



UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA
CENTRO DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

DAMIÃO GOMES OLIVEIRA

ENSAIOS NÃO DESTRUTIVOS: Fundamentos e Aplicações

JOÃO PESSOA – PB

2019

DAMIÃO GOMES OLIVEIRA

ENSAIOS NÃO DESTRUTIVOS: Fundamentos e Aplicações

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à banca examinadora do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade Federal da Paraíba como parte das exigências à obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. Dr. Marcelo Cavalcanti Rodrigues

JOÃO PESSOA – PB

2019

Catálogo na publicação
Seção de Catalogação e Classificação

O48e Oliveira, Damião Gomes.
ENSAIOS NÃO DESTRUTIVOS: Fundamentos e Aplicações /
Damião Gomes Oliveira. - João Pessoa, 2019.
46 f. : il.

Orientação: Marcelo Cavalcanti Rodrigues.
Monografia (Graduação) - UFPB/CT.

1. Ensaio Não Destrutivo. 2. Inspeção de Materiais e
Equipamentos. I. Rodrigues, Marcelo Cavalcanti. II.
Título.

UFPB/BC

DAMIÃO GOMES OLIVEIRA

ENSAIOS NÃO DESTRUTIVOS: Fundamentos e Aplicações

Trabalho de Conclusão de Curso – TCC, apresentado à banca examinadora do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade Federal da Paraíba como parte das exigências à obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica, tendo obtido a nota 8,0 (oito), conforme a apreciação da banca examinadora:

Aprovado em: 15 de maio de 2019

BANCA EXAMINADORA

Marcelo Cavalcanti Rodrigues

Prof. Dr. Marcelo Cavalcanti Rodrigues
Departamento de Engenharia Mecânica / Centro de Tecnologia / UFPB

David Domingos Soares da Silva

Esp. David Domingos Soares da Silva

Genilton de França Barros Filho

Esp. Genilton de França Barros Filho

Dedico este trabalho a minha família.

AGRADECIMENTOS

A Deus, por me conceder a graça de viver, pelo homem que me tornei e pelas conquistas alcançadas ao longo da vida.

Aos meus pais, Marinalva e Osmar, por terem cuidado de mim com todo amor e carinho. Mesmo com tantas dificuldades eles sempre fizeram o máximo para me dar uma vida digna, me educaram e criaram um homem decente, justo e batalhador.

Aos meus familiares em geral, que fazem parte da minha vida, acreditando e torcendo pelo meu sucesso.

A minha esposa, Nilcássia que logo dará à luz ao nosso filho, por dedicar tanto amor, carinho e paciência de forma incondicional.

Aos meus verdadeiros amigos, que permanecem integrados a minha história. Em especial: Luís Neto e Manoel Neto, por terem sido essências no despertar da minha aptidão pela área de exatas, além de grandes incentivadores.

A meu orientador, Prof. Marcelo, pela oportunidade, conselhos e paciência.

A todos os professores que me ajudaram nessa caminhada, pelo empenho em transmitir, da melhor maneira possível, seus conhecimentos relacionados às disciplinas acadêmicas, compartilhando experiência e sabedoria, participando efetivamente da minha formação como profissional e cidadão.

“Seja você quem for, seja qual for a posição social que você tenha na vida, a mais alta ou a mais baixa, tenha sempre como meta muita força, muita determinação e sempre faça tudo com muito amor e com muita fé em Deus, que um dia você chega lá. De alguma maneira você chega lá.”

(Ayrton Senna)

RESUMO

Ensaio Não Destrutivo (END) são técnicas utilizadas na inspeção de materiais e equipamentos sem danificá-los, sendo executadas nas etapas de fabricação, construção, montagem e manutenção. Essas técnicas constituem uma das principais ferramentas do controle da qualidade de materiais e produtos, contribuindo para garantir a qualidade, reduzir os custos e aumentar a confiabilidade da inspeção. Diversas técnicas podem ser aplicadas para detectar e dimensionar descontinuidades na superfície e no interior de um material. Entretanto, na maioria das vezes um único ensaio não é 100% eficiente, seja por restrição tecnológica ou mesmo por fatores humanos. Dessa maneira o uso de duas ou mais técnicas é aconselhado para que se obtenha um melhor resultado. Esta é uma questão importante para empresas detentoras dos segmentos petroquímico, siderúrgico, aeronáutico, nuclear, entre outras, as quais necessitam de um elevado grau de confiabilidade. Nesse trabalho serão abordadas as principais técnicas de ensaios não destrutivos, pois a constante busca por melhorias para atender as exigências da indústria atrai significativos investimentos em pesquisas na tecnologia em equipamentos de inspeção, dessa forma o objetivo desse trabalho é passar para o leitor o conhecimento no meio acadêmico e técnico acerca do tema estudado.

Palavras-Chave: Ensaio Não Destrutivo. Inspeção. Descontinuidades.

ABSTRACT

Non-destructive testing (NDT) are techniques used in the inspection of materials and equipment without damaging them, being performed on the stages of manufacture, construction, installation and maintenance. These techniques are one of the main tools of quality control of materials and products, helping to ensure quality, reduce costs and increase reliability of inspection. Various techniques can be applied to detect and size discontinuities on the surface and in the interior of a material. However, most of the time a single test is not 100% efficient, either through technological restriction or even human factors. In this way the use of two or more means are advised to obtain a better result. This is an important issue for companies holding of petrochemical segments, steel, aerospace, nuclear, among others, which require a high degree of reliability. This work will address the main non-destructive testing techniques, because the constant search for improvements to meet the requirements of the industry attracts significant investments in research on technology in inspection equipment, this form the objective of this work is to pass to the reader the knowledge in the academic and technical standards within the subject studied.

Keywords: Non-Destructive Testing. Inspection. Discontinuities.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 -	Esquema das etapas do ensaio por líquido penetrante	18
Figura 2 -	Princípio do ensaio de partícula magnética	19
Figura 3 -	Inspeção de materiais por ultrassom	21
Figura 4-	Arranjo básico utilizado para a realização do ensaio radiográfico	27
Figura 5 -	Princípio do ensaio radiográfico	29
Figura 6 -	Princípio do ensaio por correntes parasitas	31
Figura 7 -	Perturbação do fluxo de correntes parasitas provocado pela presença de uma trinca	32
Figura 8 -	Vaso de pressão horizontal em aço	34

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 -	Principais características dos Ensaios Não Destrutivos	15
Tabela 2 -	Etapas para realização do ensaio de Líquido Penetrante	17
Tabela 3 -	Tipos de Transdutores	22
Tabela 4 -	Técnicas de Inspeção por Ultrassom	25
Tabela 5 -	Princípios básicos do ensaio radiográfico	28
Tabela 6 -	Categorias de vasos de pressão	35

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

END – Ensaio Não Destrutivo

ABENDI – Associação Brasileira de Ensaio Não Destrutivo e Inspeção

LP – Líquidos Penetrantes

PM – Partículas Magnéticas

DDP – Diferencial de Potencial

EA – Emissão Acústica

SPIE – Serviço Próprio de Inspeção de Equipamentos

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	13
1.1 OBJETIVO GERAL	13
1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	13
2 REFERENCIAL TEÓRICO	14
2.1 ENSAIOS NÃO DESTRUTIVOS	14
2.2 INSPEÇÃO VISUAL	16
2.3 LÍQUIDO PENETRANTE	17
2.4 PARTÍCULAS MAGNÉTICAS	19
2.5 ULTRASSOM	21
2.5.1 Ondas Ultrassônicas	22
2.6 RADIOGRAFIA INDUSTRIAL	27
2.7 CORRENTES PARASITAS	30
2.8 EMISSÃO ACÚSTICA	33
2.9 VASOS DE PRESSÃO	33
3 UTILIZAÇÃO DE ENSAIOS NÃO DESTRUTIVO NA INDÚSTRIA E EM ESTUDOS ACADÊMICOS	36
3.1 ENDs APLICADOS À FABRICAÇÃO DE VASOS DE PRESSÃO	36
3.2 ENDs UTILIZADOS EM ESTUDOS ACADÊMICOS	40
CONSIDERAÇÕES FINAIS	42
REFERÊNCIAS	43

1 INTRODUÇÃO

As técnicas de inspeção não destrutivas evoluíram, principalmente a partir da década de 50, até se tornarem uma ferramenta indispensável ao controle de produção. Hoje os ensaios não destrutivos (END) são largamente utilizados na indústria moderna em todo o mundo para: caracterização de materiais; avaliação da qualidade e detecção de descontinuidades.

São considerados ensaios não destrutivos aqueles que quando realizados em peças acabadas ou semiacabadas não interferem nem prejudicam seu uso futuro ou processamento posterior. Uma característica interessante dos END é que eles geralmente medem indiretamente a propriedade de interesse.

A constante busca por melhorias para atender as exigências da indústria atrai significativos investimentos em pesquisas na tecnologia em equipamentos de inspeção. A partir da demanda industrial dos dias atuais, justifica-se o estudo proposto com o intuito de aprofundar as pesquisas acerca da técnica de inspeção por Ensaio Não Destrutivo.

Busca-se, a partir da monografia transmitir o conhecimento no meio acadêmico e técnico, pois entende-se, que a tecnologia de END permite uma melhor detecção das descontinuidades nos materiais, elevando a qualidade dos produtos gerados nas indústrias, mais precisamente o setor de vasos de pressão.

Este documento está dividido em três capítulos. O primeiro capítulo trata da introdução. No capítulo dois é apresentada uma revisão bibliográfica sobre os ensaios não destrutivos, abordando as principais técnicas utilizadas segundo a ABENDI, descrevendo seu princípio de funcionamento, aplicações voltadas ao setor de vasos de pressão, bem como suas vantagens e desvantagens. O terceiro capítulo apresenta as considerações finais desse estudo.

1.1 OBJETIVO GERAL

O objetivo geral do presente trabalho é descrever os fundamentos e aplicações dos ensaios não destrutivos.

1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- a) Descrever as técnicas mais utilizadas de ensaios não destrutivos, bem como vantagens e desvantagens de cada método.
- b) Mostrar as aplicações dos métodos ENDS em estudos acadêmicos e em vasos de pressão.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 ENSAIOS NÃO DESTRUTIVOS

A Associação Brasileira de Ensaios Não Destrutivos e Inspeção (ABENDI, 2018) trata de Ensaios Não Destrutivos (END) como técnicas utilizadas na inspeção de materiais e equipamentos para detectar defeitos, descontinuidades, visando manter a indústria e a própria sociedade, livre de acidentes.

Um defeito nada mais é do que uma descontinuidade que, por sua natureza, tipo, dimensões, localização ou efeito acumulado, torna a peça imprópria para uso, por não satisfazer os requisitos mínimos de aceitação da norma aplicável. Já uma descontinuidade é uma interrupção da estrutura típica de uma peça, no que se refere à homogeneidade de características físicas, mecânicas ou metalúrgicas (SILVA JÚNIOR & MARQUES, 2006).

Os Ensaios Não Destrutivos (END) são técnicas amplamente utilizadas nas indústrias na análise de falhas, que possuem a finalidade de detectar características e verificar propriedades mecânicas. Apesar das inúmeras vantagens dos END seu investimento é oneroso, muitos utilizam materiais consumíveis e só são manuseados por profissionais qualificados (LEITE, 2014).

Os END incluem métodos capazes de proporcionar informações a respeito do teor de defeitos de um determinado produto, das características tecnológicas de um material, ou ainda, da monitoração da degradação em serviço de componentes, equipamentos e estruturas (SANTOS, 1999). Eles são amplamente utilizados nos setores de petróleo/petroquímico, químico, aeroespacial, siderúrgico, naval, eletromecânico, entre outros.

A Tabela 1 apresenta um quadro sinóptico sobre os END mais usados comumente, cabendo ao inspetor de qualidade conhecer cada um deles e escolher qual o melhor para as suas peças, segundo critérios de custo operacional e de investimento, aplicação das peças, valor agregado e etc.

Tabela 1 – Principais características dos Ensaios Não Destrutivos

	Material Inspeccionado	Defeitos Localizados	Custo de Equipamentos	Custo Operacional
Líquido Penetrante	Metálico e não metálico	Superficiais	Sem custo	Alto
Partículas Magnéticas	Somente ferromagnéticos	Superficiais e internos	Médio a alto	Baixo
Correntes Parasitas	Metais ferrosos e não ferrosos	Superficiais	Médio a alto	Baixo
Raio X	Praticamente qualquer material	Internos	Alto	Alto
Ultrassom	Qualquer material que conduza som	Internos	Médio a alto	Médio

Fonte: REVISTA DO PARAFUSO (2009), adaptada pelo autor.

A escolha da técnica e métodos mais adequados de END requer um conhecimento em geral dos métodos mais utilizadas pela indústria, bem como de vários parâmetros do material ou do produto a analisar. Tais como: Características dos defeitos espectáveis (morfologia, dimensão e localização), o tipo de material a inspecionar (condutor, isolante, homogêneo ou poroso), a acessibilidade e as condições de inspeção (nomeadamente possibilidade de acoplamento de uma sonda, qual a temperatura de funcionamento do material, qual a acessibilidade à zona a inspecionar) (HELLIER, 2003).

De acordo com Hellier (2003), o número de métodos de END que pode ser usado para inspecionar vários tipos de materiais, equipamentos ou até mesmo para realizar medições é grande e continua a crescer, pois investigadores continuam a encontrar novas formas de aplicação da física e outras disciplinas científicas para desenvolver sofisticados métodos de Ensaios Não Destrutivos.

Os Ensaios Não Destrutivos mais utilizados são: inspeção visual, líquidos penetrantes, partículas magnéticas, ultrassom, radiografia industrial e correntes parasitas, os mesmos serão estudados com maior detalhe nas próximas seções.

2.2 INSPEÇÃO VISUAL

A inspeção por meio do Ensaio Visual é o primeiro ensaio não destrutivo aplicado em qualquer tipo de peça ou componente, estando associado a outros ensaios. A técnica proporciona um meio de detectar e analisar uma variedade de descontinuidades superficiais, como a corrosão, contaminação, acabamento superficial e trincas superficiais. A sua principal vantagem é fornecer dados quantitativos (além das informações qualitativas) mais facilmente que os outros END. Alguns testes são baseados nas leis da ótica geométrica e outros fazem uso das propriedades ondulatórias da luz. Este ensaio tem sido usado principalmente para a inspeção de: superfícies expostas ou acessíveis de materiais opacos e equipamentos parcial ou totalmente montados e objetos acabados; e, interior de objetos transparentes ou translúcidos, como o vidro, quartzo, alguns plásticos, além de líquidos e gases (SAMPAIO, 2009).

De acordo com Sampaio (2009), não existe processo industrial em que a inspeção visual não esteja presente. Simplicidade de realização e baixo custo operacional são as características deste método, mas que mesmo assim requer uma técnica apurada, devendo seguir procedimentos básicos que devem ser conhecidos e corretamente aplicados.

A inspeção visual é um ensaio largamente utilizado para avaliar as condições ou qualidade de uma solda ou componente onde uma rápida detecção e correção de defeitos significam economia. É de fácil execução, de baixo custo e comumente não requer equipamento especial. É considerado um método primário nos programas de controle de qualidade. Não existe processo industrial em que a inspeção visual não esteja presente. Simplicidade de realização e baixo custo operacional são as características deste método, mas que mesmo assim requer uma técnica apurada, devendo seguir procedimentos básicos que devem ser conhecidos e corretamente aplicados (MOREIRA, 2014).

No âmbito da soldagem, a sequência de cada ensaio visual se compõe de duas etapas: preparação da superfície e inspeção pelo método visual previsto no procedimento qualificado, sempre sob iluminação adequada. Há, porém, uma sequência correta de execução do ensaio, que normalmente é efetuado mais de uma vez ao longo de uma operação de soldagem. Desta maneira, evitam-se incorreções que trariam dificuldades para uma correção posterior, como por exemplo, ajuste incorreto de juntas (MILANESE, 2015).

De acordo com Lopes & Pellin (2010) o ensaio visual é o ensaio destrutivo de mais baixo custo permitindo detectar e eliminar possíveis descontinuidades antes de se iniciar ou completar a soldagem de uma junta.

2.3 LÍQUIDO PENETRANTE

O método de ensaio por Líquido Penetrante (LP) consiste na aplicação de um líquido com características especiais (molhantes) sobre a superfície da peça que deve estar devidamente limpa e seca, para que deste modo o líquido, após algum tempo penetre nas descontinuidades presentes na peça. Em seguida o excesso de líquido é removido para que se possa aplicar sobre a superfície um produto chamado revelador. Por sua vez este revelador irá absorver o líquido que ficou retido nas descontinuidades. A imagem da descontinuidade fica então desenhada sobre a superfície, que será avaliada de acordo com a norma utilizada na fabricação da peça ou material (MIX 2005; ANDREUCCI, 2013).

Para que o ensaio decorra sem anomalias e com resultados representativos ou viáveis, este deve ser realizado em algumas etapas segundo a norma NP EN 571. O método consiste na aplicação de um líquido, com características especiais, sobre a superfície da peça ou componente de interesse, de forma que, após um determinado tempo, este líquido penetre em descontinuidades presentes no material e que sejam abertas à superfície. Após um determinado tempo, o excesso de líquido é removido e um produto chamado revelador é aplicado sobre a superfície. Este material age de forma a retirar o líquido que penetrou na descontinuidade, formando uma imagem da mesma na superfície da peça, que será avaliada de acordo com a norma para a fabricação da peça ou componente (ANDREUCCI, 2013).

A Tabela 2 apresentam as etapas para realização do ensaio de líquido penetrante, enquanto que a Figura 1 ilustra essas etapas.

Tabela 2 – Etapas para realização do ensaio de líquido penetrante

Etapas do ensaio	Resumo da sequência do ensaio
Preparação da superfície a ser examinada	Consiste na avaliação da superfície a examinar, pois o sucesso do método depende dos defeitos estarem abertos à superfície.
Limpeza da superfície	A superfície a examinar deve ser bem limpa, normalmente utiliza-se um solvente para este efeito.
Aplicação do penetrante	Consiste na aplicação de um líquido chamado penetrante, geralmente de cor vermelha ou fluorescente, para que toda a área de interesse seja coberta.
Remoção do excesso de penetrador	Após o tempo de penetração o líquido em excesso deve ser removido da superfície.
Aplicação do revelador	Consiste na aplicação de um filme uniforme de um material revelador sobre a superfície da peça.
Avaliação ou inspeção das indicações produzidas	A avaliação deve ser feita em boas condições de luminosidade, podendo esta ser feita com luz natural (branca), luz ultravioleta (“luz negra”).

Fonte: PEREIRA (2013), adaptada pelo autor.

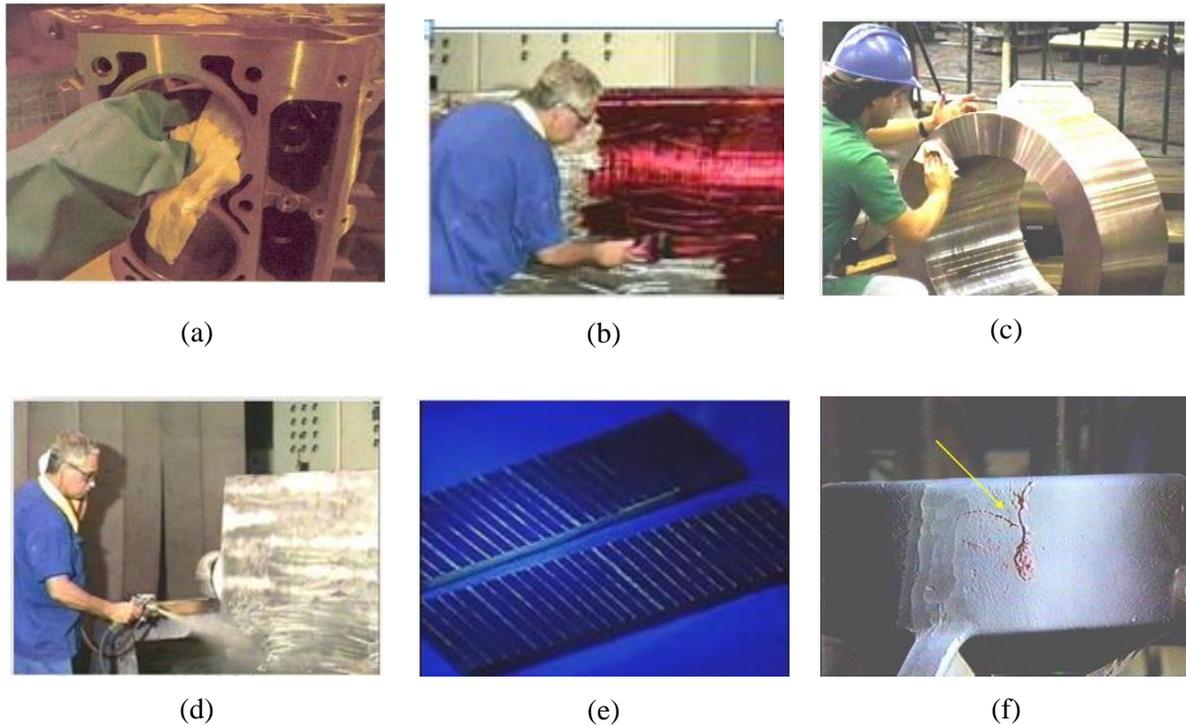


Figura 1 - Esquema das etapas do ensaio por líquido penetrante. (a) limpeza da peça; (b) aplicação de líquido penetrante; (c) remoção do excesso de líquido; (d) aplicação do revelador; (e) avaliação e inspeção; (f) formação da indicação da trinca.

Fonte: ANDREUCCI (2013).

O ensaio de LP é capaz de ensaiar peças de tamanhos e formas variadas bem como pequenas áreas isoladas em uma superfície, assim como é capaz de detectar discontinuidades muito pequenas. É um dos ensaios mais sensíveis para detectar discontinuidades superficiais. É relativamente barato e não requer equipamentos sofisticados. As instalações podem ser adaptadas ao tamanho e quantidade de peças. Permite automação do sistema. Pode ser aplicado durante o processo de fabricação, ao final deste ou durante a manutenção, aqui para detectar as o surgimento das discontinuidades em serviço (ANDREUCCI, 2013).

De acordo com Andreucci (2013) essa técnica apresenta algumas desvantagens, a saber: não pode ser utilizada em superfícies porosas ou absorventes, pois há a possibilidade da não remoção completa do excesso de penetrante causando mascaramento de resultados. As técnicas convencionais devem ser aplicadas em uma faixa de temperaturas definida, em geral entre 10 °C e 52 °C. Alguns produtos utilizados podem conter enxofre ou compostos halógenos. Dentre outras desvantagens apresentadas por essa técnica. O ensaio não apresenta resultados viáveis se a superfície do material for rugosa. As discontinuidades detectadas por este ensaio normalmente não são possíveis de dimensionar a sua profundidade.

2.4 PARTÍCULAS MAGNÉTICAS

O ensaio por partículas magnéticas é um método não destrutivo aplicado na inspeção de materiais ferromagnéticos para detecção e localização de discontinuidades. A técnica possui elevada aceitação principalmente em função da sua facilidade de operação. O método de realização do ensaio é baseado em sujeitar a peça ou uma região da mesma a um campo magnético. Caso existam discontinuidades ocorrerá a criação de campos de fuga ou dispersão em função de uma falta de continuidade nas propriedades magnéticas da peça (OLIVEIRA, 2014).

O princípio do ensaio se baseia no fato de que, quando o material ou peça sob teste é magnetizada, um campo magnético homogêneo cria linhas de fluxos magnéticos que são distorcidas quando encontram uma discontinuidade geralmente em uma direção transversal à direção do campo magnético, conforme mostrado na Figura 2.

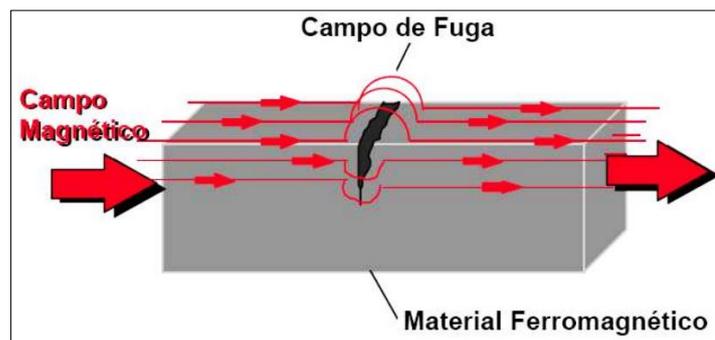


Figura 2 – Princípio do ensaio de partícula magnética

Fonte: SANTOS (2008).

De acordo com Oliveira (2014), o uso das partículas magnéticas, possibilita que o ensaio possua uma razoável sensibilidade, economia e praticidade. Essas partículas são aglutinadas nos campos de dispersão em função da atração criada pela geração de polos magnéticos. A fim de que as descontinuidades sejam detectadas tanto em formato quanto em dimensão, os campos de fuga devem possuir resistência suficiente a fim de causar uma apreciável concentração dessas partículas.

Esse ensaio tem sido utilizado no setor metal mecânico em geral, como caldeirarias, tubulações, indústria naval, ferroviária, automobilística, de máquinas e equipamentos agrícolas, estruturas etc.

O ângulo mínimo entre o campo magnético formado e a descontinuidade é de 30°. A ótima sensibilidade é atingida quando o campo magnético é perpendicular à orientação da imperfeição. Portanto, as descontinuidades devem estar entre 30° e 90° em relação ao campo magnético, a fim de serem detectadas. O campo magnético, portanto, costuma ser aplicado em duas direções perpendiculares uns aos outros (SANTOS, 2008).

Em relação aos métodos de magnetização, Oliveira (2014) afirma que uma peça metálica pode ser magnetizada por diversos métodos: através de campos longitudinais, circulares ou multidirecionais, essa escolha é realizada em função da geometria e dimensões da amostra.

Outra característica também é a não existência de um tamanho mínimo da descontinuidade para que ocorra o campo de fuga, o que faz com que, para materiais ferromagnéticos, o método de ensaio por partículas magnéticas seja o mais eficiente dos métodos superficiais, até mesmo mais que o ensaio por líquidos penetrantes (MOREIRA, 2014).

De acordo com Santos (2008) as **principais vantagens** da inspeção com partículas magnéticas são:

- Capacidade de detectar descontinuidades superficiais e subsuperficiais;
- Sua realização é relativamente simples e rápida;
- A preparação das peças para o ensaio é simples, não havendo necessidade das possíveis descontinuidades estarem necessariamente abertas à superfície, como no ensaio com líquidos penetrantes;
- O tamanho e a forma da peça inspecionada têm pouca ou nenhuma influência no resultado.

Como limitações, Moreira (2014) cita:

- É aplicável apenas aos materiais ferromagnéticos, ou seja, principalmente os aços estruturais ao carbono, de baixa e média liga, ferros fundidos, ligas a base de cobalto e aços inoxidáveis ferríticos;
- A forma e a orientação das descontinuidades em relação ao campo magnético interferem fortemente no resultado do ensaio, sendo necessário, em muitos casos, a realização de mais de um ensaio na mesma peça;
- Muitas vezes faz-se necessário a desmagnetização da peça após a inspeção;
- Em geral são utilizadas correntes elétricas elevadas, que pode causar o aquecimento indesejado das partes examinadas.

2.5 ULTRASSOM

Os aparelhos de teste por ultrassom tiveram seu uso iniciado na indústria por volta da década de 60. No entanto, desde os anos 30, estudos a respeito dos fenômenos ondulatórios, em materiais sólidos, tem sido aprofundado para a detecção de fissuras, lacunas, porosidade, descontinuidades internas, medição de espessura e análise das propriedades do material. A evolução da tecnologia ultrassônica como ensaio não destrutivo acompanha em grande parte o desenvolvimento da eletrônica e posteriormente dos computadores (STEIN, 2017).

Os primeiros trabalhos com ultrassom foram desenvolvidos em países europeus e nos Estados Unidos e vem sendo aplicadas, com sucesso, em diversas áreas para testes e exames de várias estruturas. Suas principais aplicações são: medições de distância, espessuras, verificação de descontinuidades e corrosão de materiais, determinação de falhas na geometria de um objeto, etc. (DUARTE *et al*, 1999).

A onda ultrassônica ao incidir numa descontinuidade ou falha interna do meio elástico irá refletir. As ondas refletidas advindas do interior da peça examinada serão detectadas pelo transdutor, possibilitando dessa forma a localização e/ou a profundidade das descontinuidades, como ilustra a Figura 2 (ANDREUCCI, 2008).

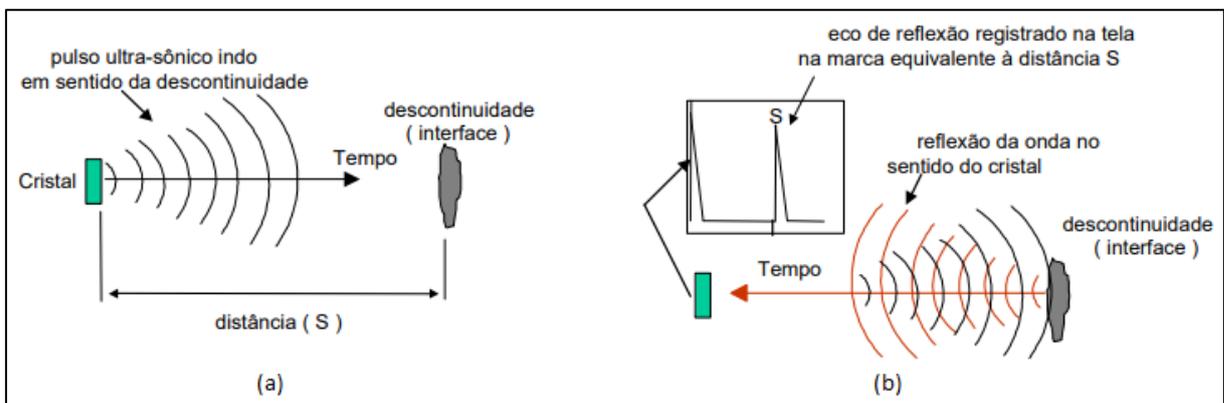


Figura 3 – Inspeção de materiais por ultrassom. (a) Transmissão da onda ultrassônica e (b) sua recepção.

Fonte: Andreucci (2008), adaptada pelo autor.

Quando comparado a outros métodos não destrutivos, o ensaio por ultrassom apresenta vantagens tais como elevado poder de penetração, o que torna possível a detecção de descontinuidades em grandes profundidades; alta precisão na determinação da posição e dimensionamento de descontinuidades, além de alta portabilidade (SANTIN, 2003).

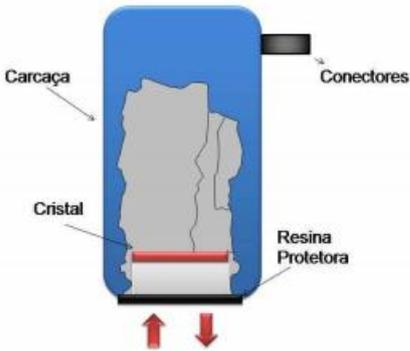
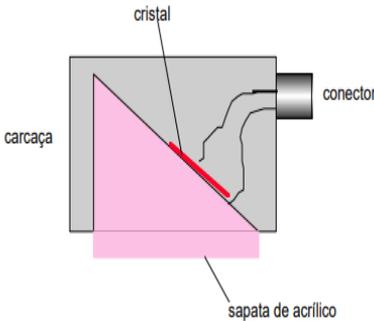
2.5.1 Ondas Ultrassônicas

As ondas ultrassônicas são ondas mecânicas que se propagam em meios elásticos, isto é, em materiais com capacidade de se deformar ao sofrer um esforço e voltar à forma original após o esforço ser retirado. A velocidade de propagação da onda depende do meio em que a onda se propaga e elas podem ser classificadas em três categorias: Ondas longitudinais, ondas transversais e ondas superficiais (SANTIN, 2003).

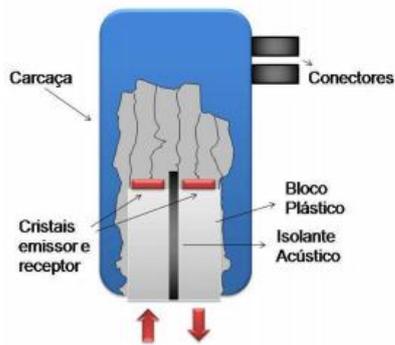
De acordo com França (2015) as ondas ultrassônicas são transferidas ao material através de transdutores que, normalmente, são protegidos por material polimérico (sapatas). Esse transdutor contém um cristal de material piezelétrico que tem a capacidade de se contrair e se expandir continuamente quando submetido a uma DDP de fonte pulsada.

Existem três tipos usuais de transdutores: Reto ou Normal, o angular e o duplo-cristal. Outro cabeçote bastante utilizado é o “Phased Array”. Suas características são apresentadas na Tabela 3.

Tabela 3 – Tipos de Transdutores

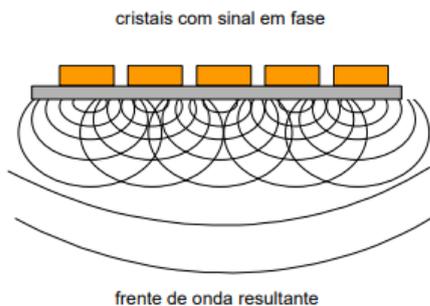
Transdutor Normal ou Reto	
	<ul style="list-style-type: none"> • Possui um cristal piezelétrico; • Geram ondas longitudinais normais a superfície de acoplamento; • Utilizado na inspeção de peças com superfícies paralelas ou quando se deseja detectar descontinuidades na direção perpendicular à superfície da peça.
Transdutor Angular	
	<ul style="list-style-type: none"> • Possui um cristal piezelétrico; • Cristal piezelétrico forma um determinado ângulo com a superfície do material; • Utilizado na inspeção de soldas quando a descontinuidade está orientada perpendicularmente à superfície da peça.

Transdutor de Duplo-Cristal



- Possui dois cristais piezelétricos, um funcionando apenas como receptor e o outro apenas como emissor;
- Geram ondas longitudinais normais a superfície de acoplamento;
- Utilizado na detecção de descontinuidades próximas da superfície e em medição de espessura

Transdutor “Phased Array”



- Operam com dezenas de pequenos cristais piezelétricos;
- Podem gerar ondas perpendiculares ao plano da superfície ou uma frente de onda angular à superfície;
- Permite maior velocidade de inspeção, principalmente em soldas.

Fonte: Andreucci (2008), adaptada pelo autor.

Transdutores ultrassônicos começaram a ser combinados em diferentes ângulos de incidência, para a determinação mais precisa de defeitos, sua geometria e tamanho, pois, com a combinação dos ângulos de incidência, torna-se possível a varredura de uma área maior a ser examinada (BROOK, 2012).

De acordo com Martin (2012) os ângulos de ataque e fuga de diferentes cabeçotes ultrassônicos pela técnica pulso-eco, não somente determinam os modos de conversão de ondas longitudinais para transversais, como também podem ser articulados tridimensionalmente, para gerar imagens ultrassônicas bidimensionais.

Torna-se cada vez mais comum a comercialização de aparelhos de ultrassom com mais de um modo de visualização. Com as visualizações B-Scan e C-Scan, torna-se possível a consolidação comercial da segunda técnica de ultrassom, conhecida como ToFD (Time of Flight Diffraction), ou seja, a interpretação do tempo de percurso não somente de ondas refletidas como na técnica pulso-eco, mas também de ondas resultantes da difração por partes geométricas de defeitos, como frentes de propagação de trincas em componentes (CHEEKE, 2002).

É importante notar que esta técnica é um refinamento da técnica de pulso-eco, ou seja, cabeçotes ultrassônicos de ondas longitudinais e/ou transversais têm seus feixes focados nos limites de defeitos, para determinação mais precisa de seu tamanho e orientação (MARTIN, 2012).

Para cada uma das quatro técnicas de ultrassom disponíveis: pulso-eco, ToFD, phased-array e ondas guiadas, o posicionamento dos transdutores ultrassônicos e a forma de contato com a superfície do componente inspecionado são as características mais críticas para a determinação de quais tipos de ondas sonoras atravessam o material inspecionado, bem como a amplitude e profundidade do volume examinado pelo ensaio (BROOK, 2012).

A inspeção de materiais por ultrassom pode ser efetuada através da técnica de pulso eco, de transparência e de imersão. Suas características são apresentadas na Tabela 4.

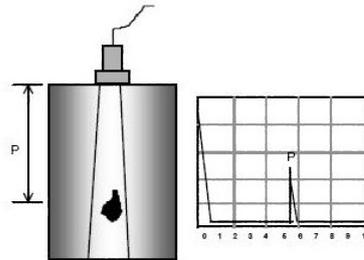
Ao acoplar o transdutor sobre a peça a ser inspecionada, imediatamente estabelece uma camada de ar entre a sapata do transdutor e a superfície da peça. Esta camada de ar impede que as vibrações mecânicas produzidas se propaguem para a peça em razão das impedâncias acústicas serem muito diferentes (ANDREUCCI, 2008).

Por esta razão, deve-se usar um líquido que estabeleça uma redução desta diferença, e permita a passagem das vibrações para a peça. Tais líquidos são denominados de líquido acoplante. Os acoplantes normalmente usados na inspeção por contato incluem: água, óleo, glicerina, graxas derivadas de petróleo, graxas de silicone, colas de papel de parede, como o carboxi-metil-celulose e outros produtos líquidos ou pastosos (SANTIN, 2003).

Tabela 4 – Técnicas de Inspeção por Ultrassom.

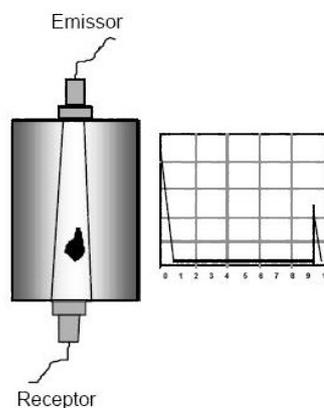
Técnica de Pulso-Eco

Somente um transdutor é responsável por emitir e receber as ondas ultrassônicas que se propagam no material; O transdutor é acoplado em somente um lado do material; Pode-se verificar a profundidade da descontinuidade, suas dimensões, e localização na peça.



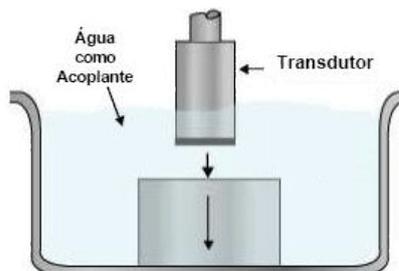
Técnica de Transparência

São utilizados dois transdutores separados (nos dois lados da peça), um transmitindo e outro recebendo as ondas ultrassônicas; Não se pode determinar a posição da descontinuidade, sua extensão, ou localização na peça, é somente um ensaio do tipo passa-não passa que estabelece um critério comparativo de avaliação do sinal recebido com uma peça sem descontinuidades; Pode ser aplicada para chapas, juntas soldadas, barras.



Técnica de Imersão

É empregado um transdutor de imersão à prova d'água; O transdutor pode se movimentarem relação a superfície da peça; A peça é colocada dentro de um tanque com água, propiciando um acoplamento sempre homogêneo.



De acordo com a ABENDI (2018) o ensaio por ultrassom apresenta vantagens e desvantagens, quando comparado aos outros ensaios não destrutivos. Dentre os parâmetros vantajosos na utilização deste ensaio, destacam-se:

- a) Elevada sensibilidade a descontinuidades superficiais e subsuperficiais com capacidade de detecção de falhas com dimensões na ordem de até 0,5 mm ou inferiores.
- b) Profundidade de penetração superior aos outros métodos não destrutivos, que possibilita detectar descontinuidades em profundidades com centenas de milímetros.
- c) Alta precisão na determinação da localização, tamanho e forma da descontinuidade.
- d) A interpretação dos resultados não requer o uso de processos intermediários o que torna a inspeção mais ágil.
- e) Na técnica de pulso eco, somente uma superfície de acesso é necessária para a aplicação do ensaio.
- f) Os equipamentos eletrônicos fornecem resultados instantâneos, que possibilitam ao método ser implementado em linhas de produção ou no controle do processo.
- g) Sistemas automatizados podem gerar imagens detalhadas.
- h) Não são necessários acessórios ou requisitos especiais de segurança para sua utilização.

Como desvantagens, destacam-se:

- a) A superfície deve estar acessível a transmissão do ultrassom.
- b) Os inspetores devem ser experientes, qualificados e possuir grande conhecimento teórico, visto que o fator humano é vital na interpretação da localização, forma e tamanho das descontinuidades.
- c) O uso de acoplante é necessário, a fim de que ocorra a transmissão da energia sonora entre o cabeçote e a objeto em análise.
- d) A inspeção apresenta dificuldade de aplicação em peças pequenas, com espessura reduzida, formas irregulares ou superfícies ásperas.
- e) O ferro fundido e materiais de granulação grosseira são difíceis de inspecionar em função de apresentarem baixa propagação do som e alto ruído do sinal.
- f) A calibração do aparelho é realizada com a utilização de blocos padrões e de referência.

2.6 RADIOGRAFIA INDUSTRIAL

A radiografia industrial é um método de ensaio não destrutivo que tem por objetivo realizar um registro de imagem obtido através da penetração da radiação, quando atravessa um material e atinge um filme fotográfico (LEITE, 1996).

De acordo com Andreucci (2009) o ensaio radiográfico baseia-se na absorção diferenciada da radiação pela matéria. Consiste basicamente, em fazer passar um feixe de radiação X, radiação gama ou nêutrons através do objeto em estudo e registrar as características da radiação emergente do objeto utilizando um meio adequado, como um filme radiográfico, uma tela fluorescente ou dispositivos eletrônicos de detecção de imagem radiográfica.

Dependendo das características do objeto em exame, como a sua geometria e o tipo de discontinuidades apresentadas pelo mesmo, o feixe de radiação sofrerá uma maior ou menor absorção, sensibilizando em menor ou maior grau o meio utilizado para o registro da imagem radiográfica (ANDREUCCI, 2009).

A Figura 4 mostra o arranjo básico utilizado para a realização do ensaio radiográfico, referente à radiografia de uma peça com diferentes espessuras e com dois tipos de discontinuidades comuns de serem encontradas em uma inspeção radiográfica.

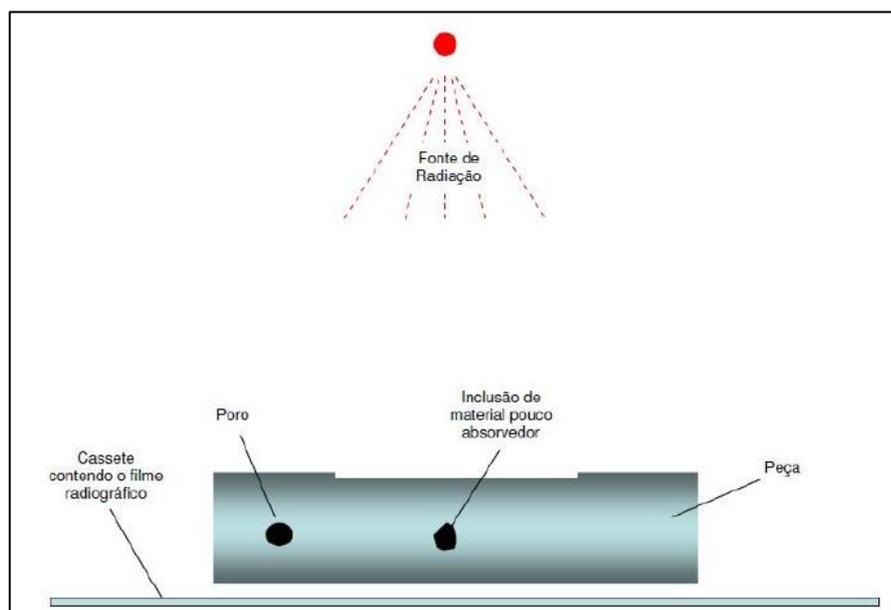


Figura 4 – Arranjo básico utilizado para a realização do ensaio radiográfico.

Fonte: JUNIOR, Silvério Ferreira da Silva; MARQUES, Paulo Villani. Ensaios Não Destrutivos. Belo Horizonte, 2006.

Devido às diferenças da densidade e geometrias do material bem como o tipo de discontinuidades apresentadas pelo mesmo, o feixe de radiação (radiação penetrante) sofrerá uma maior ou menor absorção pela peça em estudo, logo essa absorção diferenciada poderá ser detectada através de um filme ou outro sistema de detecção, em tempo real, computadorizado ou digital. Esta variação que é registada irá indicar a existência de uma falha ou defeito interno na peça em estudo. Este método tem um enorme campo de aplicações podendo ser usado, em soldaduras de chapas de navios, oleodutos, peças fundidas na indústria automobilística, materiais plásticos entre outros (HELLIER, 2003).

O ensaio radiográfico utiliza uma radiação de alta energia (baixo comprimento de onda), tais como raio-X e gama, pelo que este tipo de radiação pode atravessar vários tipos de materiais, como corpos opacos, metais, entre outros, podendo esta radiação ser posteriormente registada em forma de um filme radiográfico ou digital.

Na Tabela 5 é possível verificar alguns dos princípios básicos do ensaio radiográfico industrial, desde a criação do feixe de radiação até à criação do filme radiográfico.

Tabela 5 - Princípios básicos do ensaio radiográfico

Princípios básicos do ensaio radiográfico	
Fontes de radiação (Raio-X e Gama)	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Muitos elementos exibem uma propriedade chamada radioatividade, esta característica é causada pela instabilidade da complexa estrutura destes elementos, sobre a ação de forças elétricas, magnéticas e gravitacionais. ✓ Criando assim um feixe de radiação capaz de penetrar em vários tipos de materiais.
Absorção da radiação pela matéria	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Quando um feixe de radiação incide num material, parte é absorvida ou dispersada e uma parte transmitida. ✓ A radiação transmitida é a parte do feixe utilizada para detectar as discontinuidades.
Exposição do filme	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Como num filme fotográfico que é sensibilizado pela luz, o filme radiográfico será sensibilizado não somente pela luz, mas também pela radiação. ✓ As áreas escuras observadas num filme radiográfico indicam que uma maior quantidade de radiação passou por aquela região correspondente na peça ensaiada.

Fonte: PEREIRA (2013)

Na Figura 5 da direita é apresentado o filme radiográfico obtido após a peça em estudo ser radiografada, onde pode-se verificar as diferenças de espessura bem como os respectivos defeitos da peça (pelas diferenças de tonalidades de cinzentos).

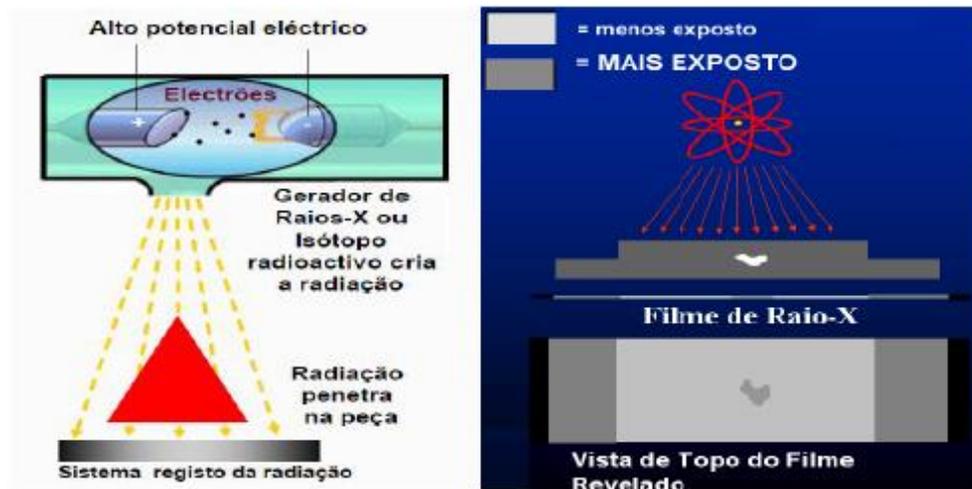


Figura 5 – Princípio do ensaio radiográfico. A imagem da esquerda consiste na radiação produzida por um gerador de raio-X e a da direita consiste na formação da imagem radiográfica.

Fonte: PEREIRA (2013).

O ensaio radiográfico, apesar de ser baseado em um princípio simples, tem muitas variantes que podem induzir a erros ou difíceis interpretações para o operador. Durante a realização do ensaio deve ser sempre levado em conta:

- A intensidade da radiação,
- Que tipo de radiação se deve utilizar (raio-X ou gama),
- A que distância deve estar a peça em estudo da fonte de radiação,
- A que distância se deve colocar o filme radiográfico da peça.

Todos estes parâmetros vão depender sempre do tamanho da peça, da sua composição química, bem como que tipo de defeitos podem estar presentes na mesma (PEREIRA, 2013).

O ensaio radiográfico pode ser realizado em vários tipos de materiais. Contudo contém uma grande limitação que consiste na grande capacidade de absorção apresentada por alguns materiais, como o urânio e o chumbo, que normalmente são utilizados como blindagens, logo podem inviabilizar a realização deste tipo de ensaio (PEREIRA, 2013).

De referir que o ensaio deve ser sempre realizado em algumas posições ou diferentes ângulos para a mesma peça, pois quando uma descontinuidade plana se encontra perpendicularmente à radiação incidente, esta nunca será detectada. A sensibilidade do método radiográfico é sempre maior para descontinuidades volumétricas (HELLIER, 2003).

De acordo com Pereira, (2013) o ensaio radiográfico convencional apresenta vantagens e desvantagens, quando comparado a outros ensaios não destrutivos e ao próprio ensaio radiográfico computadorizado. **Dentre suas vantagens destacam-se:**

- A possível análise de espessuras verificando ao mesmo tempo a existência de algum corpo estranho no interior da peça em estudo;
- Permite a detecção de defeitos de fabricação em linhas de montagem;
- Análise das espessuras sem que ocorra a remoção de pinturas, isolamentos ou revestimentos, sendo esta uma das grandes vantagens pois por vezes a sua remoção pode ficar bastante dispendiosa.

Dentre as desvantagens:

- Necessidade de acesso a ambos os lados do objeto radiografado;
- Exigência de mão de obra treinada e qualificada.
- Resíduos provenientes do sistema de revelação;
- Geração e arquivamento de grandes volumes de filmes
- Exposição às radiações.

2.7 CORRENTES PARASITAS

O ensaio não destrutivo de correntes parasitas teve sua origem em 1831 quando Michael Faraday demonstrou a indução eletromagnética e formulou experimentalmente as leis da indução. Em 1879, um cientista chamado Hughes registrou mudanças na propriedade de uma bobina quando colocada em contato com metais de diferentes condutividades e permeabilidades (MARQUES, 2017).

Correntes parasitas são correntes elétricas induzidas em um condutor elétrico através da reação com um campo magnético alternado. As correntes parasitas são circulares e perpendiculares à direção do campo magnético aplicado (Figura 6). A condutividade elétrica, permeabilidade magnética, geometria e homogeneidade do material analisado afetam as correntes induzidas (Khan et al., 2008).

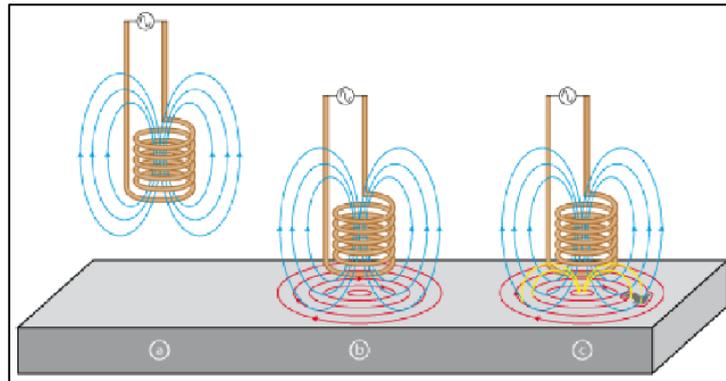


Figura 6 – Princípio do ensaio por correntes parasitas: a) campo magnético primário; b) correntes induzidas no material condutor; c) campo magnético secundário gerado na peça.

Fonte: NELLIGAN e CALDERWOOD (2013).

A Inspeção por correntes parasitas é baseada na lei indução magnética de Faraday. Ele enunciou que uma variação de densidade de fluxo magnético induzido ao longo do tempo produz uma corrente induzida em um condutor elétrico.

O comportamento das correntes parasita afeta a impedância da bobina que é usado como referência no ensaio de correntes parasitas. Quando uma bobina indutora é colocada em contato com duas amostras com mesmas propriedades, diferenciando-se apenas pela presença ou não de defeitos, os caminhos das correntes parasitas nos dois casos devem ser diferentes. Isto porque, a presença de um defeito no material causa um aumento na resistência à passagem da corrente elétrica naquela região, produzindo uma redução no fluxo de correntes parasitas. Da mesma forma, variações microestruturais com propriedades magnéticas diferentes geram uma facilitação ou dificuldade da passagem da corrente e, conseqüentemente, impedâncias diferentes (NDT, 2004). Essa diferença de impedância é usada para analisar os defeitos presentes na amostra e as propriedades dos materiais.

As correntes parasitas também contribuem para o aumento do poder de dissipação de energia que alteram a parte real da impedância da bobina. Acompanhando o valor da impedância através do monitoramento do sinal de tensão elétrica e corrente, é possível relacionar os valores de impedância medidos com informações específicas do material testado, tais como condutividade e composição química (MARQUES, 2017).

Trincas e descontinuidade, ao serem percorridas pelo sensor, provocam a distorção do fluxo de correntes parasitas na peça (Figura 7) e conseqüentemente uma nova alteração na impedância é observada. Assim, através do acompanhamento ao longo do tempo da impedância do sensor é possível detectar e dimensionar diferentes tipos de defeitos em regiões superficiais e subsuperficiais.

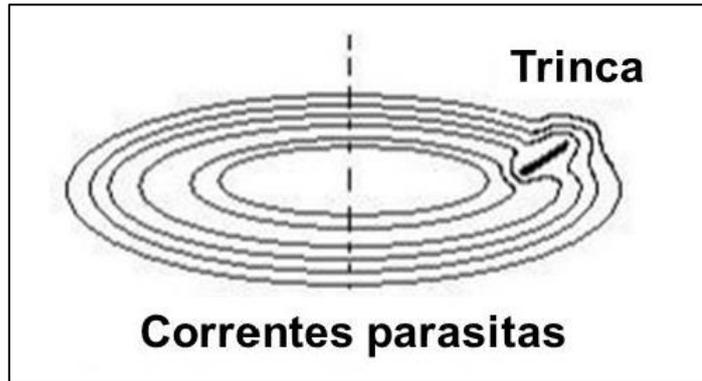


Figura 7 – Perturbação do fluxo de correntes parasitas provocado pela presença de uma trinca.

Fonte: PEREIRA (2014)

As sondas utilizadas no ensaio de correntes parasitas podem ser encontradas em uma ampla variedade de formatos e tamanhos. O que caracteriza uma das principais vantagens da inspeção por correntes parasitas, pois as sondas podem ser projetadas para uma grande gama de aplicações de acordo com o seu formato. No que referente ao modo de operação as sondas podem ser classificadas pelo modo como a bobina ou as bobinas estão conectadas, onde são normalmente classificadas em absolutas, diferenciais e reflexivas (MARQUES, 2017).

As diversas aplicações desenvolvidas para o método de correntes parasitas se devem à sensibilidade da técnica frente aos seguintes fatores (HELLIER, 2001): variações de condutividade, inspeção de discontinuidades, espessura de componentes, espessuras de camadas depositadas sobre material base, espaçamento entre sensor e peça, bem como variações de permeabilidade.

A principal vantagem do método é a sensibilidade a diversas variáveis, tais como condutividade e espessura do material, dimensões dos defeitos superficiais e subsuperficiais, camadas de revestimento ou cladeamento no metal de base, espaçamento entre a bobina e a peça (lift-off), variações de permeabilidade, etc. Isso também pode ser considerada a principal desvantagem da técnica, uma vez que a resposta dessas variáveis é vetorialmente somada e a bobina leitora detecta mais de uma variável ao mesmo tempo, ficando difícil de interpretar separadamente cada variável presente. Uma correta interpretação das variáveis separadamente depende de conhecimento e treinamento avançados por parte do usuário da técnica (HELLIER, 2001).

2.8 EMISSÃO ACÚSTICA

De acordo com Ness et. al., (1996) o método por emissão acústica (EA) tem a finalidade de monitorar a integridade de uma estrutura, além de detectar a presença de descontinuidades, sejam essas passantes ou não.

Este método possui a capacidade de fornecer informações sobre a origem de uma descontinuidade, bem como a respeito da expansão da mesma durante a operação de um maquinário (HELLIER, 2001).

De acordo com Mix (2005) o ensaio por emissão acústica pode ser empregado em diferentes aplicações. Destacam-se as inspeções em vasos de pressão para detectar e localizar descontinuidades, além de monitorar a integridade de soldas durante a fabricação de peças e equipamentos.

O princípio básico, no qual a técnica está fundamentada, é a detecção de ondas transientes geradas pelo processo de degradação do material. Esses sinais, ou ondas de tensão, são gerados quando o material é submetido a tensões mecânicas (HELLIER, 2001).

As duas principais contribuições da técnica de EA são a possibilidade de monitorar uma estrutura de forma global e não intrusiva e localizar regiões específicas na estrutura onde se encontram as anomalias como a presença de trincas. A vantagem de se efetuar uma inspeção global, de forma não intrusiva, representa um monitoramento completo de uma só vez sem interferência significativa na operação, evitando-se interrupções desnecessárias na produção.

Desta forma, esse ensaio possui a capacidade de detectar, localizar e expor descontinuidades em objetos no momento que as mesmas acontecem. A emissão acústica pode ser gerada desde trincas em asas de aeronaves a deformações em vasos de pressão ou tubulações (SHULL, 2001; MIX, 2005).

2.9 VASOS DE PRESSÃO

Vasos de pressão são todos os reservatórios de diferentes dimensões ou finalidades, que contenham fluidos em pressão inferior ou superior à atmosférica. Com esta ampla definição, incluem-se neste grupo desde uma panela de pressão de cozinha a tanques, oleodutos e reatores nucleares (TELLES, 2007).



Figura 8 – Vaso de pressão horizontal em aço.

Fonte: TEKINOX (2019)

O projeto de um vaso de pressão deve ser criteriosamente elaborado seguindo-se normas específicas. Os códigos internacionais de maior relevância são o código Americano ASME, o Alemão A.D. Merkatter, o código Francês SNCTTI, a norma Inglesa BS-5500. No entanto, a maioria das normas internacionais e nacionais segue como referência na sua preparação, o Código da American Society of Mechanical Engineers – ASME. Conhecido por Boiler and Pressure Vessel Code – BPVC.

O referido código é dividido em 12 seções, no caso da fabricação e inspeção de vasos de pressão são utilizadas, basicamente, as seções:

- Seção V – Ensaios Não Destrutivos;
- Seção VIII – Regras para construção de vasos de pressão.

No Brasil, além desse código, os vasos de pressão devem seguir a norma regulamentadora NR-13 que estabelece requisitos mínimos para gestão da integridade estrutural de caldeiras a vapor, vasos de pressão, suas tubulações de interligação e tanques metálicos de armazenamento nos aspectos relacionados à instalação, inspeção, operação e manutenção. Essa é uma norma de caráter compulsório, tem força de lei e visa a proteção do trabalhador.

Em relação ao projeto de vasos de pressão, Guamá (2012, p. 48) descreve:

O projeto de um vaso de pressão consiste no processo analítico de determinação das dimensões gerais do equipamento, na determinação de todos os detalhes do próprio equipamento ou das peças que também fazem parte do mesmo, como também a seleção técnica dos materiais adequados, dos processos de fabricação, detalhes, etc. Para essa análise diferentes combinações dos carregamentos, para diferentes

situações de operação, devem ser levadas em conta para se obter um projeto econômico e seguro. Contrariamente ao que acontece com quase todos os outros equipamentos, máquinas, veículos, objetos e materiais de uso corrente, a grande maioria dos vasos de pressão não é um item de linha de fabricação de alguma indústria, salvo raras exceções, os vasos são, quase todos, projetados e construídos por encomenda ("taylor-made"), sob medida, para atender, em cada caso, a determinada finalidade ou a determinadas condições de desempenho. Como consequência, o projeto é quase sempre feito individualmente para cada vaso a ser construído.

A NR-13 classifica os vasos de pressão segundo a classe de fluido e potencial de risco. Considerando a pressão em MPa e o volume em m³, a tabela a seguir apresenta essa classificação:

Tabela 6 – Categorias de Vasos de Pressão

Classe de Fluido	Grupo de Potencial de Risco				
	1 P.V ≥ 100	2 P.V < 100 P.V ≥ 30	3 P.V < 30 P.V ≥ 2,5	4 P.V < 2,5 P.V ≥ 1	5 P.V < 1
Categorias					
<p style="text-align: center;">A</p> <ul style="list-style-type: none"> - Fluidos inflamáveis, e fluidos combustíveis com temperatura igual ou superior a 200 °C - Tóxico com limite de tolerância ≤ 20 ppm - Hidrogênio e Acetileno 	I	I	II	III	III
<p style="text-align: center;">B</p> <ul style="list-style-type: none"> - Fluidos combustíveis com temperatura menor que 200 °C - Fluidos tóxicos com limite de tolerância > 20 ppm 	I	II	III	IV	IV
<p style="text-align: center;">C</p> <ul style="list-style-type: none"> - Vapor de água - Gases asfixiantes simples - Ar comprimido 	I	II	III	IV	V
<p style="text-align: center;">D</p> <ul style="list-style-type: none"> - Outro fluido 	II	III	IV	V	V

Fonte: Brasil (2018)

Segundo a NR 13 os vasos de pressão devem ser submetidos a inspeções de segurança inicial, periódica e extraordinária. A norma estabeleceu ainda duas tabelas de periodicidade para essas inspeções. A diferença entre as duas é quando a fábrica possui ou não serviço próprio de inspeção de equipamentos (SPIE). As inspeções/verificações devem ser feitas de acordo com a categoria do vaso.

3. UTILIZAÇÃO DE ENSAIOS NÃO DESTRUTIVO NA INDÚSTRIA E EM ESTUDOS ACADÊMICOS

3.1 ENDS APLICADOS À FABRICAÇÃO DE VASOS DE PRESSÃO

Durante as etapas de fabricação dos vasos de pressão, os ensaios não destrutivos são amplamente empregados. A aplicação das técnicas relativas aos ENDS inicia-se na verificação da integridade da matéria-prima de construção. Devido a possíveis descontinuidades consequente do processo de fabricação, a matéria-prima acabada ou semiacabada, deve ser examinada antes de ser empregada na montagem do elemento.

As chapas laminadas que serão utilizadas na confecção do corpo do vaso de pressão podem apresentar problemas como: segregação, que corresponde a concentração localizada de elementos de liga ou impurezas; e dupla laminação, um tipo de descontinuidade bidimensional oriunda de porosidade ou rechupe do lingote que não se caldearam durante o processo.

Nas chapas de compósitos bimetálicos, conhecidas por chapas cladeadas, formadas pela composição de um metal de base combinado a um material de proteção, que visa oferecer principalmente resistência mecânica e à corrosão. Podem ocorrer irregularidades na interface do material de base com seu *clad* protetor, proporcionando o deslocamento desse material de proteção.

Nesse tipo de matéria-prima, é indicada a realização do ensaio não destrutivo por ultrassom. A norma para detecção de descontinuidades em chapas metálicas por ultrassom, NBR 6002, estabelece o uso da técnica pulso eco na detecção de descontinuidades laminares em chapas metálicas laminadas com espessura igual ou acima de 6 mm. (ABNT, 2015).

Segundo a norma técnica N-268 para fabricação de vasos, em chapas cladeadas, ‘Deve-se efetuar ultrassom nas chapas cladeadas para verificação da aderência do “clad” antes da conformação. Após a conformação deve-se novamente efetuar ultrassom apenas nos locais de maior grau de deformação[...]’ (PETROBRAS, 2012, p. 14).

Outros elementos que compõem os vasos de pressão como: Flanges, peças forjadas ou tubos de troca térmica, também podem apresentar problemas decorrentes do processo de fabricação ou transformação do material. Desta forma, tais elementos obrigatoriamente deverão passar por ensaios não destrutivos estabelecidos nas normas aplicáveis, afim de atender os critérios de aceitação. Visando assim, o aumento na confiabilidade desses elementos. (SANCOVICEI, 2012).

De acordo com Burgess (1989) na fabricação dos vasos de pressão, os ensaios não destrutivos são empregados praticamente em toda cadeia de produtiva. Entretanto, vale destacar que sua principal aplicação está na avaliação de soldas deste produto, permitindo analisar aspectos da qualidade das mesmas que não podem ser observados por uma simples inspeção visual.

Na maioria dos processos de fabricação de vasos de pressão, o corpo do elemento é formado de chapas metálicas que passaram por calandragem para obtenção de virolas. A união desses virolas é feita pelo processo de soldagem, podendo esse ser de forma manual ou automatizada. Os outros componentes que compõem o vaso de pressão tipo: “pescoços” de conexões, flanges, tampos, tubulações, escadas e plataformas, também passaram por esse processo de união. (SANCOVICEI, 2012).

Durante o processo de soldagem das virolas e outros componentes, vários tipos de problemas podem surgir, originando descontinuidades. Nesse sentido, Sancovicei (2012) afirma:

Este processo de soldagem pode ser de forma manual ou automatizado, e devido a isto podem ocasionar descontinuidades decorrentes deste processo como: faltas de fusão, faltas de penetração, porosidades, inclusões metálicas (tungstênio), inclusões não metálicas (escória), trincas, mordeduras, entre outras. As descontinuidades presentes na solda de forma descontrolada diminuem a resistência mecânica da mesma e podem gerar pontos de tensão e enfraquecimento da solda, por este motivo os end são vastamente aplicados neste processo da fabricação, sendo executados para a detecção das descontinuidades que são eventualmente eliminadas ou reparadas, os ends normalmente aplicados em juntas soldadas de vasos de pressão são: juntas de topo (emendas longitudinais de virolas e juntas circunferências virolas com virolas e virolas com tampos) [...] (p. 1)

Segundo Telles (2007), depois de finalizadas todas as soldas requeridas no processo de união, elas deverão passar por ensaios não destrutivos afim de serem detectados possíveis defeitos. Na inspeção das soldaduras deve-se fazer a examinação em ordem crescente de confiabilidade. Executando as práticas de:

- Inspeção visual;
- Inspeção por líquidos penetrantes;
- Inspeção por partículas magnéticas;
- Inspeção por radiografia total ou parcial;
- Inspeção por ultrassom.

A inspeção visual e dimensional em vasos de pressão é primordial na detecção de descontinuidades vistas a olho nu, ou seja, superficiais, em chanfros e soldas acabadas. Contando-se com o auxílio de aparelhagem especial de instrumentos ópticos e iluminação, e também, de profissional experiente. Esse tipo de exame pode apontar até mesmo prováveis defeitos internos indicados por irregularidades no cordão de solda. Sendo assim, a inspeção visual contribui para identificação de imperfeições superficiais e também orienta na busca de locais com potencial possibilidade de defeitos internos. Consequentemente, tais locais passarão por ensaios mais precisos. (TELLES, 2007).

Para verificação de descontinuidades, não visíveis a olho nu, na superfície dos vasos de pressão. É necessária a realização de ensaios não destrutivos que detectem inconformidades superficiais e subsuperficiais. Nesse caso, os métodos de ENDs mais empregados são: Líquido Penetrante e Partículas Magnéticas.

Segundo Pereira & Bernardes (2002), o exame por Líquido Penetrante ou Partículas Magnéticas deverá ser feito em:

- Em todas as soldas não radiografáveis;
- Nos locais de soldas provisórias;
- Nas soldas de anéis de reforço e de olhais de içamento ao corpo de equipamento;
- Nas soldas de fixação dos suportes do equipamento e nas soldas de chapas de reforço em locais de suportes de tubulação e de plataformas;
- Entre outros.

A detecção de falhas internas ou volumétricas em vasos de pressão é uma tarefa extremamente importante, vistos os riscos que as descontinuidades internas podem oferecer a integridade estrutural do elemento quando pressurizado. Neste caso, o exame radiográfico é largamente utilizado na detecção desses tipos de falhas. Sobre o ensaio não destrutivo por radiografia em vasos de pressão, Telles (2007, p. 280) afirma:

O exame radiográfico é capaz de detectar defeitos internos nas soldas, tais como trincas, dupla laminação, fusão incompleta, falta de penetração, bolhas, inclusões de escórias etc. As trincas e outros defeitos bidimensionais (chamados de “defeitos planares”) são os mais graves, porque podem apresentar um nível muito elevado de tensões nas bordas dos defeitos, e resultar assim em fraturas frágeis, fraturas fadiga ou por corrosão sob tensão; por esse motivo esses defeitos não são tolerados em nenhum caso pelas normas, devendo ser detectados e devidamente reparados. Note-se que dependendo da posição relativa do defeito planar e da fonte de radiação, a radiografia pode ser incapaz de assinalar o defeito. Os defeitos arredondados (bolhas, inclusões etc.) são menos graves e por isso são tolerados pelas normas

dentro de certos limites detalhadamente especificados. [...] Uma das grandes vantagens da radiografia é o fato de a inspeção resultar em documentos permanentes que são os filmes radiográficos.

Em relação as desvantagens do ensaio por radiografia, pode-se dizer que o mesmo possui limitações quanto ao uso da radiação, o qual gera riscos à saúde do operador. Deve-se considerar, ainda, o tempo necessário para realizar o processamento e interpretação dos resultados, assim como o custo elevado na aquisição de equipamentos (HELLIER, 2001).

O ensaio não destrutivo, realizado por ultrassom é outro método capaz de detectar falhas e descontinuidades internas em vasos de pressão, que oferece excelente precisão na localização e dimensionamento de possíveis imperfeições oriundas principalmente do processo de soldagem. Esse ensaio também é importante para determinar medidas de espessura de chapas metálicas ou não metálicas. Diferente do ensaio por radiografia, que necessita da revelação do filme radiográfico para aquisição dos dados. O ensaio por ultrassom garante agilidade no processamento das informações. No entanto é necessário preparo técnico adequado para interpretação correta do exame.

De acordo com Andreucci (2018, p. 7)

O ensaio ultrassônico concorre diretamente com o ensaio radiográfico em razão de ambos detectarem descontinuidades internas nos materiais. Entretanto, a imagem radiográfica das descontinuidades apresentadas no material é sempre mais confiável e fácil de ser interpretada quanto comparada à indicação mostrada na tela do aparelho de ultrassom, que nem sempre é possível afirmar com certeza o tipo da descontinuidade detectada, e por esta razão que alguns Códigos de construção prioriza o ensaio radiográfico em detrimento do ultrassom. Como exemplo podemos citar o Código ASME*, que desde o projeto do equipamento a ser fabricado já determina o seu grau de ensaio radiográfico requerido. Com o desenvolvimento e aperfeiçoamento das técnicas digitais de ultrassom o referido Código permite a substituição do ensaio radiográfico pelo ultrassom, desde que este seja totalmente mecanizado, e com registro digital.

Uma vez realizados todos os testes, por ensaios não destrutivos e exames próprios, necessários para aceitação do projeto do vaso de pressão. Sendo cumpridas todas as etapas do processo, o elemento estará condicionado a receber as devidas certificações para poder entrar em atividade.

Alguns tipos de vasos de pressão ao entrar em funcionamento podem necessitar de monitoramento contínuo, afim de indicar o surgimento de descontinuidades, devido aos esforços gerados pela carga de pressão. O ensaio não destrutivo por emissão acústica avalia a condição de integridade global do elemento, através da captação de ondas provenientes de estímulos controlados à estrutura de análise. Sendo assim é possível localizar e classificar

eventuais áreas que estejam sob alguma atividade de desgaste ou deformação. Uma das vantagens desse método é a realização da análise do comportamento dinâmico das descontinuidades. A restrição dessa técnica é a não capacidade de caracterização da morfologia do defeito localizado nem seu dimensionamento. Por esse motivo, outros ensaios não destrutivos como ultrassom e partículas magnéticas são necessários para conhecimento integral da falha. (SILVA, 2010).

De uma forma geral, pode-se afirmar que o projeto de vasos de pressão necessita seguir procedimentos de fabricação, inspeção e segurança normatizados, com a intenção de garantir a integridade estrutural dos equipamentos produzidos e, conseqüentemente, zelar pela segurança das pessoas envolvidas.

3.2 ENDs UTILIZADOS EM ESTUDOS ACADÊMICOS

Schubert et al (2012) estudaram a influência da microestrutura de soldas ou revestimentos austeníticos no ensaio ultrassônico. Concluíram que as posições das indicações inseridas não estavam exatamente conforme as posições reais. Isto foi devido à diferença de velocidade da onda nas diferentes regiões da solda penetradas pelo feixe acústico. No estudo foi desenvolvido um sistema Phased Array automatizado para inspeção das soldas dissimilares capaz de realizar medições reais da propagação do feixe sônico na solda. Com estas informações pôde ser obtida uma melhor configuração para a propagação do feixe levando a resultados mais precisos na localização dos defeitos.

FIGUEREDO e AIUB (2016) desenvolveram um procedimento de inspeção pela técnica Phased Array com feixes angulares longitudinais e transversais para inspeção de soldas circunferenciais de tubulações com espessuras de 40, 50 e 62,5 mm. Foram inspecionados os seguintes materiais: aço API 5L X65 com revestimento interno de 3mm de Inconel® 625 e metal de solda de Inconel® 625, aço Liga A333 Gr.8 com metal de solda de Inconel® 625, Liga de Níquel Inconel® B444 Gr.1. Para a inspeção foi utilizada uma sapata especial (“Water Wedge”) que permitiu a realização do ensaio com ondas longitudinais sobre o cordão de solda sem a remoção do reforço. Neste estudo, os resultados da inspeção por ultrassom Phased Array foram equivalentes ou superiores ao da inspeção radiográfica.

No trabalho de Pereira (2014), a técnica de correntes parasitas foi utilizada para caracterização microestrutural e inspeção de defeitos em superligas à base de níquel, seus resultados comprovam que as diferentes microestruturas do Inconel 718 têm efeitos distintos na condutividade elétrica quando medidos através da técnica de correntes parasitas. Em um

segundo momento foi desenvolvido um processo de otimização de sensores através de modelagem por elementos finitos (MEF) e uma ótima correlação entre os resultados numéricos e experimentais foi encontrada e o sensor ótimo se mostrou eficiente na inspeção de pequenos defeitos superficiais e subsuperficiais na liga Inconel 625 quando operado nas frequências apropriadas.

Na pesquisa desenvolvida por Camerini (2012), foi utilizada a técnica de inspeção por correntes parasitas para identificar a quantidade de fase sigma na microestrutura de diferentes amostras, com quantidades diferentes de fase em sua composição do aço inoxidável duplex. Os transdutores utilizados obtiveram sucesso em diferenciar as amostras com diferentes porcentagens de fase sigma em sua composição.

Em seu trabalho, Moraes (2016) estudou a avaliação do método de correntes parasitas convencional e SLOFEC para detecção de trincas em aço HP. O autor afirma que após a aquisição de dados, realizada várias vezes a fim de obter-se representatividade estatística, foi constatado que, com ambas as técnicas, os entalhes que se encontravam a 3 mm, 5 mm e 7 mm de profundidade foram detectados. Porém os resultados obtidos com SLOFEC apresentaram-se de forma mais consistente.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Com base em todo estudo visto, percebe-se a diversidade de ensaios não destrutivos (END) existentes no mercado e/ou ainda em caráter de pesquisa para a obtenção das características e, propriedades físico-químicas dos materiais.

Existem ensaios com complexidades distintas, tanto de execução quanto de interpretação dos resultados, os quais devem ser utilizados de acordo com as necessidades especificadas nos projetos. É importante destacar ainda que, para cada ensaio é necessária à execução por profissionais especializados na matéria para que seja possível obter resultados e interpretações corretas dos mesmos.

Nas indústrias atuais sejam elas químicas, petroquímicas, siderúrgicas, papel-celuloses, metalúrgicas, alimentícias, entre outras, os vasos de pressão são fundamentais nos processos industriais que contenham fluidos a serem armazenados ou de passagem.

Como já definido nesse estudo, os vasos de pressão são equipamentos na maioria das vezes cilíndricos que podem ser horizontais ou verticais, são construídos em aço-carbono e suas ligas, aço inoxidável, polipropileno, fibra de vidro ou qualquer outro material resistente à pressão e as condições exigidas pelo processo a ser submetido.

Nesse contexto, as inspeções internas e externas impostas pela NR 13 necessitam, em alguns casos, de ensaios não destrutivos como auxiliar para detecção de possíveis falhas que a olho nú seriam impossíveis de serem detectadas, aumentando assim a confiabilidade e segurança dos vasos de pressão.

Após a leitura desse trabalho, fica evidente que a escolha de um determinado ensaio não destrutivo não é tão simples, pois tem que se levar em conta diversos fatores como por exemplo, custo do equipamento, custo de insumo, custo operacional, material a ser inspecionado, tipos de defeitos/descontinuidades, entre outros.

REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE ENSAIOS NÃO DESTRUTIVOS E INSPEÇÃO-
ABENDI. **Guia ABENDI 2018: Ensaio Não Destrutivos e Inspeção**, 2018

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 6002 - **Ensaio não destrutivos - Ultrassom - Detecção de descontinuidades em chapas metálicas**. Rio de Janeiro: ABNT, 2015.

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

ANDREUCCI, R. **Aplicação Industrial: Ensaio por Ultrassom**, ed. Jun./2018, LTDA, 2018.

ANDREUCCI, R. **Líquidos Penetrantes**. Abendi, 2013.

ANDREUCCI, R. **Radiologia industrial**. Abendi, 2009.

BRASIL. Ministério do Trabalho. Caldeiras, Vasos de Pressão e Tubulações. Portaria MTE nº 1082, de 18 de dezembro de 2018 – **NR 13** (publicada no DOU dia 20 dezembro 2018).

BROOK, M. V. Ultrasonic Inspection Technology Development and Search Unit Design. **Editora Wiley**, ed.1, Nova York, 2012.

BURGESS, N.T. **Quality assurance of welded construction**. 2 ed. Barking: Elsevier science publishers LTD, 1989.

CAMERINI, Cesar Giron. **Desenvolvimento de sondas de correntes parasitas para detecção e quantificação de fase sigma em aço inoxidável duplex**. 2012. 140 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Metalúrgica e de Materiais) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2012.

CHEEKE, J. D. N. **Fundamentals and Applications of Ultrasonic Waves**. **Editora CRC Press**, ed.1, Londres, 2002.

CONDE, M. J. M.; LIÑÁN, C. R.; HITA, P. R. “Use of Ultrasound as a Nondestructive Evaluation Techniques for Sustainable Interventions on Wooden Structures”. **Building and Environment**. Vol. 82, p. 247-257, 2014.

FIGUEREDO, M. A. S; AIUB, M. M. Inspeção de Soldas Circunferenciais em Tubulações com Metal de Base ou Clad de Inconel Utilizando Ultrassom Phased Array sem Remoção de Reforço. In: **Congresso Nacional de Ensaios Não Destrutivos e Inspeção**, 2016. Anais... São Paulo (Brasil), 2016.

FRANÇA, F. A; 2015, “Detecção de falhas em soldas longitudinais por ultrassom assistida por simulação computacional”, **Trabalho de Conclusão de Curso, UFRJ**, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

FREESEMAN et al “Nondestructive Monitoring of Subsurface Damage Progression in Concrete Columns Damaged by Earthquake Loading”. **Engineering Structures**. Vol. 114, p. 148-157, 2016.

GUAMÁ, F.F.M.C; 2012, “Análise Estrutural de Cilindros Revestidos de Compósitos Para Armazenamento de GNV”. **Dissertação (Graduação em Engenharia Mecânica), UFRJ**, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

HELLIER, C. J. - **Handbook of Nondestructive Evaluation** - McGraw-Hill, 2003

HELLIER, C. J. **Handbook of Nondestructive Evaluation**. McGraw Hill Professional, 2001.

JACKSON JR., C. N.; SHERLOCK, C. N. **Nondestructive Testing Handbook Volume 1: Leak Testing**. 3 ed. American Society for Nondestructive Testing, 1998.

JUNIOR, Silvério Ferreira da Silva; MARQUES, Paulo Villani. **Ensaios Não Destrutivos**. Belo Horizonte, 2006.

KHAN, S. H. et al. Eddy current detection of changes in stainless steel after cold reduction. **Computational Materials Science**, v. 43, n. 4, p. 623-628, Oct 2008

LEITE, P. P. G; 1996, “Curso de Ensaios não Destrutivos”. ABM, São Paulo / SP.

LEITE, J. P; 2014, “Técnica não destrutiva para análise da interação de linhas de campo magnético e material”, **Tese de doutorado, UFPB**, João Pessoa, PB, Brasil.

LEITE, B. S; 2014, “Avaliação de estanqueidade em vasos de pressão de pequeno porte”, **Dissertação de mestrado, UFSC**, Florianópolis, SC, Brasil.

LOPES, PELLIN. **Curso de inspetor de soldagem – Nível 1**. Condor, 2010. Apostila.

- MARQUES, B. S. B.; 2017, “Aplicação da técnica de correntes parasitas para detecção de defeitos em aço dúplex 2205 com diferentes tratamentos térmicos”, **Trabalho de Conclusão de Curso, UFRJ**, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.
- MARTIN, C. C. **Ultrassom**. Editora Associação Brasileira de Ensaios Não Destrutivos e Inspeção, 1ª edição, São Paulo, 2012.
- MILANEZE, V.; 2015, “Adequação de procedimento de soldagem com base na norma iso 3834-2 na empresa tromink industrial ltda”, **Trabalho de Conclusão de Curso, UNIJUÍ**, Panambi, RS, Brasil.
- MIX, P. E. **Introduction to Nondestructive Testing: a training guide**. 2 ed. New Jersey: John Wiley & Sons, 2005.
- MORAIS, G. B. D; 2016, “Avaliação do método de correntes parasitas convencional e SLOFEC para detecção de trincas em aço HP”, **Trabalho de Conclusão de Curso, UFRJ**, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.
- MOREIRA, H. A; 2014, “Avaliação do desempenho de técnicas não destrutivas: um estudo de caso na inspeção de componentes para molas pneumáticas”, **Trabalho de Conclusão de Curso, UFC**, Fortaleza, CE, Brasil.
- Nondestructive testing handbook Volume 5, Electromagnetic Testing, Third edition, 2004.
- NELLIGAN, T.; CALDERWOOD, C. O. - Equipamentos de correntes de Foucault. 2013.
- NESS, S.; SHERLOCK, C. N. **Nondestructive Testing Handbook Volume 10: Overview**. 2 ed. American Society for Nondestructive Testing, 1996.
- OLIVEIRA, M. J; 2014, “Indicação de discontinuidades em materiais metálicos e compósitos: uma comparação entre métodos não destrutivos”, **Dissertação de mestrado, PUC-Rio**, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.
- PEREIRA, J. A. V.; 2013, “Estudo e Aplicação de Ensaios Não Destrutivos”, **Dissertação de mestrado, FEUP**, Porto, Portugal.
- PEREIRA, D; 2014, “Avaliação do método de correntes parasitas para caracterização microestrutural e inspeção de defeitos em superligas à base de níquel”, **Dissertação de mestrado, UFRS**, Porto Alegre, RS, Brasil.

PEREIRA, J.B.S; BERNARDES, R. ENDS - Ensaios Não Destrutivos - Aplicados à Fabricação de Vasos de Pressão. In: Conferência sobre Tecnologia de Equipamentos. **Trabalho apresentado** na 6ª COTEQ. Salvador, BA, Brasil; agosto de 2002.

PETROBRAS. **Norma Petrobras N-268**. revisão G. Fabricação de Vasos de Pressão. Rio de Janeiro, Petrobras, 2012. 39 p.

REVISTA DO PARAFUSO. **Ensaios Não Destrutivos: uma visão geral**. Disponível em: <<http://www.revistadoparafuso.com.br/v1/modelo/noticia.php?id=67>>. Acesso: 11 fev. 2019.

SANCOVICEI, A.A. **Inspeções e ensaios não destrutivos em vasos de pressão**. Revista Meio Filtrante, Edição Nº 55 de 2012. Disponível em: <<http://www.meiofiltrante.com.br/edicoes.asp?id=766&link=ultima&fase=C&retorno=c&retorno=b>>. Acesso: 30 abr. 2019.

SAMPAIO, M. V; 2009, “Aplicação da inspeção não intrusiva em equipamentos do sistema de dessulfurização de gás natural da plataforma de pampo”, **Dissertação de mestrado, UFRS**, Porto Alegre, RS, Brasil.

SANTOS, J.F. Oliveira. **Ensaio Não Destrutivos**. Portugal, Lisboa, 1999.

SANTOS, M., **Apostila de Partículas Magnéticas**, Petrobras, Curso de Formação de Engenheiros de Equipamentos Inspeção, 2008.

SANTIN, J. L.; **Ultra-som: Técnica e Aplicação**, 2ª ed, LTDA, Curitiba, 2003.

SCHUBERT, Frank et al. A New Ultrasonic Phased Array Testing System for Dissimilar Welds. **Radiation Protection**, v. 7, p. 12428, 2012.

SIMAS FILHO et al. “Decision Support System for Ultrasound Inspection of Fiber Metal Laminates Using Statistical Signal Processing and Neural Network”. **Ultrasonics** Vol. 53, p. 1104-1111, 2013.

SILVA JUNIOR, S. F.; MARQUES, P. V. **Ensaios Não Destrutivos**. Belo Horizonte, 2006.

SILVA, M. A. C. DA; 2010, “Caracterização do sinal gráfico de emissão acústica (EA) para avaliação de integridade estrutural do aço ASTM A 516 / A 516M – Grau 60”, **Tese de doutorado, PUC-Rio**, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

STAIN, R. M; 2017, “Estudo da técnica de ensaio não-destrutivo ultrassom phased array”, **Trabalho de Conclusão de Curso, UFES**, Vitória, ES, Brasil.

TEKINOX. **Industria de vasos de pressão.** Disponível em:

<<http://www.tekinoxcampinas.com.br/industria-vasos-pressao>>. Acesso: 01 mai. 2019.

TELLES, P. C. S. **Vasos de pressão.** 2 ed. Rio de Janeiro: LTC, 2007.