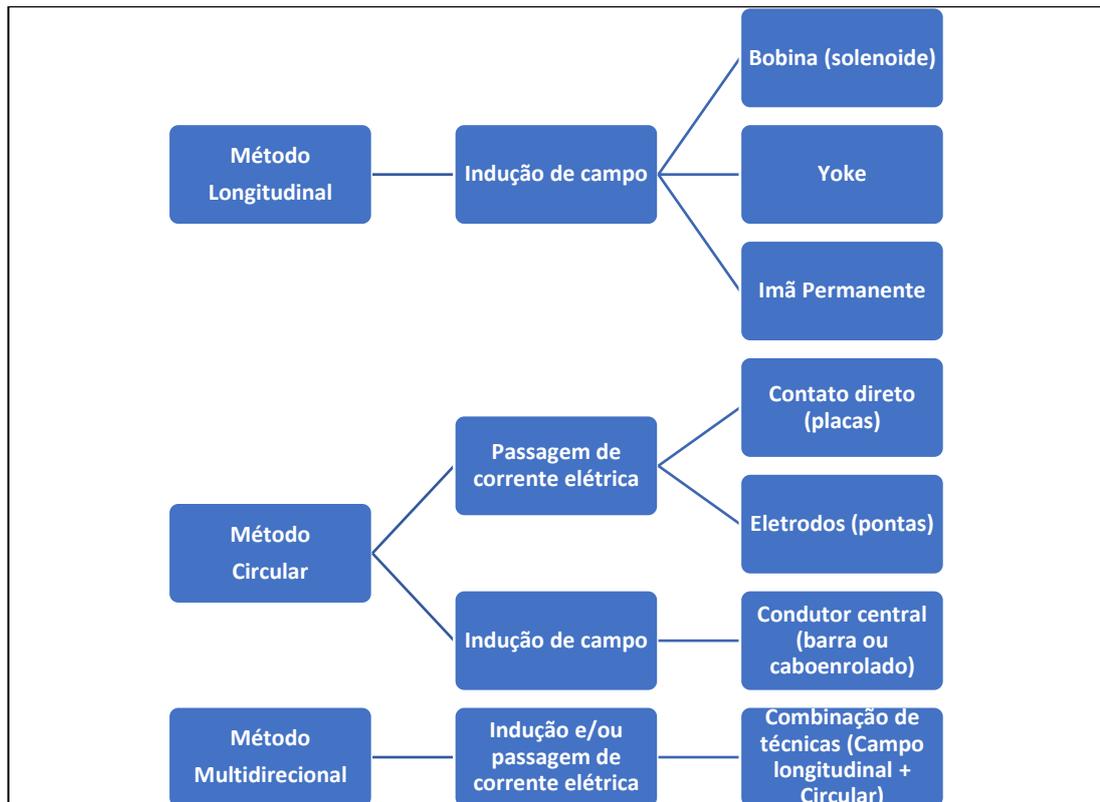
Figura 18 -Yoke Eletromagnético de Corrente Alternada, modelo Y1.



Fonte: MAGNAFLUX (2019).

- iii) *Técnica do condutor central* – Há a passagem de um fio condutor ou um feixe de cabos condutores pelo centro da peça a ser ensaiada (engrenagem, tubulação, porcas, anéis, flanges). A corrente elétrica induzirá um campo magnético circular na parte interna e externa da peça. Se a peça possuir um diâmetro grande, o fio condutor pode ser deslocado do centro para mais perto da superfície interna da peça. (COPERTEC, 2018) Em resumo os métodos e técnicas de magnetização estão classificados na figura 19.

Figura 19 - Resumo dos métodos e técnicas.



Fonte: Adaptado de Andreucci (2016).

4.8.3.5 Desmagnetização

A desmagnetização do elemento ensaiado pode ser necessária antes, durante e depois da inspeção, pois o magnetismo residual presente no corpo pode interferir nos processos de usinagem, soldagem e interferência com instrumentos de medição. A desmagnetização ocorre invertendo a força de magnetização até que atinja o valor zero ou elevando a temperatura da peça até a temperatura de Curie. (HELLIER, 2003).

4.8.3.6 Métodos de ensaio e tipos de partículas

Partículas magnéticas podem ser encontradas na forma de pó, pasta ou dispersas em líquido. É denominado de via ou veículo o meio no qual a partícula está sendo aplicada.

a) Via seca

O meio pelo qual as partículas via seca são usadas é o ar, através de aplicadores de pós manuais ou bombas aspersoras que pulverizam as partículas, podendo ser reutilizadas se a superfície ensaiada estiver livre de contaminantes. Estas partículas devem ser armazenadas em ambientes secos e ventilados para não se aglomerarem. Quando utilizada corrente alternada neste meio as partículas perdem muita mobilidade. (HELLIER, 2003).

b) Via úmida

As partículas se encontram dispersas num líquido que pode ser água, querosene ou óleo leve, figura 20. Vale ressaltar que neste método de ensaio as partículas possuem maior mobilidade, em relação a via seca, e podem percorrer distâncias maiores enquanto se acomodam ou até serem retidas pelo campo de fuga. (ANCREUCCI, 2016).

Figura 20 – Partículas magnéticas via úmida.



Fonte: Ensaio por partículas magnéticas (2016).

Para garantir a homogeneização da suspensão as partículas devem ser vertidas aos poucos durante a preparação, pois as partículas são muito finas e não dispersam facilmente. A norma ASTM E-709 estabelece a forma de verificação da concentração das PMs no banho, através da utilização de um tubo decantado, retira-se da suspensão pronta 100 ml, e após 30 minutos (tempo utilizado quando o meio for água), observa-se a quantidade decantada na escala graduada na base do tubo, caso esteja dentro da faixa estabelecida pela norma, a suspensão está aprovada para uso. Para partículas visíveis esta faixa deve estar entre 1 e 2,4 ml/100 ml e para partículas fluorescentes de 0,1 a 0,4 ml/ 100 ml.

4.8.3.7 Avaliação dos ensaios

A avaliação dos resultados é a etapa mais crítica da inspeção dos ensaios e depende bastante da acuidade visual do inspetor e de sua qualificação. Quando presentes as indicações devem ser classificadas como falsas, não relevantes ou relevantes.

As indicações falsas podem ser produzidas por manuseio incorreto do equipamento, por correntes de magnetização excessivas, sujidades e corrosão. Indicações não relevantes são oriundas de um vazamento de fluxo magnético, ou mudança de permeabilidade magnética na peça devido a mudança na geometria da peça. As indicações relevantes são produzidas por

vazamento de fluxo devido as descontinuidades do elemento ensaiado, e são classificadas como relevantes de acordo com uma norma ou padrão. (HELLIER, 2003).

Usualmente as descontinuidades superficiais apresentam indicações bastante características, com dimensão e forma próximas, semelhantes as descontinuidades. Descontinuidades subsuperficiais apresentam indicações menos definidas, proporcionais a profundidade da descontinuidade.

4.8.3.8 Aplicações

O método de teste de partículas magnéticas é eficaz para a detecção de descontinuidades superficiais e subsuperficiais. Pode ser usado como uma ferramenta de inspeção em todas as etapas na fabricação e uso final de um produto. Podendo ser aplicado em lingotes, arames, produtos fundidos, inspeção de cordões de solda (também soldas submersas), discos, produtos cilíndricos, laminados, engrenagens; em vários setores industriais como petroquímico, aeroespacial, nuclear, automotivo, transporte, naval e militar. (HELLIER, 2003).

Pode ser citado como exemplo de aplicação automotiva e de transporte a detecção de defeitos alongados, via partícula magnética, que juntos somaram mais de 35 cm comprimento em um virabrequim de caminhão (LU, 2019).

4.8.3.9 Vantagens e limitações do ensaio por partículas magnéticas

O quadro 5 mostra as principais vantagens e desvantagens do ensaio por partículas magnéticas, importantes para detecção de descontinuidades superficiais e subsuperficiais.

Quadro 5 – Vantagens e limitações do ensaio por PM

Vantagens	Limitações
Resultados são instantâneos, as indicações vão surgir em 1 ou 2s da aplicação das partículas.	Só é eficaz para inspeção de materiais ferromagnéticos.
As indicações podem ser fotografadas para análises futuras.	Detecta descontinuidades próximas a superfície.
PM pode ser aplicado utilizando imãs permanentes ou Yokes carregados.	A técnica pode danificar o elemento ensaiado devido ao aquecimento da parte ou surgimento do arco elétrico.

Indicações são fáceis de interpretar	É necessário a remover a pintura ou revestimento para realização do ensaio, para facilitar o contato elétrico, para técnicas de magnetização direta.
Praticamente qualquer tipo ou forma de componente pode ser inspecionado.	Uniformidade no campo magnético pode ser um problema devido a geometria da peça.
Os testes podem ocorrer em todas as etapas de processamento do produto.	Indicações não relevantes podem tornar o processo de interpretação difícil.
A preparação da superfície é menos crítica em relação ao ensaio com LP.	As discontinuidades só serão detectadas quando interromperem o fluxo magnético. É necessário inspecionar em mais de um sentido para garantir a existência da discontinuidade.
Pode ser automatizado para certas linhas de produção.	Pode ser necessário desmagnetizar o elemento antes, durante e depois das inspeções.

Fonte: (HELIER, 2003) e (NUNES ET AL, 2018)

4.8.4 Ensaio por radiografia industrial

A seguir serão apresentados pontos relevantes sobre o ensaio por radiografia industrial.

4.8.4.1 Histórico e desenvolvimento

A descoberta dos raios-X em 1895 na Alemanha pelo cientista alemão Wilhelm Conrad Röntgen, ganhou grande destaque na comunidade acadêmica da época pela viabilização de visualização interna de corpos opacos.

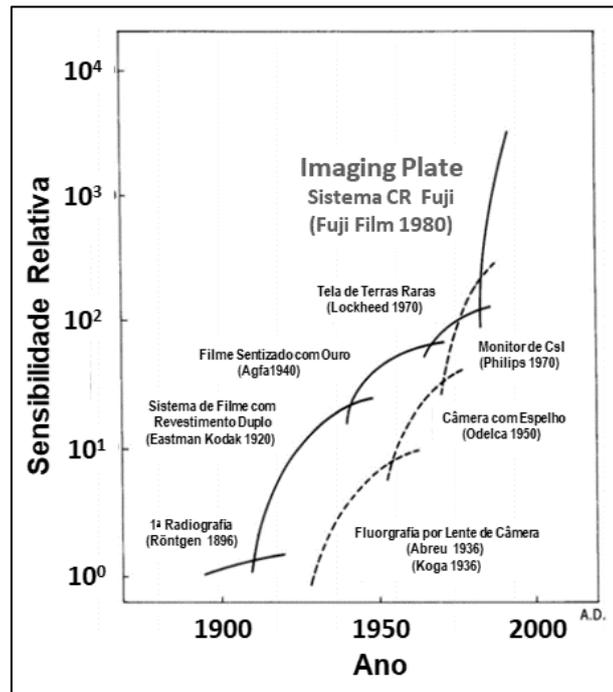
Em 1895, Röntgen descreveu as suas descobertas e experiências de seu trabalho com Raios X em um artigo que foram, invisibilidade, capacidade de não ser desviados por campos magnéticos, de atravessar corpos opacos à luz e de provocar fluorescência em certos materiais, se propagam em linha reta, a redução da intensidade é proporcional ao quadrado da distância entre a fonte e a tela, a radiopacidade dos materiais é proporcional a sua densidade e espessura.

No ano de 1896 a primeira imagem radiográfica foi feita em público, durante uma palestra Röntgen radiografou a mão do anatomista Albert von Kölliker. Em 1901 o pesquisador ganhou o prêmio Nobel de Física. (PORTAL EDUCAÇÃO, 2016).

Desde então, a tecnologia tem sido aperfeiçoada tanto para aplicação médica como aplicação industrial, filmes de raios-X também se desenvolveram para obtenção de melhor

qualidade nas imagens, mais segurança, e maior velocidade na aquisição da radiografia, como mostra a figura 21. Dentre essas tecnologias, destaca-se a radiografia computadorizada, aplicada na indústria aeroespacial (BAVENDIEK, 2006), para inspeção de soldas, para isoladores poliméricos (GODOI et al., 2016), no setor elétrico, e áreas afins.

Figura 21 – Evolução dos filmes radiográficos.



Fonte: TAKANO, 1987.

Percebe-se no gráfico apresentado na figura 35 um aumento abrupto da sensibilidade relativa na radiografia, cerca de 100 a 5000 vezes em relação ao filme originalmente utilizado na obtenção de primeiras imagens em 1896 por Röntgen. A sensibilidade de um filme determina a quantidade de exposição que ele deve receber para produzir uma imagem. O detector de Imaging Plate para radiografia computadorizada ganhou destaque nos anos 80, devido ao desenvolvimento da placa de imagem com fósforo foto estimulável da *Fuji Photo Film Co.*, além de aplicações médicas tem se buscado também aplicações em ensaios não destrutivos. Com o passar dos anos, outras tecnologias foram se desenvolvendo como a radiografia industrial, que possui maior sensibilidade relativa que o *Imaging Plate*.

4.8.4.2 Teoria e princípios

Esta seção abordará os princípios e teorias deste ensaio.

a) Geração de raios-X

Os raios-X são produzidos em uma ampola de vidro, denominada tubo de Coolidge, que possui um ânodo e um cátodo, quando elétrons em alta velocidade se chocam contra um alvo metálico. Um filamento, usualmente de tungstênio, é aquecido a elevadas temperaturas através da passagem de uma corrente elétrica, por efeito termo iônico os elétrons se desprendem do filamento e são direcionados por uma diferença de potencial elétrico a um alvo. Os raios-X são produzidos quando os elétrons colidem com o alvo através de dois mecanismos: radiação característica e freagem. (HELLIER, 2003).

b) Raios gama

As duas fontes de raios gama mais utilizadas são de irídio 192, Selênio 75 e Cobalto 60. As fontes emitem radiação constantemente e é necessária uma blindagem para proteção das pessoas que estão entorno da fonte. Os Isótopos radioativos decaem com o tempo, este decaimento resulta na redução da atividade do isótopo, a atividade de uma fonte radioativa é caracterizada pelo número de desintegrações que ocorrem num determinado tempo, podendo ser expressada pela equação 4. (ANDREUCCI, 2017).

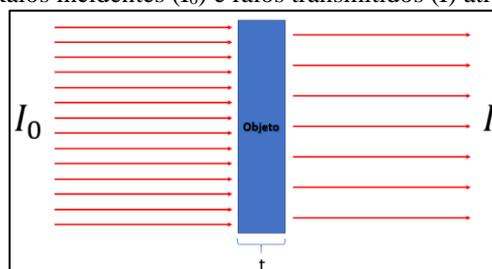
$$A = A_0 \cdot e^{-\lambda t} \quad (4)$$

Onde, A é a atividade do elemento radioativo após um tempo transcorrido, A_0 a atividade inicial, λ a constante de desintegração e t o tempo transcorrido.

c) Radiação direta

Quando um feixe de radiação atinge um objeto, parte é absorvido, e outra parte atravessa o material, conforme mostrado na figura 22.

Figura 22 – Raios incidentes (I_0) e raios transmitidos (I) através do objeto.



Fonte: O Autor (2020).

E a lei que define a relação entre o número de fótons emitidos e a fração dos fótons transmitidos através do material, atingindo o detector na outra face do material, é a de Beer-Lambert, descrita na equação 5 adiante.

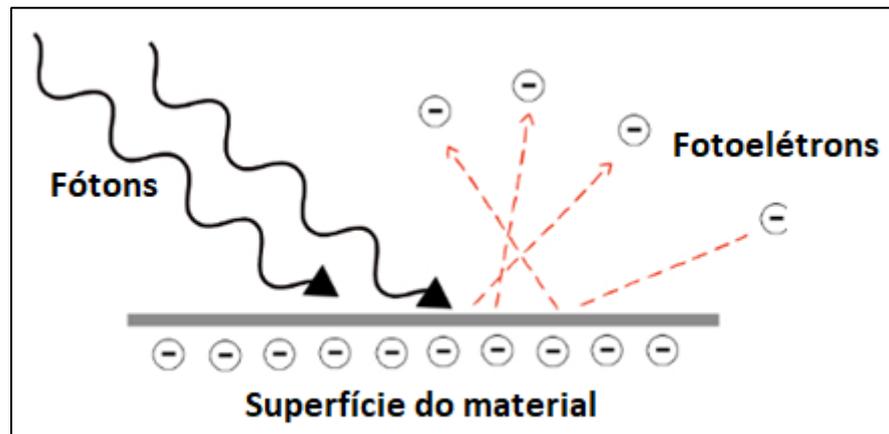
$$I = I_0 e^{-\mu t} \quad (5)$$

Onde, I é a intensidade da radiação transmitida que atinge o detector, I_0 é a radiação incidente sobre a superfície do objeto, μ é o coeficiente de atenuação linear e t espessura do objeto. O coeficiente de atenuação linear depende de três fatores que são densidade do material, número atômico e o comprimento e onda da radiação incidente.

d) Radiação espalhada

- i) Efeito fotoelétrico - A energia do fóton incidente é absorvida para um elétron que é ejetado do átomo (fotoelétron) quando a energia do fóton é maior que a energia de ligação. O esquema da figura 23 apresenta o efeito. (BRASIL ESCOLA).

Figura 23 - Fótons incidem sobre a superfície do material e os fotoelétrons são ejetados.



Fonte: Brasil Escola.

Sabe-se que há um grande número de elétrons livres em um metal, entretanto estes elétrons não estão livres para deixar a superfície do metal, eles ainda são atraídos pelo metal. Para o elétron sair da superfície metálica uma energia igual ou superior a função trabalho (ϕ), deve ser cedida ao elétron para que este venha ser ejetado. Após receber a energia, o elétron ejetado é chamado de fotoelétron e ainda está sujeito a outras colisões em outros átomos no caminho até a saída do material. (VERMA).

De acordo com a teoria quântica proposta por *Plank*, a energia dos fótons é calculada através das seguintes equações 6 e 7:

$$E = hf = \frac{hc}{\lambda} \quad (6)$$

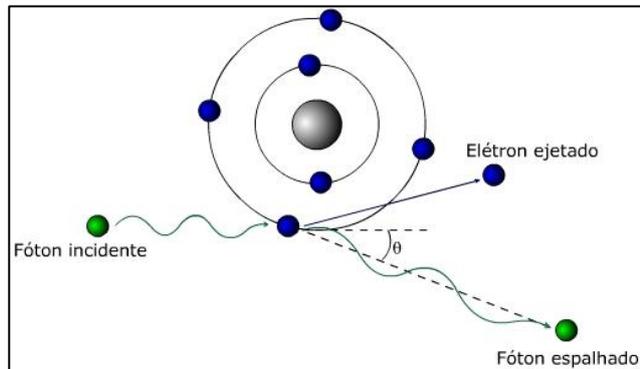
$$E (keV) = 12,4\lambda/(\text{\AA}) \quad (7)$$

Onde, h é a constante de Planck, f é a frequência da radiação, C é a velocidade da luz e λ é o comprimento de onda da radiação eletromagnética. (HELERBROCK, 2020).

- ii) Espalhamento Compton - O experimento do cientista Arthur Compton consistiu em incidir um feixe de raios X de comprimento de onda $\lambda = 71,1 \text{ pm}$ em um alvo de carbono, ele mediu os comprimentos de onda e as intensidades dos raios-X espalhados em diversas direções pelo alvo de Carbono.

Embora existisse apenas um comprimento de onda incidente sobre o alvo de carbono, os raios-X espalhados continham vários comprimentos de onda com dois picos de intensidade. Um dos picos correspondia ao comprimento de onda do feixe incidente (λ), e outro a um comprimento de onda (λ') maior que λ . A variação entre os comprimentos de onda ($\Delta\lambda = \lambda' - \lambda$) relacionada a dois pontos específicos da onda, corresponde ao deslocamento Compton, que depende do ângulo no qual os raios X foram espalhados. (HALLIDAY, 2016) A figura 38, a seguir, apresenta o modelo do espalhamento estudado por Compton.

Figura 24 - Incidência de raios X em um elétron provoca o deslocamento de um elétron e criação de outra onda com o comprimento de onda maior que a do feixe de ondas incidente.



Fonte: Efeito fotoelétrico e Compton, 2017.

- iii) Espalhamento Rayleigh - É uma interação elástica entre um fóton e um átomo, que ocorre para níveis de energia abaixo de 200 keV. Após a colisão, o fóton muda de trajetória sem alterar sua energia. A alteração da trajetória do fóton é definida pela equação 9 a seguir.

$$\frac{d\sigma_t}{d\Omega} = \left(\frac{q^2}{m_e c^2}\right) \frac{1 + \cos^2 \theta}{2} \quad (9)$$

Onde, σ_t é a seção transversal, Ω é o ângulo entre os comprimentos de onda e q é a carga por partícula. (KELLER, 2015).

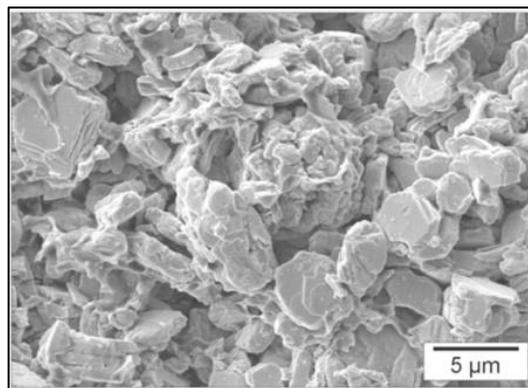
- iv) Criação de pares - A criação de pares ocorre quando um elétron e um pósitron são criados pela aniquilação de um fóton. É uma interação que pode ocorrer quando a energia do fóton for maior que 1,02 MeV, mas acontecem de forma mais significativa para energias em torno de 10 MeV. (KELLER, 2015).

4.8.4.3 Formação de imagem na radiografia computadorizada

Com a introdução de sistemas de imagem de luminescência foto estimulável, em combinação com os contínuos avanços na área da computação, a radiografia computadorizada foi apresentada inicialmente pela Fuji em 1981. No começo dos anos 90, demandas na indústria médica levaram a mais desenvolvimentos nos sistemas de aquisição de imagem com um filme refinado de fósforo, figura 25. A indústria médica se interessou por este campo de estudo por duas razões, o desejo do transporte eletrônico de imagens digitais e maior capacidade de diagnóstico com uma única exposição do paciente.

Apenas no final dos anos 90 que a radiografia computadorizada apresentou melhores qualidades de imagens, despertando o interesse dos radiologistas industriais e passaram a utilizar a tecnologia para detectar determinadas características com boa confiabilidade. (TAKANO, 1897).

Figura 25 - Grãos de BaFX: Európio em uma placa de imagem.



Fonte: Carestream Health.

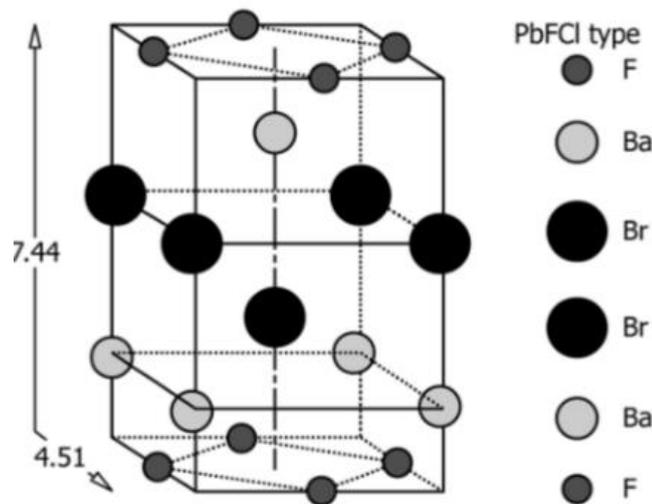
a) **Imaging Plate (IP)**

O *Imaging Plate* é um sensor que capta raios-x de uma fonte radioativa e armazena informações para formação da imagem, utilizada na radiografia computadorizada. Esta placa de imagem é formada por um filme de fósforo foto estimulável sobre uma película de poliéster, o filme de fósforo armazena a energia dos raios-X e emite luz de maneira

proporcional ao valor armazenado, quando irradiado com luz visível. Quando um feixe de fótons de raios X atravessa um corpo de prova e atinge o *Imaging Plate*, ocorre uma alteração química dos cristais fotossensíveis da placa. O conjunto de cristais quimicamente alterados formam uma imagem invisível aos olhos, chamada de imagem latente. Quando o filme for estimulado com radiação ultravioleta irá emitir uma resposta capaz de ser convertida em imagem visível, por um sistema radiográfico. (MIYAHARA, 1987).

A foto luminescência estimulada é um fenômeno ótico de uma substância que emite luz ao receber energia externa. Um cristal de fluohalogeneto de bário (BaFX: Eu^{2+} , X = Cl, Br, I) contendo uma pequena quantidade de Európio bivalente (Eu^{2+}) foi adotado como um fósforo foto estimulável, figura 26. O cristal fica colorido quando um centro F é formado sob emissão de raios-X ou de radiação ultravioleta por um longo tempo. Os centros F também são responsáveis pela captura de elétrons do Eu^{2+} , presentes na camada de condução, pois são sítios vagos na estrutura. (TANTENO, 1987).

Figura 26- Estrutura cristalina do BaFX (X=Cl, Br, I).

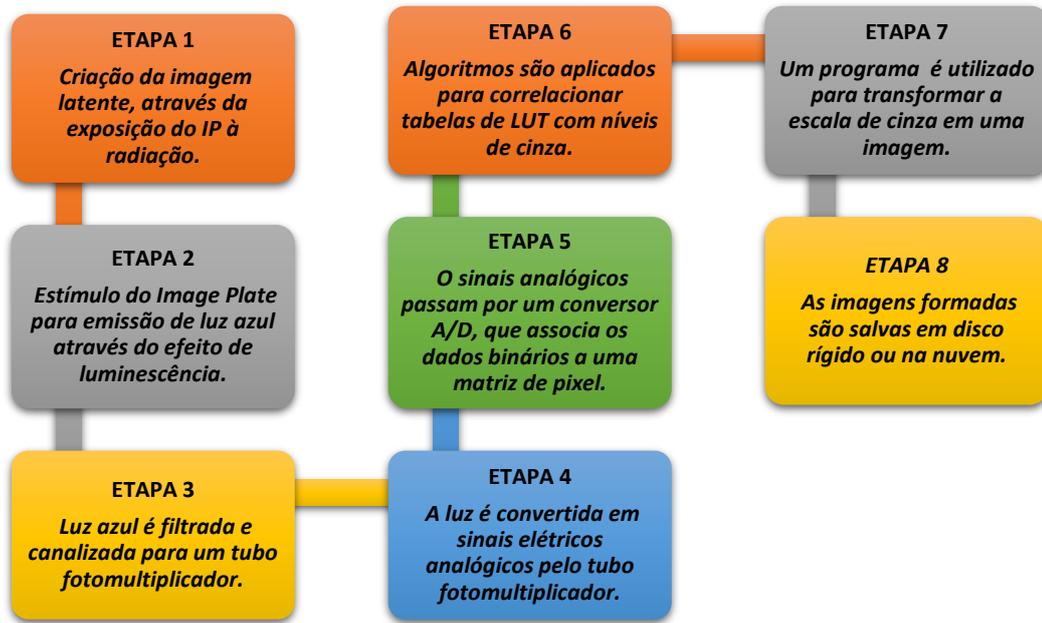


Fonte: Fuji film NDT Systems (2016).

b) Aquisição de imagens na radiografia computadorizada

O processo é chamado de radiografia computadorizada devido a extrema dependência de processos computacionais complexos para obtenção de uma imagem radiográfica capaz de exibir detalhes importantes para a avaliação do inspetor. A figura 27 apresenta um fluxograma resumido das etapas descritas no guia ASTM: *Standard Guide for Computed Radiography (E2007 – 10)*.

Figura 27 - fluxograma para obtenção das imagens via radiografia computadorizada.



Fonte: Adaptado de Standard guide for computed radiography (2016).

Após a exposição à radiação, o passo seguinte é o processo de digitalização no aparelho de escaneamento, a imagem deve aparecer na tela do computador interligado ao scanner, nesta tela o software permite a modificação da imagem quanto ao brilho, contraste, resolução, tamanho, ruído e outros parâmetros que proporcionem melhor interpretação da imagem para um diagnóstico preciso.

4.8.4.4 Equipamentos e acessórios

Os principais equipamentos e acessórios nos ensaios por raios-X estão elencados a seguir.

a) Equipamentos de Raios-X

O equipamento de raios X é composto pela unidade geradora e a mesa de comando ligadas entre si através de cabos de energia. A distância entre a mesa de comando e a unidade geradora deve ser suficiente para manter o operador protegido durante o procedimento. Estes cabos de energia (ligação) possuem cerca de 20 a 30 metros de comprimento a depender da potência máxima do tubo gerador. Deve ser feito aquecimento lento do tubo de raios-X no início da operação, para tal, o operador deve usar blindagens de proteção na saída da radiação. (ANDREUCCI, 2017).

b) Equipamentos de raios gama

As fontes usadas emitem radiação constante e necessitam de uma proteção contra as radiações emitidas, para a realização da radiografia é necessário que a fonte seja exposta por

um período. Sendo assim, é preciso ter um equipamento que seja composto por uma blindagem contra a radiação e que permita a realização da radiografia denominada de irradiador.

Os irradiadores possuem três componentes fundamentais, blindagem, fonte radioativa e um dispositivo para expor a fonte. Ver figura 28. (ANDREUCCI, 2017).

Figura 28 - Irradiador gama específico para fontes radioativas de Selênio-75



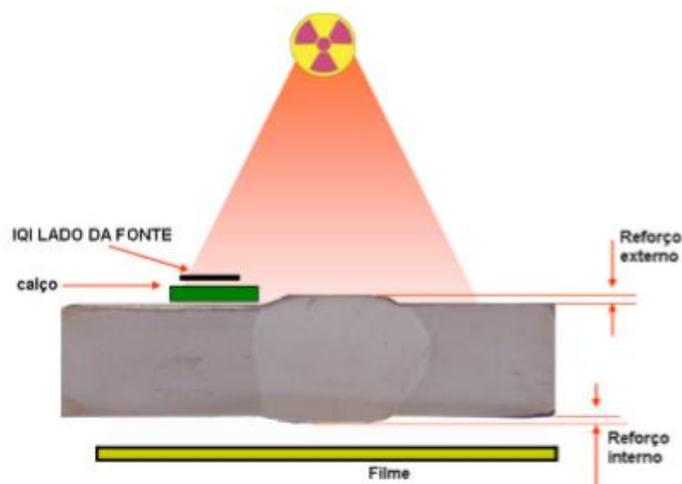
Fonte: Andreucci, (2017).

4.8.4.5 Variáveis

Entre as variáveis presentes em um ensaio não destrutivo por radiografia industrial estão, energia, tempo de exposição, tipo de material e densidade, espessura do material, tipo do filme, detectores utilizados, processamento de imagem, distância da fonte ao objeto e do objeto ao detector. Para maximização da qualidade de imagem estes parâmetros devem ser controlados corretamente, orienta-se a utilização de padrões. Infelizmente, muitos profissionais optam pela técnica de “tentativa e erro”, expõem o objeto várias vezes a radiação para escolher a melhor imagem. (HELLIER, 2003).

O objetivo do radiógrafo é sempre alcançar uma imagem radiográfica com elevado nível de qualidade. A qualidade da imagem obtida é estabelecida através de uma comparação com um Indicador de Qualidade de Imagem (IQI) ou Penetrâmetro. O IQI é uma peça pequena construída com um material radiograficamente similar ao material da peça ensaiada, que contém algumas variações de forma bem definida (entalhes, furos ou arames). (HELLIER, 2003) As normas ASTM E-1025 e a ASME Sec. V SE-1025 adotam IQIs com 3 furos de diâmetros 4T, 2T e 1T, onde T corresponde a espessura do IQI. O IQI deve ser posicionado no corpo de prova que será radiografado, conforme figura 29.

Figura 29 – Posicionamento do IQI durante um ensaio.



Fonte: Andreucci, (2017).

A norma ASTM E-747 adota o IQI do tipo fios, que é um conjunto de 5 fios com diâmetros diferentes (do menor para o maior diâmetro), o indicador deve ser colocado sobre a área de interesse e a sua seleção deve ser feita com base na espessura a ser radiografada.

4.8.4.6 Técnicas e procedimentos

Para garantir um resultado adequado e atuação mais eficaz por parte do colaborador, é necessário o conhecimento de técnicas e procedimentos.

a) Técnicas de exposição

A técnica mais eficiente utilizada em radiografia é a técnica de parede simples que consiste na passagem de radiação em apenas uma espessura do material, a radiação atravessa a parede do material e ao lado oposto ao da superfície de incidência está o filme radiográfico para formar imagem. (HELLIER, 2003) A segunda técnica e mais comum é denominada técnica da parede dupla, a radiação atravessa duas espessuras da peça, porém apenas a parede que estiver mais próxima ao filme é avaliada. (ANDREUCCI, 2017) A terceira técnica radiográfica requer que a radiação atravesse duas espessuras do material e que estas duas espessuras sejam avaliadas no filme. (HELLIER, 2003).

b) Procedimentos

Hellier apresenta um procedimento típico para uma radiografia, especialmente se esta estiver sendo executada pela primeira vez:

- i. Compreender os códigos, normas, padrões e requisitos do cliente.

- ii. Desenvolver a técnica baseada na espessura e no tipo de material.
- iii. Preparar um esboço de filmagem.
- iv. Preparar adequadamente os filmes radiográficos.
- v. Posicionar o filme abaixo da área de interesse.
- vi. Assegurar que a fonte está posicionada na distância correta em relação ao filme.
- vii. Utilizar uma forma de identificação do filme para facilitar a avaliação.
- viii. Configurar os parâmetros de exposição.
- ix. Expor o filme a radiação.
- x. Processar a imagem do filme.
- xi. Avaliar artefatos presentes no filme.
- xii. Realizar um relatório.
- xiii. Armazenar filme.

4.8.4.7 Aplicações

Boa parte das aplicações da radiografia industrial está relacionada a inspeção de soldas e a produtos fundidos, mas a radiografia também atua na indústria aeroespacial, em materiais não metálicos, como polímeros, borrachas ou cerâmicas.

A radiografia pode ser aplicada no setor elétrico para detecção de defeitos em isoladores poliméricos de linhas de transmissão de 500kV, que possuem bastões de compósito de GFRP que podem romper devido a falhas. (SHINOHARA et. al, 2017) Também é aplicado na indústria naval, com a análise de imagens radiográficas é possível determinar a integridade de cordões de solda (LUNDGREN, 2010). A associação de programas de edição de imagens associados a radiografia industrial permite o realce das descontinuidades, através de algoritmos que facilitam a detecção e análise da descontinuidade por parte do inspetor. (YAHAGHI et. al., 2020) (MIRZAPOUR, 2020) A radiografia pode ser utilizada para detecção de descontinuidades em fundidos. (BEJAXHIN, 2019).

4.8.4.8 Vantagens e limitações da radiografia

Entre as vantagens e desvantagens do ensaio por radiografia industrial, podem ser destacadas algumas presentes no Quadro 6.

Quadro 6 – Vantagens e limitações do ensaio por radiografia industrial

Vantagens	Limitações
Promove resultados precisos e permanentes.	Precauções no uso dos dispositivos radioativos.
Muito versátil. Permite examinar vários formatos de peças.	Possui limitações de espessura, baseado na densidade do material e na energia usada no ensaio.
Possui alta resolução.	Pode demandar muito tempo e espaço.
Permite caracterização da descontinuidade.	Equipamentos e acessórios são caros.
Mundialmente utilizada e com resultados comprovados.	Depende da orientação da descontinuidade.
É um método volumétrico.	O aprendizado das técnicas de radiografia requer bastante tempo e experiência.

Fonte: (HELLIER, 2003)

4.8.5 Ensaio por ultrassom

O ensaio por ultrassom é um método não destrutivo que consiste em na introdução de feixes de ondas sonoras em materiais para detecção de falhas superficiais e subsuperficiais. As ondas sonoras percorrem o material e são refletidas nas interfaces. O feixe de ondas refletido é exibido em um equipamento, depois analisado para definir a localização e presença das descontinuidades. Este ensaio é realizado com ondas sonoras com frequências que variam entre 0,1 a 25MHz, acima da capacidade auditiva humana, que é cerca de 20 Hz a 20kHz. É um dos métodos de ensaios não destrutivos mais utilizados, sendo aplicados para medição de espessura, tamanho de grão, determinar propriedades físicas e estrutura. (NUNES et al, 2018).

A maioria dos instrumentos de inspeção por ultrassom detecta falhas monitorando um ou mais dos seguintes elementos:

- Reflexão do som a partir das interfaces;
- Tempo de trânsito de uma onda sonora através da amostra desde a saída do transdutor até a sua entrada.
- Atenuação das ondas sonoras por absorção e dispersão dentro do corpo de prova.
- Características na resposta espectral para um sinal transmitido ou refletido.

4.8.5.1 Teoria e princípios

Para o entendimento do ensaio por ultrassom é necessário compreender alguns elementos e princípios físicos.

a) Ondas ultrassônicas

O ultrassom é uma onda mecânica porque precisa do meio sólido, líquido ou gasoso para se propagar, esta onda possui frequências elevadas, e é regida pelas leis de Newton. (HALLIDAY, 2016).

b) Tipos de ondas

As ondas longitudinais, também conhecidas como ondas de compressão, se propagam através do material como uma série de compressões e trações sucessivas. À medida que a onda atravessa o material as partículas se deslocam para frente e para trás transmitindo a onda. Por exemplo, um tubo cheio de ar possui um êmbolo em uma de suas extremidades, uma pessoa movimentando o êmbolo para frente e para trás gerando oscilações em cada elemento de ar. Como as oscilações são paralelas à direção de propagação da onda, classifica-se as ondas como sendo longitudinais.

As ondas transversais (ou de cisalhamento) são geradas quando um elemento do material se desloca perpendicularmente a direção de propagação da onda. Por exemplo, um pulso gerado em uma corda esticada e presa em uma das extremidades. Uma pessoa excita a corda com um pulso vertical, cada elemento da corda propagará a onda em um sentido até atingir a extremidade, a onda se propaga para frente (horizontal) enquanto que cada elemento de onda se desloca para cima (vertical). (HALLIDAY, 2016).

São denominadas ondas superficiais aquelas que tem a propriedade de propagar-se na superfície. Devido ao complexo movimento de oscilação das partículas presentes na superfície, a velocidade de propagação da onda superficial entre duas fases diferentes é de até 10% inferior que a de uma onda transversal. A onda que não possui a sua componente normal e que se propaga em movimento paralelo a superfície e transversal em relação a direção de propagação é chamada de ondas de “Love”. São aplicadas na avaliação de finas camadas, revestimentos. (ANDREUCCI, 2016).

Ondas de Lamb se propagam paralelamente a superfície da amostra e tem um movimento elíptico. São geradas quando o comprimento de onda é próximo da espessura da amostra, podem surgir em placas, tubos e arames. (HELLIER, 2003).

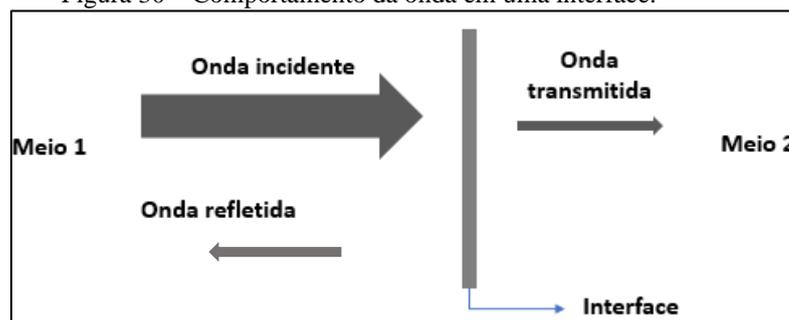
c) Propriedades das ondas sonoras

- i) Comprimento de onda (λ) - é a distância, paralela à direção de propagação da onda, entre repetições da forma da onda.
- ii) Frequência - é definida como o inverso do tempo que um elemento da onda leva para realizar uma oscilação completa.
- iii) Velocidade - Cada metal possui uma velocidade de propagação do som característica devido a densidade e elasticidade do material. A velocidade de propagação (v) é definida como sendo a distância percorrida (λ) pela onda por unidade de tempo (T) e pode ser calculada com a equação 10.

$$v = \lambda/T \quad (10)$$

- iv) Reflexão - A fronteira entre um meio e outro é chamada de interface, parte do som é transmitido e outra parte é refletido. Por exemplo, na interface aço/ar quase toda energia é refletida de volta para o aço, praticamente nenhuma onda é transmitida para o ar, na interface aço/água cerca de 88% da energia é refletida e 12% das ondas são transmitidas para a água. Portanto, esta proporção de transmissão e reflexão depende das propriedades dos materiais em cada lado da interface. A figura 30 representa a transmissão de uma onda incidente sobre uma interface qualquer, nota-se que parte do feixe de ondas incidente é transmitido, e parte é refletido. (NUNES, R. M. et al, 2018)

Figura 30 – Comportamento da onda em uma interface.



Fonte: Adaptado de Andreucci (2016).

Cada material possui um fator para calcular a reflexividade em uma interface, chamado de impedância acústica (Z), que é calculada pela equação 11.

$$Z = \rho \cdot V \quad (11)$$

Onde Z é a impedância acústica, ρ é a densidade do material e V a velocidade da onda no material.

Para calcular a porcentagem da energia refletida utiliza-se a equação 12.

$$Energia\ refletida = \left(\frac{Z_1 - Z_2}{Z_1 + Z_2} \right)^2 \cdot 100\% \quad (12)$$

Onde, Z_1 e Z_2 são a impedância acústica dos materiais de cada lado da interface. A tabela 1 apresenta propriedades acústicas de alguns metais e não metais.

Tabela 1 – Propriedades acústicas de alguns materiais

Material	Densidade (ρ) [g/cm ³]	Velocidade do som 10 ⁵ [cm/s]			Impedância acústica (Z_1) [g/cm ² .s]
		Velocidade longitudinal	Velocidade transversal	Velocidade superficial	
Aço carbono	7,85	5,94	3,24	3,00	4,66
Aço inoxidável 304L	7,9	5,66	3,12	3,12	4,47
Alumínio 1100	2,71	6,35	3,10	2,90	1,72
Chumbo (puro)	11,34	2,16	0,70	0,64	2,45
Liga de magnésio (M1A)	1,76	5,74	3,13	2,87	1,01
Inconel	8,5	5,82	3,02	2,79	4,95
Titânio	4,5	6,16	3,12	2,79	2,75

Fonte: Adaptado de Nunes et al (2018).

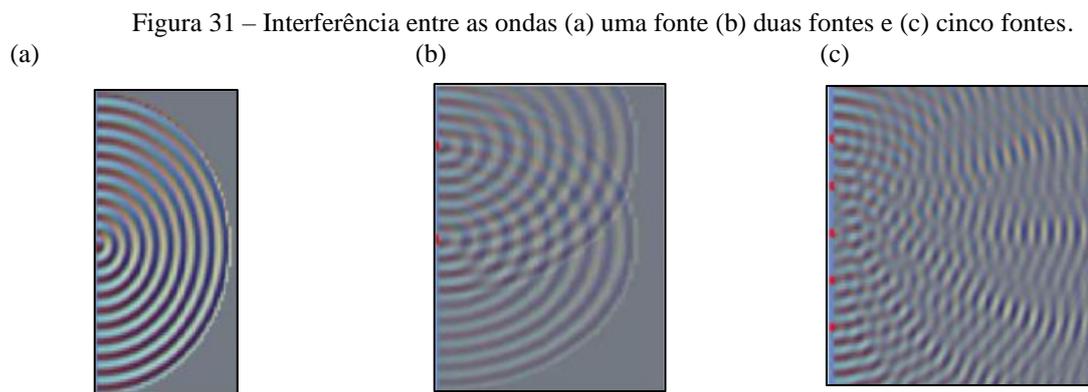
- v) Acoplante – A presença de ar entre o transdutor e a amostra é um problema pois induz a um resultado incoerente, então, para excluir o ar presente entre o transdutor e o material ensaiado, é utilizado um agente acoplante. Várias substâncias podem ser utilizadas para este fim, desde que não provoquem nenhuma reação química adversa com a amostra. Os acoplantes comumente utilizados são água, querosene, óleo, graxa, glicerina e géis. (HELLIER, 2003).
- vi) Ângulo de incidência - Apenas quando uma onda atinge uma superfície em ângulos retos, a transmissão e a reflexão ocorrem sem qualquer alteração na direção do feixe, em outros ângulos de incidência, ocorre mudanças na direção de propagação e na forma da onda, e devem ser levados em consideração.

A lei que governa o comportamento de uma onda na interface entre dois materiais é a Lei de Snell, equação 13, que também pode ser aplicada para ondas acústicas.

$$\frac{\text{Sen}\alpha}{V_1} = \frac{\text{Sen}\beta}{V_2} \quad (13)$$

Onde, α é o ângulo de incidência, β é o ângulo de reflexão/refração, e V_1 e V_2 são as velocidades das ondas incidente e refletida/refratada, respectivamente. (HELLIER, 2003).

vii) Campos de propagação das ondas no material - Durante um ensaio por ultrassom um cristal piezoelétrico é utilizado para geração de ondas ultrassônicas, ele gera infinitos pontos oscilantes de forma que cada ponto produz ondas que se propagam no meio, semelhante as ondas que se formam quando uma pedra cai sobre um lago. A interferência (perturbação) é maior próximo as fontes, e quanto mais distante das fontes, menor é a perturbação. A figura 31 representa uma simulação de ondas sônicas se propagando em um meio. (NUNES et al, 2018).



Fonte: Andreucci, 2016

Percebe-se que há uma interferência muito grande nas proximidades do cristal (pontos de perturbação, próximo a fonte), e as interferências vão diminuindo ao se afastar da fonte. A região próxima do cristal é chamada Campo Próximo e a região mais distante é conhecida como Campo Longínquo (Campo Distante, Zona de Fraunhofer).

A extensão (N) do campo próximo pode ser medida através da equação 14.

$$N = \frac{D_{ef}^2}{4.\lambda} \text{ ou } N = \frac{D_{ef}^2.f}{4.v} \quad (14)$$

D_{ef} corresponde ao diâmetro efetivo do cristal. A área efetiva do cristal que depende da sua forma geométrica. Para cristais circulares, $D_{ef} = 0,97$ x diâmetro do cristal. Para cristais retangulares, $D_{ef} = 0,97$ x metade do comprimento do lado maior do cristal. f é a frequência ultrassônica, λ é o comprimento de onda, e v a Velocidade de propagação do som.

O Campo Próximo representa dificuldade na avaliação ou detecção de pequenas discontinuidades menores que o diâmetro do transdutor, situadas próximas ao transdutor.

O Campo distante está localizado imediatamente após o Campo Próximo e é caracterizado pela divergência das ondas sônicas. Nesta região, discontinuidades grandes ou compatíveis com o comprimento de onda podem ser detectadas. (NUNES et al, 2018).

viii) A escala de Decibéis (dB) – É uma escala logarítmica de nível sonoro, definida pela equação 15 a seguir: (HALLIDAY, 2016).

$$\beta = (10dB) \log \frac{I}{I_0} \quad (15)$$

Onde, dB é a abreviação de decibel e I_0 é uma intensidade de referência.

ix) Atenuação sônica - Ao percorrer um material a onda sônica sofre efeitos de dispersão e absorção, o que resulta na redução de sua energia.

A energia ultrassônica surge após a conversão de energia mecânica em calor, a medida de uma onda se propaga em um material promove um movimento elástico das partículas e aquece o material dissipando energia. A absorção pode ser vista como uma ação de frenagem no movimento de partículas oscilantes. Essa ação de frenagem é mais pronunciada quando as oscilações são mais rápidas, ou seja, em altas frequências. Para a maioria dos materiais, as perdas de absorção aumentam com o aumento da frequência.

A dispersão de uma onda ultrassônica ocorre porque a maioria dos materiais não são homogêneos. As discontinuidades como contornos de grão, inclusões não metálicas, maclas, tendem a desviar pequenas quantidades de energia ultrassônica do feixe ultrassônico principal. Em alguns casos, a determinação do grau de dispersão pode ser usada como critério de aceitação ou desclassificação de uma amostra. Alguns ferros fundidos podem ser inspecionados quanto ao tamanho e distribuição dos grãos de grafita. Da mesma forma, o tamanho e a distribuição de vazios microscópicos em algumas peças fabricadas por metalurgia do pó, ou de reforçadores em alguns materiais reforçados com fibra ou dispersão, podem ser avaliados medindo a atenuação (dispersão) de um feixe ultrassônico. (NUNES, R. M. et al, 2018).

A atenuação geral de uma onda ultrassônica no campo distante pode ser expressa como (equação 16):

$$P = P_0 e^{-\alpha L} \quad (16)$$

Onde P_0 e P são as pressões acústicas no início e no final, respectivamente, L é o comprimento da seção do material, α é o coeficiente de atenuação e L o comprimento.

Os coeficientes de atenuação são mais frequentemente expressos em nepers por centímetro (np/cm) ou decibéis por milímetro (dB/mm). Ambos os nepers e decibéis são unidades baseadas em logaritmos - nepers em logaritmos naturais (base e) e decibéis em logaritmos comuns (base 10). Numericamente, o valor em decibéis por milímetro é igual a

0,868 o valor em nepers por centímetro. (NUNES et al, 2018) A tabela 2 apresenta alguns valores de atenuação para o aço Cr-Ni.

Tabela 2 – Valores de atenuação para o aço cr-ni.

Processamento	Atenuação [dB/mm]
Laminado	0,018
Fundido	0,040 a 0,080
Forjado	0,009 a 0,010

Fonte: ANDREUCCI, (2016).

- x) Efeito piezoelétrico – É a capacidade de alguns materiais possuem de gerar corrente elétrica em resposta a uma pressão mecânica e vice-versa. Ondas ultrassônicas são geradas por transdutores, estes dispositivos convertem um tipo de energia em outra (Energia mecânica em elétrica ou Energia elétrica em mecânica) e são feitos de cristais piezoelétricos. O cristal usado como transdutor é cortado de forma que, quando um campo elétrico alternado for aplicado, este varie de espessura. A variação de espessura implica no movimento das faces do cristal, originando ondas sonoras. Cada transdutor possui sua própria frequência de ressonância, e quanto menor for a espessura do cristal, maior é a sua frequência de vibração. O mesmo cristal pode atuar como emissor e detector, enviando sinal para o visor do equipamento. (BCEND).

4.8.5.2 Equipamentos

Nunes et al, (2018) aborda os principais equipamentos inclusos na maioria dos sistemas de inspeção por ultrassom:

- Um gerador de sinal eletrônico que produz tensão alternada.
- Um transdutor que emite um feixe de ondas ultrassônicas quando for aplicada a tensão alternada do gerador.
- Um agente acoplante para transferir energia do feixe de ondas para a amostra.
- Um transdutor para receber as ondas refletidas do corpo de prova e transformá-las em sinais elétricos. Na maioria dos sistemas, um único transdutor atua alternadamente como emissor e receptor.

- Um dispositivo eletrônico para amplificar e, se necessário, modificar os sinais do transdutor.
- Um visor para indicar, caracterizar ou registrar os dados recebidos do corpo de prova.
- Um cronômetro para controlar a operação.

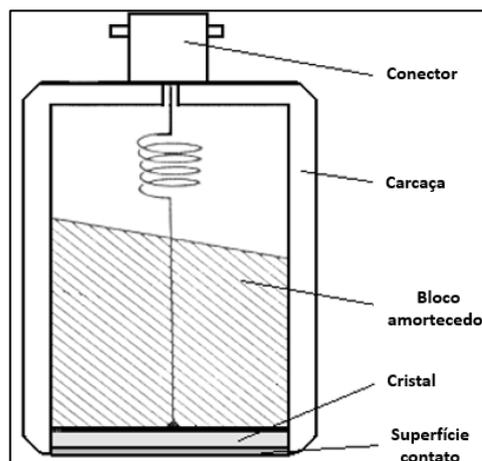
a) Transdutores

São dispositivos utilizados na emissão e recepção das ondas sonoras, também conhecidos como cabeçote, unidade de pesquisa/busca ou sonda. Os transdutores são conectados ao aparelho de ultrassom por meio de cabos coaxiais, sendo constituídos por cristal piezo elétrico, bloco amortecedor, eletrodos, conectores elétricos, placa protetora e carcaça. Os cabeçotes podem ser dos tipos normal, cristal duplo ou angular, cada um com características e funcionalidades diferentes. (NUNES et al, 2018) A norma que aborda as características de um transdutor é a ASTM E 1065 - *Standard Practice for Evaluating Characteristics of Ultrasonic Search Units*.

b) Transdutor normal ou reto

São cabeçotes monocristais geradores de ondas longitudinais perpendiculares à superfície de acoplamento. A figura 32 representa um transdutor reto, o bloco amortecedor serve de apoio para o cristal (elemento) e absorve as ondas emitidas pela face colada a ele, também possui uma angulação para redirecionar a energia interna para longe do elemento. (HELLIER, 2003).

Figura 32 – Representação transdutor reto.

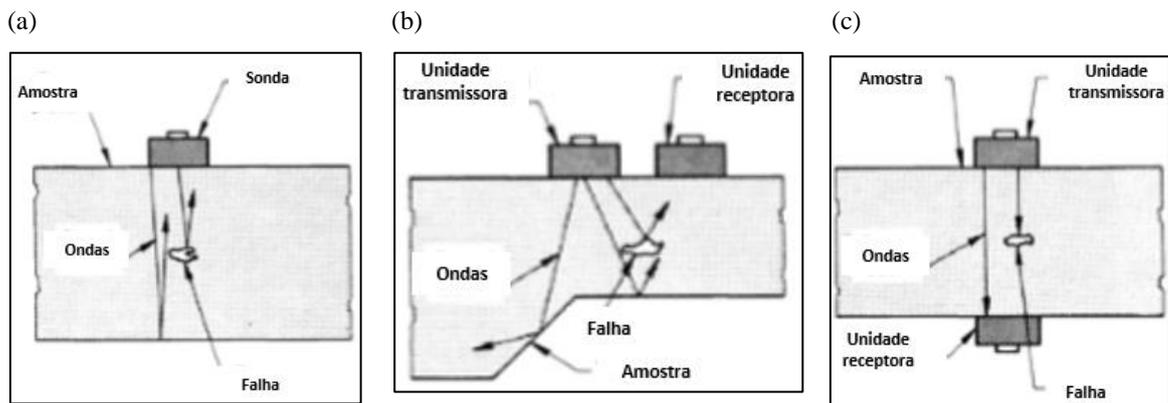


Fonte: Adaptado de Hellier (2003).

Estes transdutores podem ser utilizados tanto para os métodos de reflexão (eco) como para o de transparência. Na figura 33.(a) a unidade atua alternadamente como transmissor e

receptor. 33.(b) neste método com duas sondas, uma atua como transmissora e outra como receptora, é utilizado quando a amostra possui formato irregular, ou as interfaces das discontinuidades não são paralelas à superfície de entrada das ondas sônicas. 33. (c) nesta técnica de transmissão um transdutor atua como transmissor e outro como receptor. Descontinuidades no meio do caminho causam redução na quantidade de energia que chega à unidade receptora. (NUNES et al, 2018 e ANDREUCCI, 2016).

Figura 33 – Utilização dos transdutores.

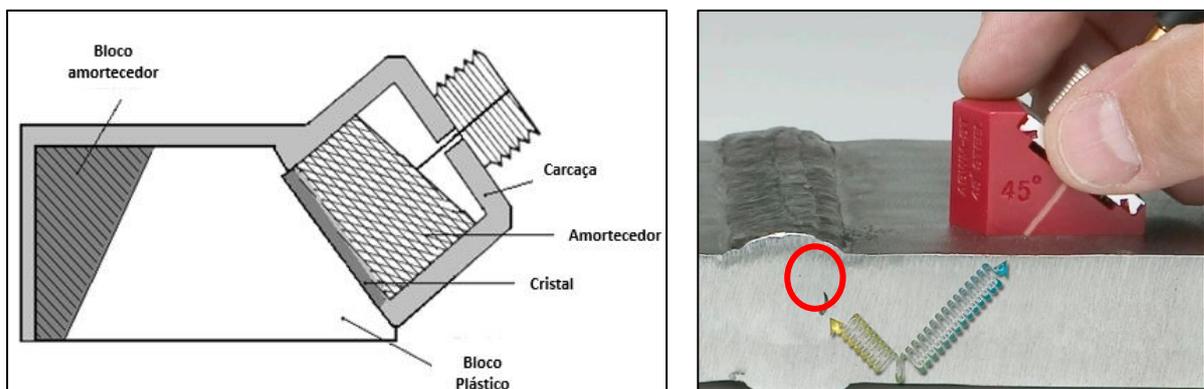


Fonte: Adaptado de NUNES et al. (2018).

c) Transdutor angular

Não são perpendiculares a superfície e formam ângulos de 35° , 45° , 60° , 70° ou 80° , esta angulação é obtida com uma cunha de plástico entre o cristal piezoelétrico e a superfície, figura 34. (a). A cunha de plástico, figura 34 (b), deve ser projetada para reduzir ou eliminar reflexões internas que podem resultar em falsos sinais de eco, prejudicando a interpretação dos resultados. (ANDREUCCI, 2016).

Figura 34 – (a) Representação transdutor angular e (b) transdutor angular Olympus, descontinuidade em destaque.



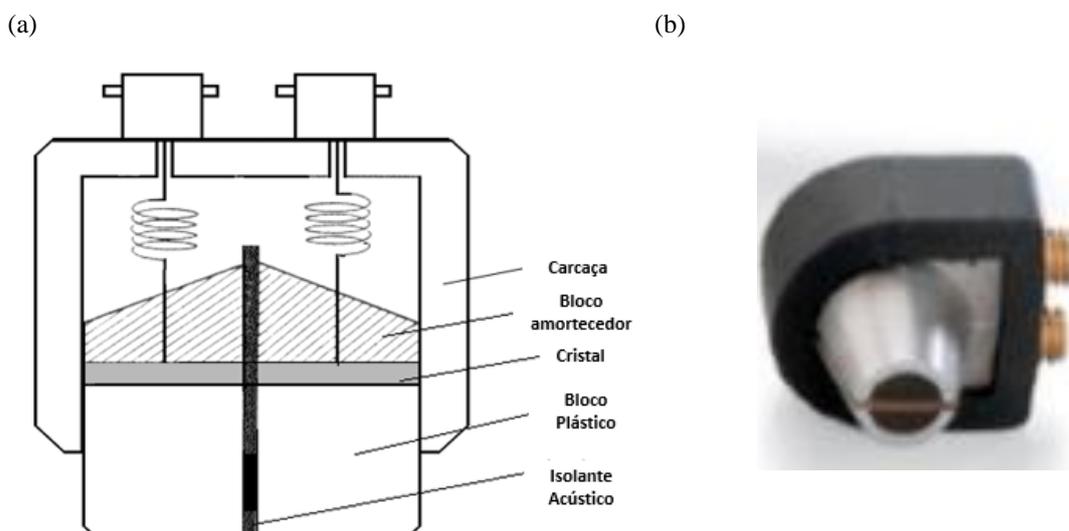
Fonte: Hellier, (2003) e OLYMPUS (2015).

São usados para a inspeção de chapas ou placas, soldas de tubos ou tubulações e amostras com formas que impedem o acesso a feixes retos. As unidades de busca por feixe angular podem ser usadas para produzir ondas transversais ou ondas combinadas transversais e longitudinais, dependendo do ângulo da cunha e do material da amostra. O cristal piezoelétrico recebe apenas os impulsos ultrassônicos que penetram na cunha no sentido oposto ao de emissão, a cunha de plástico funciona como amortecedor para o cristal após emissão dos impulsos.

d) Transdutores duplo-cristal

Os transdutores que incorporam elementos separados para transmissão e recepção da energia ultrassônica são denominados transdutores duplos-cristal, representado pela figura 35. Os elementos são montados separados por um material acusticamente opaco (sem transmissão), como a cortiça. O receptor não deve receber energia diretamente do transmissor, o objetivo principal desse tipo de transdutor é aumentar a capacidade de resolução próxima à superfície do sistema ultrassônico. Os cristais são projetados com um certo ângulo que ao serem transmitidas as ondas ultrassônicas no material, estas retornam para o receptor. (HELLIER, 2003).

Figura 35 – (a) Representação transdutor duplo-cristal (b) Transdutor MTD705 – Olympus.



Fonte: Adaptado de NUNES, R. M. et al, (2018) e OLYMPUS (2015)

e) Transdutor *Phased Array*

O transdutor *phased array*, figura 36, contém uma quantidade de elementos individuais que varia de 16 a 256 que podem ser pulsados separadamente em um padrão

programado. Esses transdutores podem ser utilizados com vários tipos de calços, tanto no modo contato quanto por imersão, eles podem ser redondos, retangulares ou quadrados. As frequências de teste do *phased array* variam geralmente entre 1 MHz e 10 MHz. (OLYMPUS).

Figura 36 – Sonda A32 *phased array* para solda.



Fonte: OLYMPUS.

Os elementos *phased array* permitem: (NUNES et al. 2018).

- i. Controlar o software de feixes angulares, a distância focal e o tamanho do ponto do feixe. Esses parâmetros podem ser rastreados dinamicamente em cada ponto de controle para otimizar o ângulo de incidência e a relação de sinal-ruído da geometria de cada peça.
- ii. A inspeção em vários ângulos com uma sonda multielementos e calços pequenos fornece ângulos fixos individuais ou rastreamento em vários ângulos.
- iii. Maior flexibilidade para a inspeção de geometrias complexas e testes em peças com geometria com acesso limitado.
- iv. O rastreamento em alta velocidade sem movimento a partir de uma única posição do transdutor por causa da multiplexação de vários elementos. Mais de um rastreamento pode ser realizado a partir de um único local com vários ângulos de inspeção.

4.8.5.3 Técnicas de inspeção

Algumas técnicas devem ser dominadas pelo inspetor, para que a descontinuidade seja detectada no material, a seguir são apresentadas estas técnicas.

a) Modulação de frequência

É o método precursor ao método de pulso eco. Neste método, os pulsos ultrassônicos são transmitidos em “pacotes” de ondas cuja frequência varia linearmente com o tempo. A variação de frequência é repetida em “pacotes” de ondas sucessivas, de modo que um gráfico

de frequência versus tempo tenha um padrão de dente de serra. Há um atraso de tempo entre pacotes sucessivos. Os ecos são exibidos no visor do dispositivo somente se eles tiverem certas características, conforme determinado pelos circuitos eletrônicos no instrumento. Embora não seja tão amplamente usado quanto o método de pulso eco, este método possui uma relação sinal/ruído mais baixa e, portanto, um poder de resolução um pouco maior. (HELLIER, 2003).

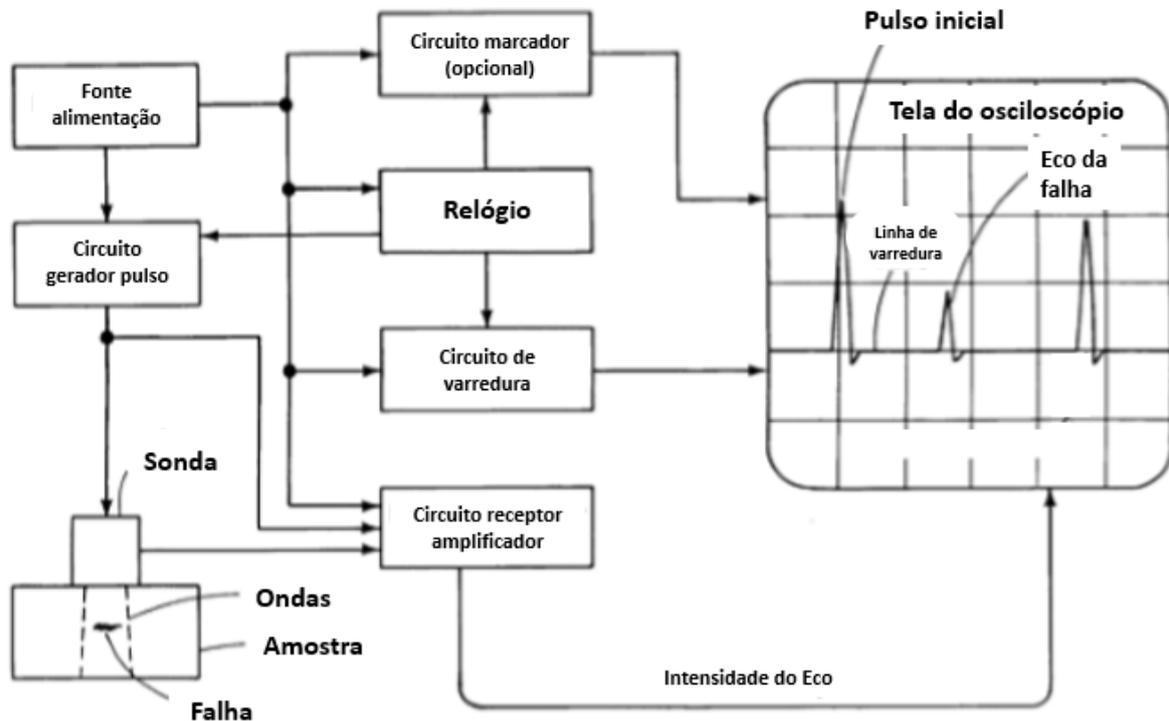
b) Pulso eco ou Impulso eco

Nesta técnica apenas um transdutor é responsável por emitir e receber as ondas ultrassônicas que se propagam no material, se o pulso encontrar uma superfície reflexiva, toda ou parte desta energia será refletida. A energia do feixe de ondas refletido é proporcional ao tamanho da descontinuidade e a direção deste feixe (eco) e depende da orientação da superfície reflexiva.

Um sistema de eco de pulso com um único transdutor opera da seguinte forma. Em intervalos regulares, o relógio eletrônico aciona o gerador de sinal, que impõe um pequeno intervalo de tensão alternada de alta frequência ou um pico unipolar negativo no transdutor. O relógio ativa, simultaneamente, um circuito de medição de tempo conectado ao dispositivo de exibição. Na tela de visualização do instrumento o operador pode selecionar a taxa de repetição dos pulsos, que geralmente são repetidos de 60 a 2000 vezes por segundo, na maioria dos detectores a taxa de repetição é controlada automaticamente. O operador também pode pré-selecionar a frequência de saída do gerador de sinal. Para obter melhores resultados, a frequência e a taxa de repetição (às vezes precisa ser regulada) de pulso devem ser ajustadas para alcançar a resposta máxima do transdutor e a melhor relação sinal-ruído (menor quantidade de ruído eletrônico) no equipamento.

O transdutor converte o pulso de tensão em um pulso de vibração mecânica tendo essencialmente a mesma frequência que a tensão alternada imposta. A vibração mecânica é introduzida na amostra, atravessa uma substância acoplante e viaja pela amostra na velocidade do som, que varia de acordo com o material. Quando o pulso do ultrassom encontra uma superfície refletora que é perpendicular à direção da viagem, a energia ultrassônica é refletida e retorna ao transdutor, pelo mesmo caminho e na mesma velocidade do pulso transmitido. Ao alcançar o transdutor através do acoplador, o pulso de retorno faz com que o elemento do transdutor vibre, o que induz uma tensão elétrica alternada através do transdutor, que por sua vez é amplificada e segue para o dispositivo de exibição. Este processo é repetido para cada envio e recebimento de pulsos. (NUNES et al, 2018.) A figura 37 apresenta o funcionamento do equipamento para utilização da técnica pulso eco.

Figura 37 – Diagrama de blocos de um equipamento de inspeção ultrassônica via pulso eco.



Fonte: Adaptado de NUNES et al., (2018).

c) Técnica de transparência

São utilizados dois transdutores separados, um transmite e outro recebe as ondas ultrassônicas. É necessário acoplar os transdutores nos dois lados da peça perfeitamente alinhados. Este ensaio não permite determinar a localização da descontinuidade na peça, sua extensão, ou a posição, determina apenas se há ou não descontinuidade. Pode ser aplicado em chapas, juntas soldadas ou barras. Não é possível determinar a espessura da descontinuidade, porém pode ser usada como um método comparativo, pois a altura do sinal recebido varia de acordo com o tamanho e quantidade de descontinuidades. Sendo assim, o inspetor não consegue analisar as características das indicações, porém compara a queda do eco com uma peça sem descontinuidades e estabelece critérios de aceitação. (ANDREUCCI, 2016).

d) Técnica de imersão

As técnicas de varredura de contato são usadas principalmente para varrer pequenas áreas de componentes para inspeções domésticas e em componentes grandes que não podem ser ensaiados por imersão. As técnicas de imersão são muito mais rápidas e convenientes para a varredura de grandes áreas de chapas, tubos e produtos forjados durante a fabricação. As técnicas se desenvolveram para formas automatizadas, que possuem vantagens em relação forma manual de ensaio, entre elas estão melhores condições de acoplamento, ângulos de

feixe variáveis, é possível contornar a interface e tem melhor resolução para o uso de frequências mais altas. As desvantagens desta técnica são a configuração do sistema para ensaio é mais complicada e a formação de bolhas de ar interfere no ensaio. (ANDREUCCI, 2016 e HELLIER, 2003).

4.8.5.4 Aplicações

É um método utilizado para detectar discontinuidades na maioria dos metais e suas ligas, em motores, peças automotivas, aeronáuticas, ferroviárias entre outras. O Phased Array foi utilizado para identificar a presença de discontinuidades em cordão de solda (STEIN, 2017) em uma chapa de aço carbono A36, que é aplicado em cantoneiras, chapas, barras (redonda, chata ou quadrada) e perfis T, U e I (PROFISSIONAL DO AÇO). Pontos de corrosão em peças de aeronaves são imediatamente removidos, através de um desbaste, para manter as condições de voo seguras, e a peça é liberada após a aferição da espessura, esta espessura é realizada por ensaio de ultrassom (SILVA, 2012). O ultrassom também é utilizado para medição de nível de fluidos em tanques com misturas. (MADRUGA, 2011).

Pode ser utilizado quando um equipamento “online” não pode ser desligado da produção, exemplo, vaso de pressão trabalhando a elevadas temperaturas e pressões. Também pode detectar discontinuidades provocadas pelo hidrogênio (fragilização por hidrogênio), em regiões de difícil acesso, conectando hastes aos transdutores, áreas radioativas, caixa de engrenagens de um helicóptero, que não podem ser vistos sem desmontar a caixa de engrenagens. (NUNES et al, 2018 e HELLER, 2003).

4.8.5.5 Avaliação dos ensaios

Hellier (2003) traz algumas observações quanto a avaliação dos ensaios. É importante ser usado um critério (normas, padrões ou códigos) de avaliação das discontinuidades encontradas quanto a tamanho, tipo e quantidade das discontinuidades. Se não houver este critério, a determinação das discontinuidades aceitáveis ou rejeitáveis não será possível. As considerações quanto as especificações utilizadas no contrato devem ser apresentadas no contrato de serviço.

A elaboração de um relatório/registo das condições de ensaio é importante, pois garantem a repetibilidade do exame, especialmente quando a amostra precisa ser verificada periodicamente. Podem surgir situações em que o acesso aos relatórios de inspeção não será possível, neste caso caberá ao examinador gerir a situação com técnica.

É uma boa prática elaborar relatórios de inspeção com no mínimo as seguintes informações:

- Data, horário e local de ensaio;
- Nome e nível do inspetor;
- Componentes examinados com os números de série (se utilizados);
- Procedimentos, especificações, padrões para realização dos ensaios;
- Equipamentos utilizados, incluindo número de série;
- Transdutores usados (frequência, ângulos e número de série);
- Padrões de calibração e blocos de referência;
- Acoplante utilizado;
- Sensibilidade do escaneamento;
- Área escaneada;
- Limitações e interferências ocorridas durante o ensaio;
- Localização das descontinuidades (e classificação, se requerido);
- Comentários sobre temperatura, condição superficial, etc.
- Desenho da peça com as indicações (contendo escala);

Os relatórios devem ser precisos e concisos, de modo a transmitir suas informações para todos que o lerem, portanto, é importante descrever os resultados da maneira mais clara possível. (HELLIER, 2003).

Alguns critérios de aceitação de descontinuidades são descritos na norma ASME B31.3 parágrafo 344.6 (*Ultrasonic Investigation*), ASME VIII e AWS D1.1. Em tradução livre pode ser observado código ASME VIII.

Critério de Aceitação de Juntas Soldadas, conforme Código ASME Sec. VIII Div.1, Div. 2 e Sec. I PW-52

Imperfeições que produzirem uma resposta maior que 20% do nível de referência devem ser investigadas a extensão para que o operador possa determinar a forma, identificar, e localizar tais indicações e avaliar as mesmas em termos do padrão de aceitação dado em (a) e (b) abaixo.

(a) Indicações caracterizadas como trincas, falta de fusão ou penetração incompleta são inaceitáveis independente do comprimento;

(b) Outras imperfeições são inaceitáveis se indicações excedem em amplitude o nível de referência e tenha um comprimento que exceda:

$$\begin{aligned} & \frac{1}{4} \text{ pol. (6,0 mm) para } t \text{ até } \frac{3}{4} \text{ pol. (19 mm);} \\ & \frac{1}{3} \cdot t \text{ para } t \text{ de } \frac{3}{4} \text{ (19 mm) até } \frac{2.1}{4} \text{ (57,0 mm);} \\ & \frac{3}{4} \text{ pol. para } t \text{ acima de } 2.1/4 \text{ pol. (57,0)} \end{aligned}$$

Onde “t” é a espessura da solda excluindo qualquer reforço permitido. Para juntas soldadas de topo onde dois membros tendo diferentes espessuras de solda, “t” é a mais fina dessas duas espessuras. Se uma solda de penetração total inclui uma solda de filete, a espessura da garganta do filete deve ser incluída em “t”.

(ANDREUCCI, 2016, p. 81,82)

4.8.5.6 Vantagens e limitações do ensaio por ultrassom

Foram elencados algumas vantagens e desvantagens do ensaio por ultrassom, que estão expostos no quadro 7.

Quadro 7 – Vantagens e limitações do ensaio por ultrassom

Vantagens	Limitações
Possui elevada sensibilidade na detecção de pequenas descontinuidades internas.	Requer grande conhecimento teórico e experiência.
A inspeção pode ser realizada a partir da superfície, com equipamento leve e portátil.	Espessuras muito finas são uma dificuldade para aplicação do método.
Controle considerável sobre as variáveis de ensaio.	Requer preparo na superfície para a sua aplicação.
É possível realizar ensaios em altas temperaturas.	Descontinuidades que são orientadas paralelamente ao feixe de ondas usualmente não são detectados.
Possibilidade de ensaio de estruturas espessas ou longas.	Descontinuidades de tamanho menor ou igual ao tamanho do grão da estrutura podem não ser detectadas.
Descontinuidades superficiais e subsuperficiais podem ser detectadas.	Os sinais podem ser mal interpretados.
Facilidade na replicação do ensaio.	Superfícies irregulares podem reduzir a eficácia do ensaio.
Não é preciso licenças especiais, como radiografia industrial.	
Não é necessário evacuar a área durante o ensaio.	

Fonte: HELLIER (2003) e ANDREUCCI (2012).

4.8.6 Ensaio por correntes parasitas

O ensaio por correntes parasitas também conhecido como ensaio por correntes de Foucault, ou ensaio por correntes de Eddy. É um dos métodos mais antigos de END. No entanto, apenas nas últimas décadas do século XX é que o método da corrente parasita começou a atingir seu verdadeiro potencial no mercado. Enquanto os instrumentos ultrassônicos portáteis que ofereciam versatilidade considerável estavam disponíveis desde os anos 1960, os equipamentos portáteis para o ensaio por correntes parasitas só se tornaram

disponíveis nos anos 80. No início dos anos 80 foram produzidos um excelente material explicativo que tornou a teoria da corrente de fuga compreensível para pessoas sem formação técnica avançada. O desenvolvimento de novos dispositivos eletrônicos e a participação do inspetor em treinamentos de alta qualidade garantem o crescimento contínuo deste END versátil e de alto desempenho. (HELLIER, 2003).

O ensaio por correntes de Foucault é baseado nos princípios da indução eletromagnética e é utilizado para identificar ou diferenciar uma ampla variedade de condições físicas, estruturais e metalúrgicas em metais e partes de metais ferromagnéticos e não-ferromagnéticos eletricamente condutores. A inspeção por correntes de Foucault pode ser usada para:

- Medir ou identificar condições e propriedades como condutividade elétrica, permeabilidade magnética, tamanho de grão, condição de tratamento térmico, dureza e dimensões físicas;
- Detectar descontinuidades (fissuras, vazios ou inclusões);
- Classificar metais diferentes e detectar diferenças em sua composição, microestrutura e outras propriedades;
- Medir a espessura de um revestimento não condutor em um metal condutor ou a espessura de um revestimento de metal não magnético em um metal magnético.

Como as correntes parasitas são criadas usando uma técnica de indução eletromagnética, o método de inspeção não requer contato elétrico direto com a peça que está sendo inspecionada. O método da corrente de Foucault é adaptável à inspeção de alta velocidade e, por não ser destrutivo, pode ser usado para inspecionar toda a produção, se necessário. (NUNES et al, 2018).

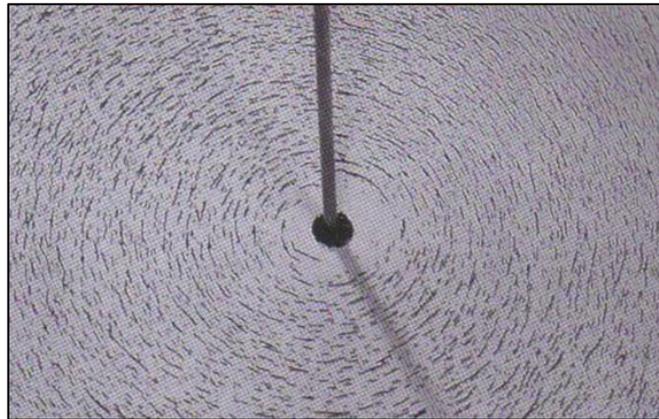
4.8.6.1 Teoria e princípios

Para compreensão deste ensaio é fundamental conhecer alguns conceitos físicos que envolvem o ensaio por correntes parasitas.

a) **Eletromagnetismo**

Eletromagnetismo é o fenômeno pelo qual a passagem de elétrons por um condutor faz com que um campo magnético concêntrico se desenvolva ao redor do condutor, figura 38. (HALLIDAY, 2016).

Figura 38 – Limalha de ferro espalhada em um pedaço de cartolina forma círculos concêntricos quando uma corrente atravessa o fio central.



Fonte: Halliday, (2016).

Um efeito semelhante ocorre em uma bobina helicoidal (solenóide, espiras circulares muito próximas). Ao ser aplicada a corrente em um solenóide, linhas de campo magnético surgem dentro e fora da bobina, sendo que o campo é mais intenso no interior do solenóide e mais fraco no lado de fora. (HALLIDAY, 2016).

Se a corrente aplicada ao condutor for alternada, o campo eletromagnético também será alternado e a bobina apresentará uma indutância, L [Henry]. Indutância é a capacidade de um condutor induzir tensão em si ou em um condutor vizinho quando a corrente varia. (HELLIER, 2003).

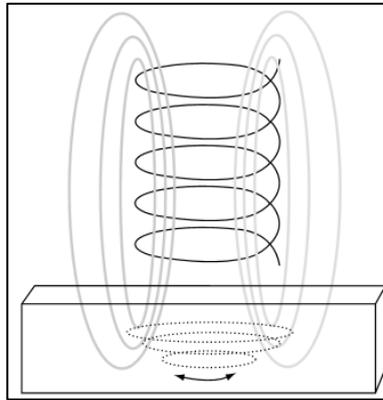
b) Correntes de Foucault

As partes metálicas dos equipamentos elétricos podem estar sujeitas a intenso fluxo magnético ou localizadas em regiões com fluxo magnético variável, podendo ser induzidas correntes sobre o volume de metal exposto a estas condições. Estas correntes são chamadas de correntes de Foucault ou correntes parasitas.

A existência das correntes parasitas pode ser demonstrada através de um experimento simples, utilizando uma moeda, um ímã e uma superfície metálica inclinada. Ao colocar o ímã e a moeda sobre o plano, percebe-se que o ímã irá deslizar mais lentamente que a moeda, devido ao fato que o mesmo criará um fluxo magnético variável sobre a superfície, o qual irá induzir correntes de Foucault na mesma, freando a queda do ímã. (CANTÚ, 2013).

A figura 39 evidencia a indução das correntes parasitas em um material metálico devido à exposição a um fluxo magnético variável.

Figura 39 – Correntes parasitas induzidas em uma amostra.



Fonte: Hellier, (2003).

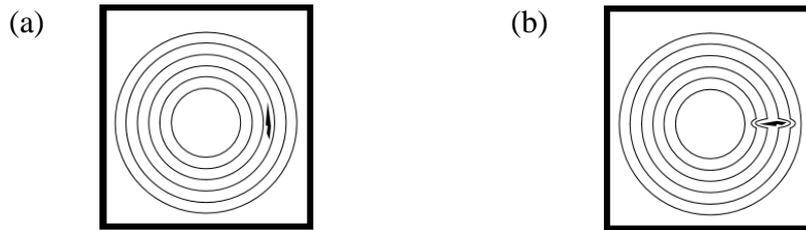
O sentido destas correntes é determinado pela Lei de Lenz: a corrente induzida em uma espira tem um sentido tal que o campo magnético produzido pela corrente se opõe ao campo magnético que induz a corrente. (HALLIDAY, 2016).

c) Fatores que interferem nas correntes parasitas

Hellier (2003) apresenta algumas características que interferem no desempenho das correntes parasitas:

- i. Elas fluem apenas em *loops* concêntricos fechados. O fluxo é circular exceto em torno de descontinuidades ou fronteiras da amostra, conforme mostrado na figura 56.
- ii. A orientação da bobina determina a orientação do fluxo na amostra. A orientação da bobina deve ser controlada para obter os melhores resultados.
- iii. As descontinuidades são detectáveis por este ensaio à medida que estas perturbam o fluxo da corrente. Sendo assim, uma descontinuidade possui menor probabilidade de ser detectada se a sua dimensão mais longa é paralela ao fluxo de corrente, e a maior probabilidade de detecção acontece quando a dimensão mais longa for perpendicular ao fluxo, conforme observado na figura 40 na distorção da corrente em relação a direção da falha.

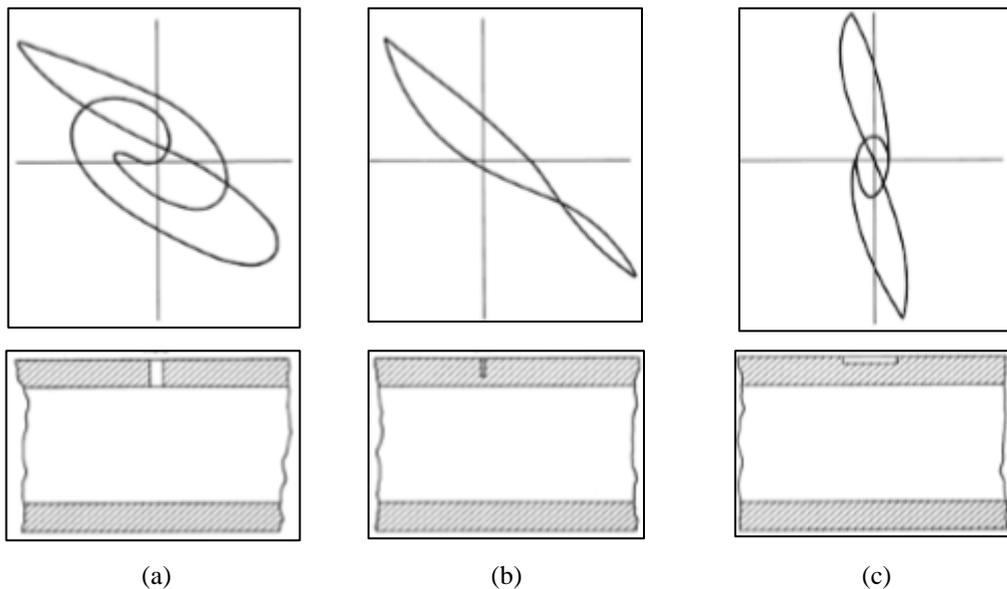
Figura 40 – Distorção das correntes em meio a uma descontinuidade.



Fonte: Hellier, 2003.

As discontinuidades quando ensaiadas com uma sonda produzem um sinal característico, o inspetor analisa estes sinais no visor do equipamento com padrões de referência e identifica o tipo de discontinuidade presente na amostra. A figura 41 apresenta sinais de referência obtidos com o uso de uma sonda OD (para tubulações internas) operando a 250kHz para as discontinuidades mostradas.

Figura 41 – sinais de referência de (a) um furo com 2 mm de diâmetro, (b) corte superficial e (c) um sulco superficial longitudinal.



Fonte: Arnold, (1987).

- iv. As correntes parasitas se comportam como fluidos compressíveis. O fluxo de corrente sofre compressão ao se deparar com as fronteiras da amostra.
- v. Como um campo alternado gera correntes parasitas num material, estas correntes serão alternadas que variam no sentido horário e anti-horário.
- vi. A proximidade (*Lift-off*) da bobina em relação a amostra possui grande influência no fluxo das correntes de Foucault, sendo assim, a bobina deve estar sempre com o mesmo afastamento em relação à amostra para que tenha uma mesma distância de referência. (CANTÚ, 2013) Quanto mais próximo o emissor de campo magnético

estiver, maior será a sensibilidade, pois a densidade de correntes parasitas será maior. (HELLIER, 2003).

- vii. A profundidade de penetração das correntes parasitas é descrita pelo *skin effect*, a densidade de corrente máxima se encontra na superfície do material e diminui exponencialmente ($1/e^n$), onde $e = 2,718$ e " n " é a quantidade de penetrações/*skins* (1, 2, 3...). A profundidade padrão de penetração (δ) é a profundidade na qual a densidade de corrente representa $1/e$ (36,8%) da densidade na superfície. A tabela 3 apresenta alguns dados de profundidade padrão de penetração. (HELLIER, 2003).

Tabela 3 – Profundidade padrão de penetração de metais

Metal	Condutividade e %IACS	Resistividade e	Permeabilidade e	36,8% de profundidade de penetração (m)					
				1kHz	4kHz	16kHz	64kHz	256kHz	1MHz
Cobre	100,0	1,7	1,00	0,082	0,041	0,021	0,010	0,005	0,0026
Magnésio	37,0	4,6	1,00	0,134	0,067	0,034	0,017	0,008	0,0042
Urânio	6,0	29,0	1,00	0,334	0,167	0,084	0,042	0,021	0,0106
Zircônio	3,4	70,0	1,02	0,516	0,258	0,129	0,065	0,032	0,0164
Aço	2,9	60,0	750,0	0,019	0,09	0,048	0,0024	0,0012	0,0006

Fonte: Adaptado de Hellier, (2003).

Para " $n > 3$ " a profundidade de penetração é muito baixa para apresentar um sinal, e pode ser calculada com a seguinte equação 17:

$$\delta[mm] = 25 \sqrt{\frac{\rho}{f \cdot \mu_r}} \quad \text{aumentar o que está dentro da raiz} \quad (17)$$

Onde δ é a profundidade padrão de penetração, ρ a Resistividade, f a frequência e μ_r a permeabilidade relativa.

- viii. O *design* da bobina define as características de excitação e sensibilidade. Para obtenção de maior sensibilidade é necessário maior densidade de corrente, que pode ser obtido reduzindo o diâmetro da bobina. Contudo, bobinas com diâmetros pequenos limitam a profundidade de penetração das correntes parasitas. (HELLIER, 2003)
- ix. A condutividade do metal influencia as correntes parasitas geradas, quanto maior a condutividade maior é o fluxo de correntes parasitas na superfície. Contudo, devido ao grande fluxo de correntes de Foucault na superfície, o fluxo original é enfraquecido e, portanto, há menos força para induzir correntes em maiores profundidades. (HANSEN, 2004).
- x. Quanto maior for a permeabilidade magnética, maior será a profundidade de penetração das correntes de Foucault. (CANTÚ, 2013).

- xi. Este ensaio é realizado com frequências que variam de 50 Hz a 10 MHz, quanto maior a frequência, maior será a sensibilidade a descontinuidades superficiais. À medida que a frequência diminui a penetração da corrente parasita aumenta.

4.8.6.2 Técnicas e equipamentos

Os principais procedimentos e equipamentos utilizados no ensaio por corrente parasitas estão listados a seguir.

a) Sequência de ensaio (HELLIER, 2003).

- i. O equipamento gera uma voltagem alternada de certa frequência para a bobina, causando um fluxo de corrente alternada.
- ii. A corrente da bobina cria um campo magnético primário ao redor da mesma.
 - a. O fluxo da bobina induz uma voltagem de retorno, causando uma reatância indutiva.
 - b. O fluxo da bobina induz uma diferença de potencial na amostra, criando as correntes de Foucault.
- iii. As correntes parasitas geram um campo magnético secundário que interage com o campo primário criado pela bobina.
- iv. Qualquer alteração no fluxo de corrente através da bobina irá ser mostrado no visor do equipamento, através da impedância.

b) Equipamentos

Há uma variedade grande de equipamentos disponíveis no mercado, embora haja esta variedade, o princípio de funcionamento é o mesmo. Todo instrumento de ensaio por correntes parasitas deve possuir um gerador de corrente alternada, uma bobina, e um visor.

c) Instrumentos de leitura

Estes instrumentos de exibição mostram variação da reatância e da resistência durante o teste. As variáveis de controle destes instrumentos incluem frequência, ganho, posição do ponto, rotação de fase, equilíbrio, borracha, filtros, driver da sonda, amplificação horizontal e vertical. Figura 42. (HELLIER, 2003).

Figura 42– Unidade de exibição por correntes parasitas, modelo NORTEC 600.



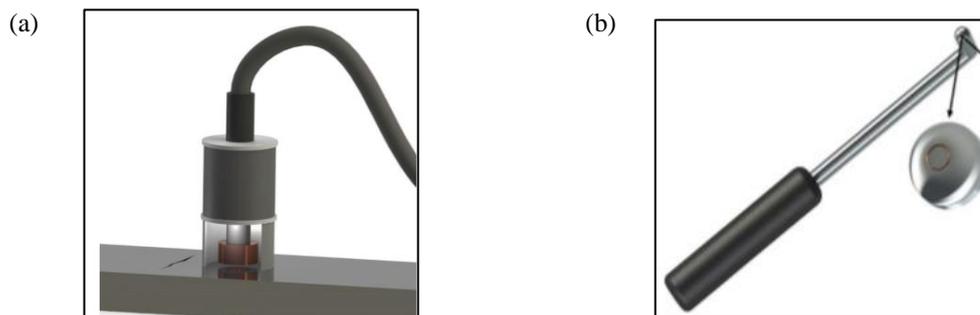
Fonte: OLYMPUS, 2019.

d) Sondas absolutas

Sondas superficiais frequentemente operam em modo absoluto, pois o sinal obtido em uma medição é simplesmente o valor da impedância da bobina. Uma configuração típica deste tipo de sonda é apresentada na figura 43(a). Outra configuração de sonda é conhecida como “lápiz”, figura 43(b), que podem ser tanto retas como dobradas na ponta possibilitando acesso a regiões mais difíceis. (BOWLER, 2019).

Detectam qualquer condição que altere o fluxo das correntes, incluindo ruídos como variações de *lift-off* (variação da impedância da bobina por causa da distância entre o condutor e a própria bobina) e variação de temperatura. (HELLIER, 2003).

Figura 43 – Configurações de sondas absolutas. (a) de contato e (b) com ponta dobrada.



Fonte: BOWLER, (2019).

e) Sondas diferenciais

São aquelas que duas bobinas idênticas estão conectadas em série na mesma sonda, mas são enroladas em sentido oposto a cada uma, de modo que a sonda de suas impedâncias seja zero quando não há descontinuidade, figura 44. (BOWLER, 2019) Possui como vantagem a supressão de ruídos devido a variações de temperatura e *lift-off*. (HELLIER, 2003).

Figura 44 – Sondas diferenciais.



Fonte: BOWLER, (2019).

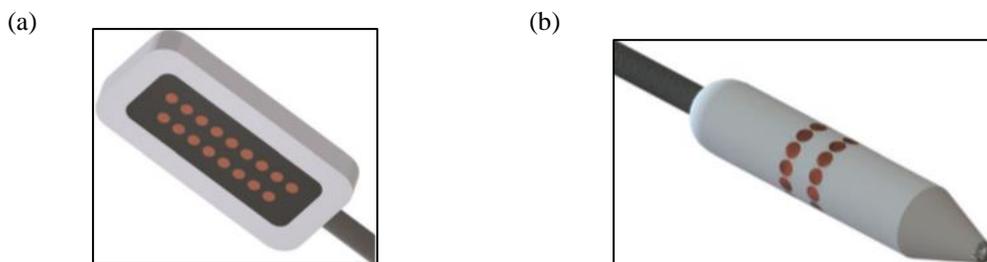
f) Sonda de ponto positivo

São chamadas desta maneira pois as duas bobinas são orientadas formando um ângulo de 90° entre elas, formando um sinal positivo (+) quando vistas de certo ângulo. A configuração consiste em duas bobinas tangentes enroladas ortogonalmente operando em modo diferencial. Esta sonda suprime o ruído devido as variações do *lift-off*, variações graduais no material de condutividade e permeabilidade. Também como vantagem tem uma sensibilidade bidirecional. (BOWLER, 2019).

Sondas Array

Comportam várias bobinas em uma única sonda, figura 45.(a), possibilitando a varredura de uma área maior, do que uma sonda com apenas uma bobina. Também evitam a possibilidade de pontos cegos. Sondas Array cilíndricas, figura 45.(b), permitem a inspeção em tubos sem a necessidade de rotacionar a sonda. (BOWLER, 2019).

Figura 45 – Sondas arrays (a) duas fileiras de bobinas dispostas em uma superfície plana. (b) sonda cilíndrica para inspeção no interior de tubos.



Fonte: Bowler, (2019)

4.8.6.3 Aplicações

Aplicações diversas nas indústrias nuclear, química, petroquímica e aeroespacial. Além disso pode ser utilizado no controle de qualidade de diferentes peças, tubulações, barras e arames na indústria metalúrgica.

Através da utilização do ensaio por correntes parasitas foi detectado a presença de trincas e fase sigma em amostras de Aço Dúplex 2205 submetidos a diferentes tratamentos térmicos (MARQUES, 2017). O método também pode ser aplicado em superligas da base de níquel, que são aplicadas em diversos setores da indústria devido as suas propriedades mecânicas e químicas. Foram realizados experimentos que avaliaram o envelhecimento da liga Inconel 718, através do ensaio por correntes parasitas verificou-se que as alterações na microestrutura provocam mudanças na condutividade elétrica, permitindo avaliar o material. (PEREIRA, 2014) Entre as aplicações técnicas podemos destacar: inspeção de tubulações, detecção de corrosão, inspeções superficiais em materiais não ferromagnéticos e magnéticos, testes de condutividade, inspeção de soldas. (BCEND).

4.8.6.4 Vantagens e limitações do ensaio por correntes parasitas

Pode ser observado através do Quadro 8, algumas vantagens e desvantagens do ensaio por correntes parasitas.

Quadro 8 – Vantagens e limitações do ensaio por correntes de Foucault

Vantagens	Limitações
Não precisa de agente acoplante, pós, ou qualquer outra substância aplicada ao material para obter resultados, apenas uma sonda e um campo magnético.	É difícil avaliar as condições subsuperficiais em materiais ferromagnéticos. Consequentemente, o teste de materiais ferromagnéticos limita-se apenas à detecção de descontinuidades superficiais, a menos que o material tenha sido saturado magneticamente.
Resultados são instantâneos. Embora, seja uma boa prática gravar os resultados obtidos e analisar posteriormente para amostras grandes.	A amostra deve ser condutora. Embora seja possível medir espessuras de revestimentos não condutores usando técnicas de <i>Lift-off</i> .
Não é necessário que a sonda toque a	A velocidade de inspeção pode ser limitada

amostra, prevenindo desgaste por atrito.	pela frequência.
São seguros, não há perigo de radiação ou de contaminação.	A teoria do ensaio é complicada, portanto é um desafio para o inspetor dominar o método.
Não é necessário limpeza do material e nem sua preparação.	Uso de padrões de calibração é necessário na maioria dos casos.
Opera numa faixa larga de temperatura.	Sensível a variações de <i>lift-off</i> e efeito de borda.
Permite utilização de tecnologias “ <i>arrays</i> ”.	

Fonte: (HELLIER, 2003 E PEREIRA 2014)

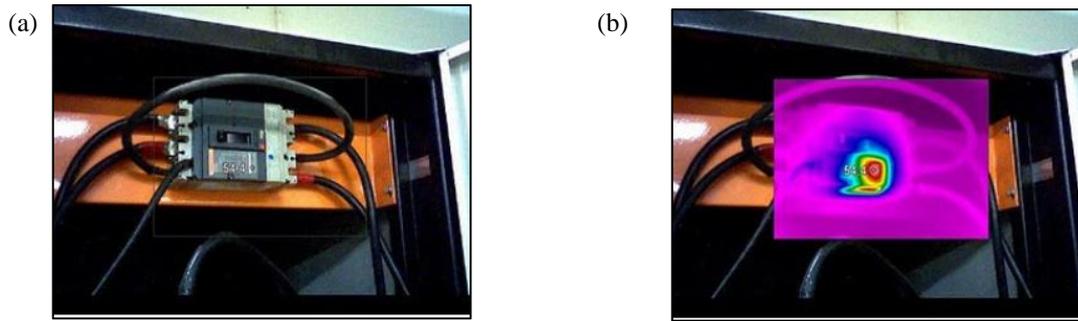
4.8.7 Termografia

Sir William Herschel, em 1800, realizando experimentos com amostras de vidro (prismas) conseguiu “quebrar” a luz do sol em várias cores, e utilizando um termômetro de mercúrio muito sensível ele mediu a temperatura de cada cor. Curiosamente a temperatura aumentava logo após a faixa de luz vermelha, ele denominou esta região de “calor negro” (*dark heat*). Esta região do espectro eletromagnético é conhecida como infravermelho. (HELLEIR, 2003).

No ano de 1840, o filho de William Herschel, Sir John Herschel produziu a primeira imagem infravermelha, este feito foi devido a evaporação diferencial de uma película fina de petróleo. Durante a Primeira e a Segunda Guerra Mundiais esta tecnologia se expandiu, alcançando maiores graus de sensibilidade, sendo aplicada em desenvolvimentos militares. Em meados dos anos 1950, os dispositivos de formação de imagens térmicas passaram a ficar à disposição da indústria e de cientistas. (SOUSA, NOBRE E POSSI).

A termografia mapeia uma região com a utilização de um equipamento chamado de termógrafo, que permite realizar uma análise técnica através da distinção de diferentes temperaturas, por meio da radiação infravermelha emitida pelos corpos. Por exemplo, um ponto quente identificado em uma junta pode ser causado por um vazamento de gás durante a operação de um sistema de aquecimento, ou por algum problema em um componente eletrônico. A figura 46, apresenta um disjuntor que está em uma temperatura segura de funcionamento, porém por medida de segurança deve ser realizada a troca do mesmo para evitar transtornos com paradas não programadas.

Figura 46 – Imagem térmica de um disjuntor (a) sem equipamento e (b) com o equipamento termográfico.



Fonte: TERMOGRAFIA BRASIL (2017).

4.8.7.1 Teoria e princípios

A seguir serão abordados alguns princípios como: energia térmica, condução, calor latente, radiação e algumas normas referentes ao ensaio.

a) Energia térmica

Se refere à energia contida num sistema que é responsável por sua temperatura. (KHAN ACADEMY) A energia pode ser modificada de uma forma a outra, por exemplo um motor de carro converte a energia química da gasolina em energia térmica, que por sua vez produz energia mecânica e elétrica para dispositivos do carro. Um subproduto de quase todas as conversões de energia é o calor ou energia térmica. (HELLIER, 2003).

b) Calor latente

Quando um calor é transferido de uma amostra para outra, nem sempre é presenciado aumento da temperatura, mas pode ocorrer mudança de fase. A quantidade de energia por unidade de massa (m) transferida em forma de calor para que uma amostra mudar de fase é o calor latente (ou de transformação) “L”. (HALLIDAY, 2006) A energia transferida para mudança de fase é calculada pela equação 18:

$$Q = m.L \quad (18)$$

c) Condução

A condução é um método de transferência de energia que pode ocorrer em materiais sólidos, líquidos ou gasosos. Pode ser compreendida como a transferência de energia de partículas mais energéticas de uma substância para as partículas próximas menos energéticas, devido a interações entre as partículas. A Lei de Fourier, equação 19, quantifica macroscopicamente a transferência de energia por condução. (MORAN et. al, 2009).

$$Q = \frac{k}{L.A.\Delta T} \quad (19)$$

Onde, Q é o calor transferido, k é a condutividade térmica, L é a espessura do material, A é a área do plano normal ao fluxo e ΔT a Variação de temperatura.

A condutividade térmica (k) é a quantidade de energia térmica que é transferida através de um pé quadrado de um material, com uma polegada de espessura, durante uma hora, quando há uma diferença de temperatura de um grau Fahrenheit, em unidades do SI a condutividade térmica é definida como $W/(m \cdot ^\circ C)$. Materiais com altas condutividades térmicas são condutores mais eficientes de energia. (HELLIER, 2003).

d) Convecção

É a transferência de energia entre uma superfície sólida (T_b) e um fluido adjacente em movimento (T_f). A taxa de transferência de energia da superfície (\dot{Q}_c) para o fluido pode ser quantificada pela equação 20 (Lei de resfriamento de Newton):

$$\dot{Q}_c = h \cdot A(T_b - T_f) \quad (20)$$

O coeficiente de transferência de calor (h) é um parâmetro empírico que engloba em seu valor, a natureza do padrão de escoamento próximo à superfície, propriedades do fluido e geometria. “A” corresponde a área de transferência de energia. (MORAN et. Al, 2009).

e) Radiação

A energia é transportada por ondas eletromagnéticas (*fótons*), a radiação não precisa de um meio para se propagar, diferente dos mecanismos de condução e convecção, podendo até mesmo se propagar no vácuo. As superfícies sólidas, líquidas ou gasosas emitem ou transmitem radiação em vários graus (MORAN et. Al, 2009). A taxa de transferência a partir de uma área A é quantificada pela lei de Stefan-Boltzmann (equação 21):

$$\dot{Q}_r = \varepsilon \cdot \sigma \cdot A \cdot T_b^4 \quad (21)$$

Onde, T_b é a temperatura absoluta da superfície (K), ε a emissividade, que indica a eficiência da superfície radiante ($0 \leq \varepsilon \leq 1$), e σ a constante de Stefan-Boltzmann.

f) Normas

Algumas normas brasileiras e internacionais que regulamentam o ensaio por termografia estão listadas a seguir (POSSI; REBELO, 2017):

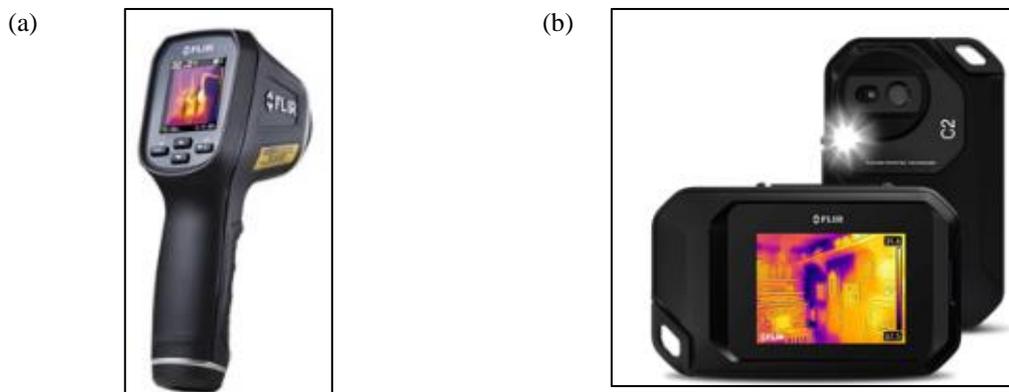
- ABNT NBR 15572:2013 – Ensaio não destrutivo – Termografia por infravermelho – Guia para inspeção de equipamentos elétricos e mecânico;
- ABNT NBR 15424:2006 – Ensaio não destrutivo – Termografia – Terminologia;

- ABNT NBR 15763:2009 – Ensaios não destrutivos – Termografia – Critérios de definição de periodicidade de inspeção em sistemas elétricos de potência;
- ABNT NBR 15866:2010 – Ensaio não destrutivo – Termografia – Metodologia de avaliação de temperatura de trabalho de equipamentos em sistemas elétricos;
- ASTM C 1060-11a (2015) – Standard Practice for Thermographic Inspection of Insulation Installations in Envelope Cavities of Frame Buildings
- ISO 10880 (2017) – Non-destructive testing - Infrared thermographic testing - General principles;
- EN 1767 (1999) - Products and systems for the protection and repair of concrete structures. Test Methods. Infrared analysis.

4.8.7.2 Equipamentos e acessórios

As partes que compõem um termógrafo são lentes, detectores, visores e um sistema de armazenamento de dados. As lentes servem para focar a radiação infravermelha que atinge os detectores, algumas lentes infravermelhas são opacas a luz visível, os materiais mais utilizados para as lentes são germânio, silício e seleneto de zinco (ZnSe). Os detectores são sensores que captam a radiação e geram respostas mensuráveis, usualmente são compostos por siliceto de platina (PtSi), telureto de mercúrio e cádmio (HgCdTe) e antimoneto de índio (InSb). Os resultados apresentados em um visor são interpretados por um inspetor, conforme apresentado na figura 47.

Figura 47 – Aparelhos de termografia industrial. (a) câmera térmica pontual, TG165 (b) câmera termográfica de bolso, FLIR C2.



Fonte: INSTRUTEMP (2018).

a) Processamento de dados

As imagens são importadas para um computador e abertas em um software para edição, é possível fazer ajustes de parâmetros como emissividade, temperatura, paleta de cores, também podem ser exibidos gráficos com informações úteis para a inspeção. Também podem ser usados filtros para suavizar a temperatura e o ruído (alta frequência) provocados por fontes externas. Um aprimoramento que pode ser realizado em uma imagem é substituir matematicamente o valor de um pixel pela média dos 4 pixels mais próximos a ele, esta técnica reduz o ruído na imagem. (POTET, 1987).

4.8.7.3 Técnicas de inspeção

Algumas técnicas envolvem ferramentas ou equipamentos especializados, por exemplo, lasers usados para aquecer a amostra, enquanto outras simplesmente aumentam o fluxo de energia térmica no corpo de prova, como por exemplo, molhar a superfície de um tanque para tornar visível seu nível.

a) Técnica do estado estacionário

São utilizadas para detectar anomalias em que a temperatura altera muito pouco com o tempo. Por exemplo, uma linha de vapor em funcionamento regular ao ser inspecionada pode apresentar pontos de calor, este tipo de problema produz grandes diferenças na temperatura e gera imagens facilmente interpretáveis. Geralmente, as anomalias devem ser grandes, próximas a superfície, ou criar grande variação de temperatura para ser detectada com este método. (NUNES, R. M. et al, 2018).

b) Tempo real

É utilizado para identificar anomalias nas quais a temperatura varia rapidamente durante o tempo, as anomalias aparecem ou desaparecem de um instante para o outro. Por exemplo, uma fuselagem de avião com corrosão escondida, a estrutura pode ser aquecida e deixada resfriar ao ar, área com pontos de corrosão resfriarão um pouco mais rápido que o resto da estrutura, revelando a anomalia. (NUNES, R. M. et al, 2018).

4.8.7.4 Aplicações

A termografia pode ser utilizada em inspeções preventivas de qualquer sistema no qual determinado comportamento de temperatura é um indicativo de anomalia. É uma técnica que pode ser aplicada em equipamentos frios e quentes, para controle de processos, equipamentos

eletrônicos, na indústria aeroespacial, pesquisas acadêmicas, verificação de nível de tanques, entre outras.

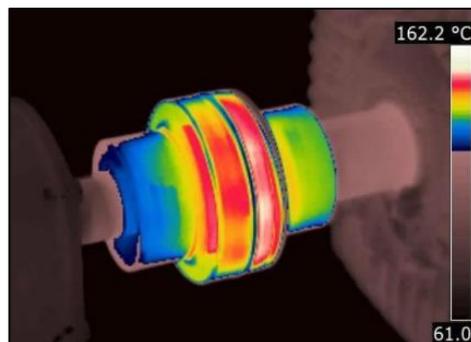
a) Inspeções eletrônicas

A termografia é muito utilizada para inspeção da integridade de sistemas eletrônicos, embora não seja um indicador de todos os problemas elétricos, a elevada temperatura em alguns componentes eletrônicos pode preceder uma falha elétrica ou até um acidente. Devido a um curto circuito no sistema de ar condicionado o edifício Joelma, na cidade de São Paulo em 1974, entrou em chamas, deixando 187 mortos e 300 feridos (O GLOBO, 2019).

b) Inspeções mecânicas

Há uma diversidade de equipamentos que podem ser inspecionados via termografia na indústria mecânica, por exemplo, equipamentos rotativos (atrito excessivo - rolamentos e engrenagens – figura 48), purgadores, tanques, refratários (carrinhos torpedos, caldeiras e fornos), identificação de fluxo térmico não uniforme, refrigeração ou aquecimento inadequado ou vazamento de ar. O aquecimento de superfícies pode ocorrer por atritos anormais, e a termografia permite localizar estas regiões de atritos excessivos, evitando prejuízos.

Figura 48 – Termografia do acoplamento de motor elétrico.

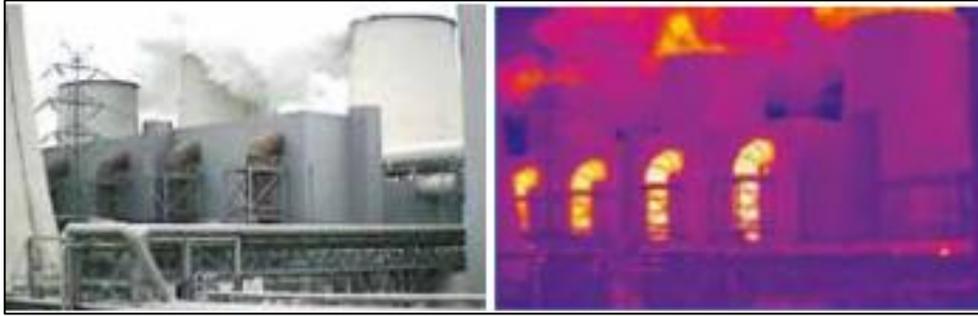


Fonte: Indústria40 (2016).

c) Tubulações

Imagens térmicas também fornecem informações importantes sobre a condição de tubulações, inspecionar a integridade de uma estrutura de isolamento de tubulação pode ser crucial, perda de calor devido a avarias no isolamento de tubulações pode ser facilmente observadas com uma termografia, figura 49, permitindo atuar no problema evitando maiores problemas. Alguns dos principais problemas encontrados em tubulações são vazamentos e avarias no isolamento. (FLIR).

Figura 49 – Inspeção de isolamentos.

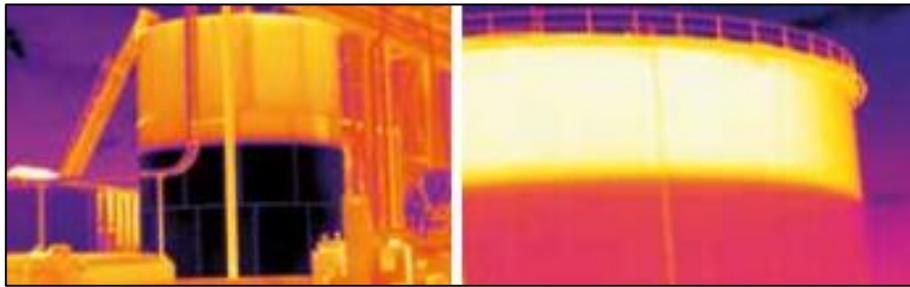


Fonte: FLIR (2019).

Medida de nível

Termografia pode identificar o nível do tanque ou silo de uma instalação, devido a diferenças nas temperaturas o nível dos líquidos pode ser facilmente visualizado, conforme mostrado na figura 50.

Figura 50 – Imagem termográfica do nível do líquido em tanques.



Fonte: FLIR (2019)

4.8.7.5 Vantagens e limitações do ensaio por termografia

No quadro 9, a seguir, estão apresentadas algumas vantagens e limitações do ensaio por termografia.

Quadro 9 – Vantagens e limitações do ensaio por termografia

Vantagens	Limitações
Inspeção rápida.	Só mostra o padrão térmico da superfície do objeto.
Pode criar imagens termais.	O padrão térmico é o resultado da transferência de calor abaixo da superfície ou do calor retido na

	superfície.
Não há necessidade de interromper o processo de produção para executar a análise.	Interferências ambientais.

Fonte: (HELLIER, 2003 e SEMANPI)

5 RESUMO DOS ENSAIOS ABORDADOS

Para facilitar o entendimento do conteúdo abordado foi criado uma escala, tabela 4, que apresenta parâmetros relevantes e inerentes a cada um dos ensaios discutidos. A execução do ensaio, que diz respeito a sequência de passos necessárias para execução dos ensaios foi classificada como simples, intermediária e complexa. A geometria dos corpos de prova é relevante pois alguns ensaios apresentam limitações quanto a detecção de descontinuidades a depender da espessura, da forma ou do local de aplicação do ensaio. A interpretação do ensaio pode ser do tipo fácil, médio ou difícil pois varia de acordo com a teoria relacionada ao ensaio. Os ensaios apresentam limitações quanto a detecção de descontinuidades, alguns são capazes de detectar descontinuidades superficiais, subsuperficiais ou ambas, outros também são capazes de aferir outras coisas além de descontinuidades. Alguns dos procedimentos abordados podem ser automatizados ou participar da automação industrial, facilitando a classificação de descontinuidades e tomada de decisão. O material ensaiado é importante pois algumas técnicas são dependentes de propriedades magnéticas preexistentes na peça, o estado da superfície também é relevante pois os ensaios retiram dados a partir da superfície da amostra. O custo é também um fator importante para a escolha do ensaio, porém é necessário também compreender o valor entregue pela técnica e o seu custo-benefício. As técnicas abordadas devem ser realizadas diante de condições controladas de saúde, segurança ao inspetor e ao meio ambiente.

Tabela 4 – Parâmetros criados para avaliar os ensaios

Descrição do parâmetro	Escala
Execução do ensaio	Simples / Intermediário / Complexo
Geometria dos corpos de prova	Relevante / Não relevante
Interpretação resultados	Fácil / Médio / Difícil
Detecção das descontinuidades	Superficial / Subsuperficial
Automatização	Sim / Não
Material do corpo de prova	Descrição
Custo	Baixo / Elevado
Riscos à Saúde e Segurança	Baixo / Requer cuidados / Elevado
Riscos ao meio-ambiente	Baixo risco / Requer cuidados

Fonte: O Autor (2021).

O Quadro 10 mostra a classificação dos ensaios quanto os parâmetros apresentados anteriormente.

Quadro 10 – categorização dos ensaios de acordo com os parâmetros elencados

Ensaio	Execução do ensaio	Geometria do corpo de prova	Interpretação dos resultados	Detecção das discontinuidades	Automatização	Material do Corpo de prova	Custo	Riscos à Saúde e Segurança	Riscos ao meio-ambiente
Inspeção Visual	Simple	Relevante	Fácil	Superficiais	Sim	Todos	Baixo	Baixo	Baixo
Líquido penetrante	Simple	Não relevante	Fácil	Superficiais	Não	Não poroso ou absorvente	Baixo	Baixo	Baixo
Partículas magnéticas	Simple	Relevante	Fácil	Superficiais e subsuperficiais	Sim	Ferromagnéticos	Baixo	Requer cuidados	Baixo
Radiografia industrial	Complexo	Relevante	Médio	Superficiais e subsuperficiais	Não	Maioria dos materiais	Elevado	Elevado	Elevado
Ultrassom	Intermediário	Relevante	Fácil	Subsuperficiais, volume de tanques.	Sim	Ferrosos ou não ferrosos	Baixo	Baixo	Baixo
Correntes parasitas	Intermediário	Relevante	Difícil	Detecção de discontinuidades, etc.	Sim	Ferromagnéticos ou não ferromagnéticos	Baixo	Baixo	Baixo
Termografia	Simple	Não relevante	Fácil	Superficiais	Sim	Todos	Baixo	Baixo	Baixo

Fonte: O Autor (2021).

a) Inspeção visual

O ensaio de inspeção visual pode ser realizado ao longo de todo processo produtivo a olho nu ou por meio de câmeras, a execução do ensaio é simples e consiste na apreciação de uma superfície a procura de descontinuidades, é um ensaio que pode ser otimizado com boroscópio para observação de orifícios, com espelhos, com drones ou câmeras especiais. A interpretação dos resultados varia com a necessidade de aplicação, mas em geral são simples. O custo para a realização de um ensaio visual é relativo, considerando um ensaio a olho de um operador o custo pode ser considerado relativamente baixo, mas a aquisição de câmera e drones para avaliação de áreas pouco acessíveis para humanos torna a inspeção mais custosa. É uma técnica que pode apresentar baixo risco ambiental e à segurança do operador.

b) Líquido penetrante

O ensaio por líquidos penetrantes obedece a uma sequência de etapas relativamente simples, o que torna o tempo de treinamento inferior em relação a outros ensaios. A geometria e o tamanho das peças também não apresentam problemas para aplicação da técnica, porém para alguns tipos de indústrias como a alimentícia, hospitalar e farmacêutica esta técnica não seja adequada para ensaio em peças com geometria complexa, pois resquícios do líquido podem permanecer nas peças e interferir na qualidade dos produtos. O penetrante detecta apenas descontinuidades presentes na superfície da peça podendo inclusive detectar descontinuidades na ordem de 0,001 mm de largura, e os resultados, que são de fácil interpretação, surgem com a aplicação do revelador e são avaliados pelo operador. O material ensaiado não pode ser poroso ou absorvente para não promover falsos positivos na avaliação do operador. Um bom líquido penetrante não deve ser tóxico, alguns são inclusive biodegradáveis.

c) Partículas magnéticas

A metodologia de aplicação das partículas magnéticas é simples, consiste na magnetização da peça ferromagnética e aplicação do pó, porém faz-se necessário conhecer a técnica de magnetização mais adequada para a situação, que podem ser a do condutor central, do Yoke ou da bobina, cada uma possui uma aplicação específica. Trata-se de uma técnica que requer conhecimento sobre eletromagnetismo e técnicas de desmagnetização por parte do operador. É um ensaio que pode ser utilizado em praticamente qualquer forma de peça, todavia o operador deve ter cuidado com geometrias que afetem a uniformidade do campo magnético, também é uma boa prática inspecionar em mais de um sentido para garantir a existência de descontinuidade. Os tipos de descontinuidades detectáveis são as superficiais e as subsuperficiais. Quanto a avaliação dos resultados, são de fácil interpretação. É uma

técnica segura, mas pode danificar o elemento ensaiado devido ao aquecimento ou aparecimento do arco elétrico, é importante analisar o ambiente de ensaio para não provocar incêndios por conta da geração do arco elétrico. O custo dos equipamentos para realização de ensaios por partículas magnéticas pode ser considerado baixo, embora seja mais elevado que o custo dos produtos para ensaio por líquido penetrante.

d) Radiografia Industrial

O ensaio por radiografia industrial é bastante preciso, versátil e com elevada resolução, permitindo examinar vários formatos de peças. O aprendizado das técnicas de radiografia precisa de tempo e dedicação. Por possuir uma fonte radioativa é um ensaio que requer bastante atenção e controle de área, ao ser realizado um ensaio é importante limitar e isolar a região, ter luzes de alerta, sinalizações de advertência, alarme sonoro e monitor de radiação, além de verificações de rotina que devem ser realizadas para evitar acidentes. Os equipamentos e acessórios para realização deste ensaio são caros. A interpretação dos dados depende da orientação das discontinuidades, e é obtida após a revelação do filme, que dificulta a velocidade de obtenção dos resultados. A geometria do material interfere na aquisição das imagens, materiais com densidade e espessuras elevadas dificultam a passagem da radiação.

e) Ultrassom

É um ensaio que requer grande grau de conhecimento teórico e experiência, para escolher os transdutores adequados e aplicação da técnica mais eficaz, este ensaio é capaz de detectar discontinuidades superficiais e subsuperficiais, porém quando as discontinuidades são orientadas de modo paralelo ao feixe de ondas a detecção é dificultada. Os resultados são apresentados em um visor digital e não necessitam de etapas intermediárias como no processo de radiografia industrial que necessita de revelação do filme para avaliação dos resultados. Os acoplantes são líquidos não tóxicos, que podem ser utilizados em superfícies com temperaturas baixas ou elevadas de até 675°C (OLYMPUS). É um procedimento que pode receber automação, ser realizado em ambientes de difícil acesso e facilita o andamento da produtividade. O ultrassom pode ser aplicado em materiais ferrosos ou não ferrosos, como fibra de carbono (REZENDE, 2011). É um ensaio que apresenta uma boa relação custo benefício.

f) Correntes parasitas

O ensaio por correntes parasitas é de execução relativamente simples, não requer agente acoplante, como no ensaio por ultrassom e é necessário apenas uma sonda e um campo magnético. A teoria do ensaio é de difícil compreensão, portanto, cabe ao inspetor maior

tempo de estudo e experiência para o domínio da técnica. Os resultados são obtidos instantaneamente no visor do equipamento. A amostra deve ser condutora, embora seja possível medir espessuras de revestimentos não condutores usando técnicas de *lift-off*. É um ensaio seguro, não há perigo de contaminação ou radiação, também não é necessário preparação superficial da peça para o ensaio e nem contato entre a sonda e a superfície, prevenindo o desgaste por atrito. Este método permite medir a espessura de um revestimento não condutor de em um metal condutor, identificar diferenças na composição de um material, detectar fissuras, vazios ou inclusões, portanto possui aplicações que vão além da detecção de discontinuidades. O custo do equipamento é relativamente baixo, comparando a quantidade de benefícios com relação ao custo do aparelho.

g) Termografia

A termografia permite uma inspeção rápida, tanto a técnica quanto a interpretação da inspeção são simples, é um ensaio que pode ser aplicado no meio de processo produtivo sem intervenção. O ensaio não oferece riscos ao inspetor nem ao ambiente. As transferências de calor presentes no ambiente podem afetar os resultados do ensaio, visto que a termografia apresenta um padrão térmico das variações de temperatura na superfície de uma estrutura. Este ensaio permite a avaliação de temperatura de uma estrutura a distância e envia as imagens para um monitor, evitando que alguém se exponha ao risco.

6 CONCLUSÕES

A inspeção visual a olho nu é o ensaio mais antigo utilizado pela humanidade, e consiste na observação da superfície de um objeto a procura de irregularidades, porém é limitado a visão humana, com o passar dos anos foram desenvolvidos equipamentos para otimizar a inspeção visual.

Os demais ensaios são mais sensíveis que a inspeção visual e o desenvolvimento tecnológico foi o que possibilitou a ampliação da capacidade de detecção de descontinuidades. Os ensaios por partículas magnéticas, radiografia e ultrassom trouxeram consigo a capacidade de inspeção subsuperficial de amostras, aumentando mais ainda a segurança de estruturas através da avaliação dos inspetores.

Cada um dos ensaios apresentados possui vantagens e limitações, alguns requerem maior nível de segurança, como radiografia industrial e outros maior conhecimento teórico e técnico para interpretação dos dados como correntes parasitas e o ensaio por ultrassom. Outros ensaios permitem analisar temperaturas de um equipamento, como é o caso da termografia. Determinados ensaios podem ser automatizados ou transmitir dados a distância sem que seja necessário a presença de um inspetor na área, promovendo maior velocidade na tomada de decisão e obtenção dos resultados, além de garantir a segurança do colaborador. É importante que o inspetor conheça todos os aspectos do ensaio para obter resultados confiáveis.

A realização deste estudo permitiu conhecer os principais tipos de ensaios não destrutivos existentes que são aplicados nas indústrias alimentícia, têxtil, automobilística, metalúrgica, nuclear, aeroespacial, naval, do petróleo e afins. Também foram apresentados princípios e teorias físicas que governam estes ensaios e metodologias de aplicação que garantem a repetibilidade dos ensaios com resultados relevantes para a tomada de decisão.

Este estudo também possibilitou aprofundar mais os conhecimentos técnicos e teóricos sobre os ensaios não destrutivos, que são importantes para o cotidiano de um engenheiro de materiais, tendo em vista que uma das fortes áreas de atuação do engenheiro é a caracterização e a análise de materiais, ou de qualquer engenheiro que trabalhe na gestão da qualidade ou manutenção em uma indústria.

7 PERSPECTIVAS FUTURAS

- Desenvolver outros tópicos com estudos de casos relacionados as técnicas apresentadas, explorando com maior refino esses ensaios em materiais.
- Publicação de artigos referentes ao assunto abordado.
- Adaptação do trabalho para a elaboração de um livro/apostila.
- Desenvolver outra revisão bibliográfica sobre os Ensaio Destrutivos e suas aplicações no meio industrial

REFERÊNCIAS

- ABINCOR BINZEL. **7 defeitos mais comuns na soldagem, causas e soluções**. 2019. Disponível em: <https://blog.binzel-abicor.com/pt/7-defeitos-mais-comuns-na-soldagem-causas-e-solucoes>. Acesso em: 13 mai. 2020.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM: Standard Guide for Computed Radiography (E2007 – 10)**. Estados Unidos, 2006.
- ANDREUCCI, R. **Aplicação Industrial - Ensaios por líquidos penetrantes**. São Paulo: Abendi, 2016.
- ANDREUCCI, R. **Partículas magnéticas**. São Paulo: Abendi, 2016.
- ANDREUCCI, R. **Radiologia Industrial**. São Paulo: Abendi, 2017.
- AUTEL. **Maxivideo MV400**, 2021. Disponível em: <https://www.autel.com/c/www/special/3273.jhtml>. Acesso em 15 mai. 2020.
- BARKOKÉBAS JÚNIOR, B.; VASCONCELOS, B. M.; MONTEIRO, M. M.; MACEDO, D. R. M.; RAMOS, A. S. C. Ensaios não destrutivos por líquido penetrante como ferramenta de auxílio à manutenção preditiva de equipamentos de elevação da construção civil. *In: ENCONTRO NACIONAL DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO*, 30., 2010, São Carlos, São Paulo. **Anais [...]**. São Carlos: UFScar, 2010.
- BAVENDIEK, K.; HEIKE, U.; MEADECW, D.; ZSCHERPEL, U.; EWER, U. **New digital radiography procedure exceeds film sensitivity considerably in aerospace applications**. Alemanha: ECNDT, 2006. p. 16.
- BCEND. **Correntes parasitas: precisão e alta sensibilidade na detecção de defeitos**. Disponível em: <https://bcend.com.br/correntes-parasitas-precisao-e-alta-sensibilidade-na-deteccao-de-defeitos/>. Acesso em: 1 abr. 2021.
- BEJAXHIN, A. B. H.; PAULRAJ, G.; PRABHAKAR, M. Inspection of casting defects and grain boundary strengthening on stressed Al6061 specimen by NDT method and SEM micrographs. **Journal of Materials Research and Technology**, v. 8, n. 3, p. 2674-2684, mar/jun 2019.
- BOWLER, N. **Eddy-current nondestructive evaluation**. Iowa: Springer, 2019.
- BRASIL ESCOLA. **O que é efeito fotoelétrico?** Disponível em: <https://brasilecola.uol.com.br/o-que-e/fisica/o-que-e-efeito-fotoeletrico.htm>. Acesso em: 26 fev. 2021.
- CALLISTER, W.D.; RETHWISCH, D.G. **Ciência e engenharia dos materiais: uma introdução**. 10 ed. Rio de Janeiro: LTC, 2020.
- CANTÚ, R.M. **Desenvolvimento de um dispositivo de realização de ensaios não destrutivos em metais por correntes de Foucault**. 2013. TCC (Bacherelado em Engenharia de Controle e Automação) - UNIVATES, Santa Catarina, 2013.

COPERTEC. **Partículas magnéticas**. 1. ed. São Paulo, 2018.

CORROSION-DOCTORS. **1988** – The Aloha incident. Disponível em: <https://www.corrosion-doctors.org/Aircraft/Aircraft.htm>. Acesso em: 05 mai. 2021.

DYNAGARD. **Intelligent pigging**: the smart way to find corrosion. Disponível em: <https://www.dynagard.info/intelligent-pigging-smart-way-find-corrosion/>. Acesso em: 05 mai. 2021.

ENKVIST, J. A study of operator performance in a visual NDT inspection task by remote video camera. **Insight – Non-Destructive Testing and Condition Monitoring**, v.45, n. 4, p. 252 – 257, abr. 2003.

FLIR. **Thermal imaging guidebook for industrial applications**. Disponível em: https://www.flir.com/globalassets/guidebooks/thermal-imaging-guidebook-for-building-and-renewable-energy-applications.pdf?j=3194&sfmc_sub=4030349&l=20 HTML&u=46266&mid=100032793&jb=33595. Acesso em: 13 mai. 2020.

FUVESTIBULAR. **Aula 19 - líquidos penetrantes**. Disponível em: <http://fuvestibular.com.br/downloads/apostilas/Telecurso-2000/metal-mecanica/ensaios-de-materiais/19-liquidos-penetrantes.pdf?x66929> Acesso em: 05 mai. 2021.

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

GODOI W. C.; LACTEC, R. R. S.; SWINKA, V.F.; COPEL, L; COPEL, T.L.; **Desenvolvimento de um sistema de radiografia digital portátil para a detecção de defeitos em isoladores poliméricos**. Campinas, SP: CGTI, 2016.

GUI, Z., LI, H. **Automated defect detection and visualization for the robotic airport runway inspection**. IEEE Acesso em: 6 mai. 2020.

GUIMARÃES FILHO, S. **Controle da qualidade em indústrias mecânicas pesadas**. 2009. TCC (Graduação) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2009.

HALLIDAY, D.; RENISK. R.; WALKER, J. **Fundamentos de Física**. 10 ed. Rio de Janeiro: LTC, 2016. v. 3.

HALLIDAY, D.; RENISK. R.; WALKER, J. **Fundamentos de Física**. 10 ed. Rio de Janeiro: LTC, 2016. v. 4.

HALLIDAY, D.; RENISK. R.; WALKER, J. **Fundamentos de Física**. 10 ed. Rio de Janeiro: LTC, 2016. v. 2.

HALMSHAW, R.; ARNOLD, E. **Nondestructive testing**, 1987.

HANSEN, J. The eddy current inspection method: Part 1. **History and electrical theory**, v. 46, n. 5, p. 279-281, mai 2004.

HELERBROCK, R. **O que é efeito fotoelétrico?**; Brasil Escola, 2020. Disponível em: <https://brasilecola.uol.com.br/o-que-e/fisica/o-que-e-efeito-fotoeletrico.htm#>. Acesso em: 20 abr. 2020

HELLIER, C. J. **Handbook of nondestructive evaluation**. New York: McGraw-Hill, 2003.

JUNJI, M. Imaging Plate. *In*: YUKIO, T.; TAKESHI, L.; MASAO, T. **Computed Radiography**, Tokio: Springer, 1987. p. 1-3.

KELLER W. J.; PESSIKI, S. Experimental Validation of a Numerical Model for Simulating Radiographic Imaging of Portland Cement-Based Materials. **Journal of Nondestructive Evaluation**, v. 34, p. 18, set, 2015.

KHANACADEMY. **O que é energia térmica?**. Disponível em: <https://pt.khanacademy.org/science/physics/work-and-energy/work-and-energy-tutorial/a/what-is-thermal-energy>. Acesso em: 12 mai. 2020.

KHANACADEMY. **O que é fluxo magnético?**. Disponível em: <https://pt.khanacademy.org/science/physics/magnetic-forces-and-magnetic-fields/magnetic-flux-faradays-law/a/what-is-magnetic-flux>. Acesso em: 07 abr. 2020.

LIAN, J.; WANG, L.; LIU, T.; DING, X. YU, Z. Automatic visual inspection for printed circuit board via novel Mask R-CNN in smart city applications. **Assessments**, v. 44, abr. 2021.

LUNDGREN, E. A. J. **Avaliação da integridade da união de chapas navais por soldagem com alto grau de distorção utilizando radiografia digital**, 2010. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2010.

MADRUGA, C. L. M.; SILVA, T. R.; GUEDE, J. R. A. Medidor de nível ultra-sonico. *In*: ENCONTRO LATINO AMERICANO DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA, 13.; ENCONTRO LATINO DE PÓS-GRADUAÇÃO, 9., 2011, São José dos Campos. **Anais [...]**. São José dos Campos: Univap, 2011.

MAGNAFLUX. **Equipamento para inspeção por partículas magnéticas**. 2018. Disponível em: <https://magnaflux.com.br/produtos/particulas-magneticas/equipamentos/#Unidades-de-Magnetizacao>. Acesso em: 7 abr. 2020.

MAIA, F. P. *et al.* O estudo da qualidade da solda em chapas de alumínio naval através do ensaio não destrutivo. *In*: REUNIÃO ANUAL DA SBPC, 63., 2011, Góias. **Anais [...]**. Góias: UFG, 2011.

MARQUES, B. S. B. **Aplicação da técnica de correntes parasitas para detecção de trincas em aço Duplex 2205 com diferentes tratamentos térmicos**, 2017. TCC (Bacharelado em Engenharia Mecânica) – Escola Politécnica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2017.

MENDONÇA, E. A. M. *et al.* Sanidade superficial e a variação da distância do bico de contato/peça. *In*: REUNIÃO ANUAL DA SBPC, 63., 2011, Goiânia. **Anais [...]**. Goiânia: UFG, 2011.

MERÇON, F.; GUIMARÃES, P.D.I.C.; MAINIER, F.B. Corrosão: Um exemplo usual de fenômeno químico. **Química Nova na Escola**, n. 19, p.1-2, mai. 2004.

MIRZAPOUR, M.; YAHAGHI, E.; MOVAFEGHI, A. The performance of three total variation based algorithms for enhancing the contrast of industrial radiography images. **Research in nondestructive evaluation**, v. 32, n. 1, p. 10-23, out. 2020.

MIYAHARA, J. **Imaging plate**; computed radiography, 1987.

MORAES, L. A. B. **Caracterização de macro e micro-inclusões em aços acalmados ao alumínio produzidos por lingotamento contínuo**. 2011. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2009.

MORAN M. J., SHAPIRO H. N., BOETTNER D. D., BAILEY M. B. **Princípios de termodinâmica para engenharia**. 7. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2009.

NAKAJIMA, R.; YAMAMOTO, R.; HIDA, T.; MATSUMOTO, T. A Study on the Effect of Defect Shape on Defect Detection in Visual Inspection. **Procedia manufacturing**, v. 39, p. 1641-1648, fev. 2019.

NOGUEIRA, R. **O que é efeito Piezoelétrico?** BCEND, 2011. Disponível em: <https://bcend.com.br/o-que-e-efeito-piezoelétrico/>. Acesso em 15 mai 2020.

NUNES, R. M. et al. **ASM Handbook: nondestructive evaluation and quality control**. Cleveland, Ohio: ASM International: 2018. v. 17.

O GLOBO. **Fotos e relato cronológico relembram incêndio no Edifício Joelma, em São Paulo, que deixou 187 mortos, há 45 anos**. 2019. Disponível em: <https://blogs.oglobo.globo.com/blog-do-acervo/post/relembre-o-incendio-do-edificio-joelma-uma-das-maiores-tragedias-do-pais-completa-45-anos.html>. Acesso em: 13 mai. 2020.

OLIVEIRA, L.S.R. **Notas de aula ensaios não destrutivos (END)**. 2013. Disponível em: https://aprender.ead.unb.br/pluginfile.php/339292/mod_resource/content/1/Notas_aula_END_2013.pdf. Acesso em: 27 mar. 2020.

OLYMPUS. **Tutorial sobre phased array o que eles fazem?**. Disponível em: <https://www.olympus-ims.com/pt/ndt-tutorials/intro/pa-systems/>. Acesso em: 1 mai. 2020.

PEREIRA, A. S.; BUSCHINELLI, A. J. A.; NIÑO, C. E.; KEJE, N. Z. Soldagem em Operação de Dutos de Alta Resistência e Baixa Espessura com Ênfase nas Trincas a Frio. **Soldagem & Inspeção**, São Paulo, vol.17, n. 2, p.088-095, abr/jun 2012.

PEREIRA, D. **Avaliação do método de correntes parasitas para caracterização microestrutural e inspeção de defeitos em surperligas à base de níquel**, 2014. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Minas, Metalúrgica e Materiais) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2014.

PORTAL EDUCAÇÃO. **Radiografia: introdução e história**. 2016. Disponível em: <https://siteantigo.portaleducacao.com.br/conteudo/artigos/educacao/radiografia-introducao-e-historia/35843>. Acesso em: 17 abr. 2020.

PORTUGAL. ASSOCIAÇÃO DE LABORATÓRIOS ACREDITADOS. **Certificação de técnicos de ensaios não destrutivos de acordo com a norma EN ISO 9712:2012**. Lisboa: RELACRE; OCP, 2019. Disponível em: https://www.relacre.pt/assets/relacreassets/files/personnelcertification/DDE_CER_010.pdf Acesso em: 25 fev. 2021.

POTET, P.; JEANIN, P.; BATHIAS, C. The Use of Digital Image Processing in Vibrothermographic Detection of Impact Damage in Composite Materials. **Materials Evaluation**, v. 45, p. 466-470, abr, 1987.

PROFISSIONAL DO AÇO. **Aço ASTM-A36 e sua utilização**. 2013. Disponível em: <https://www.profissionaldoaco.com.br/materia/aco-astm-a36-e-sua-utilizacao>. Acesso em 1 abr. 2021.

REBELO, D. F. F. **Avaliação quantitativa dos resultados da termografia de infravermelhos aplicada ao estudo da humidade**. 2017. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Faculdade de Engenharia, Universidade do Porto, Porto, 2017.

REVISÃO de literatura. Disponível em: <https://www.maxwell.vrac.puc-rio.br/24444/244443.pdf>. Acesso em: 16 abr. 2020.

SHINOHARA A. H, et al. Sistema Radiográfico Digital para Detecção de Defeitos Internos nos Isoladores Poliméricos em Linhas de Transmissão de 500 kV Energizada. *In: CLAGTEE*, 12, 2017, Mar del Plata. **Anais [...]** Mar del Plata, Argentina, 2017.

SILVA, B. C. A. **Estudo das incertezas na medição de espessura por ultrassom em peças aeronáuticas**. 2012. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica e Tecnologia de Materias) - CEFET/RJ, Rio de Janeiro, 2012.

SINTROL. **Ultrasonic transducers**. Disponível em: <https://www.sintrol.fi/images/Esitteet/Ultraaniluoaimet.pdf>. Acesso em: 15 abr. 2020.

SOUSA, G.R.; NOBRE, I.G.; POSSI, M. Ensaio termográficos. *In: CLAMPER. Inspeção de instalações elétricas*, p. 46-49.

SOUZA, S. C. **Estrutura e fotoluminescência do sistema SrSnO₃:Nd³⁺**. 2009. Tese (Doutorado em Química) - Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2009.

STEIN, R. M. **Estudo da técnica de ensaio não-destrutivo ultrassom phased array**. 2017. TCC (Graduação em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2017.

TANTENO, Y.; IINUMA, T.; TAKANO M. **Computed radiography**. 1. ed., Tóquio: Springer-Verlag, 1987. p. 12-13.

TONIDANDEL, D. A. V.; ARAÚJO, A. E. A.; BOAVENTURA, W. C. História da Eletricidade e do Magnetismo: da Antiguidade à Idade Média. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 40, n. 4, p. 1-3, 2018.

VERMA H. C. Photoelectric effect and wave particle duality. *In: VERMA H. C. Concepts of physics*. Índia: Bharati Bhawan, 2011, v.2, p. 355-359.

VORPAGEL, M. **Integração de diferentes ferramentas para o estudo do comportamento eletromagnético em materiais macios sinterizados aplicados em máquinas elétricas.** 2017. TCC (Graduação em Engenharia Elétrica) - Universidade do Vale do Taquari, Lajeado, 2017.

YAHAGHI, E.; MOVAFEGHI, A.; MIRZAPOUR, M.; ROKROK, B., Defect detections in industrial radiography images by a multi-scale LMMSE estimation scheme. **Radiation Physics and Chemistry**, vol 168, mar 2020.

ZOLIN, I. **Ensaio mecânicos e análises de falhas.** 3 ed. Rio Grande do Sul: Colégio Técnico Industrial de Santa Maria, 2010.