

2. REVISÃO DE LITERATURA

2.1. Ensaaios destrutivos

São técnicas amplamente utilizadas nas indústrias na análise de falhas, que possuem a finalidade de detectar características e verificar propriedades mecânicas. Ao ensaiar um componente deve-se levar em consideração que os materiais possuem falhas e que as microestruturas podem ser heterogêneas ou dependentes do local a ser ensaiado (aço carbono) ou direcionais (compósitos). A fim de que se obtenha as corretas propriedades no projeto, deve-se garantir que as relações geométricas entre a microestrutura e as tensões nas amostras de teste sejam compatíveis com o produto final [3].

Na realização dos ensaios mecânicos destrutivos, deve-se seguir as seguintes etapas:

- Retirada de amostras do material a ser inspecionado, utilizando processos de fabricação (torneamento, fresamento, etc).
- Confecção de corpos de prova, com geometrias específicas e medidas determinadas através de normas.
- Execução do ensaio, no qual a peça será rompida ou deformada para detecção de suas propriedades mecânicas.

A Figura 1 ilustra alguns exemplos de corpos de prova utilizados nos ensaios destrutivos.

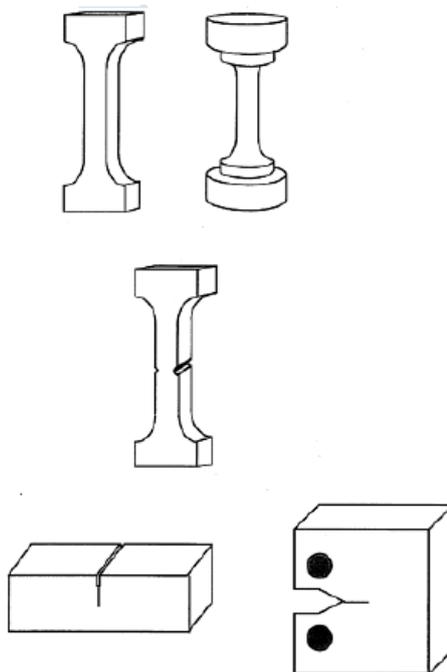


Figura 1 - Exemplos de corpos de prova usados nos ensaios destrutivos [3].

Os ensaios destrutivos simulam as condições de operação do componente mecânico, desta forma a medição da propriedade de interesse é obtida diretamente, já que todo procedimento de ensaio é estabelecido por uma norma específica e não depende da interpretação do operador. Os parâmetros obtidos por estes ensaios, tais como: limite de resistência mecânica, ductilidade, limite de escoamento, resistência a fadiga, são quantitativos que podem ser utilizados na especificação de materiais para elaboração de projetos. Como exemplos dos ensaios destrutivos, temos os ensaios de tração, compressão, dureza, fadiga entre outros.

As desvantagens associadas aos ensaios destrutivos são: custo elevado de confecção de corpos de prova, horas de maquinário envolvido e pessoal qualificado, o que pode acarretar em limitação do número de corpos de prova a serem ensaiados. Uma desvantagem importante é o fato do ensaio não ser necessariamente executado diretamente na peça que vai ser colocada em operação. Em função disso através de outros meios, deve-se realizar uma comparação com as peças que serão efetivamente utilizadas. A mão de obra e o

tempo para realização do ensaio são elevados o que gera um acréscimo nos custos de fabricação e torna proibitivo seu uso como método primário de controle de qualidade da produção [2].

2.2. Ensaio não destrutivo

São técnicas que possuem o propósito de medir, detectar propriedades ou verificar o desempenho de materiais metálicos (ferrosos ou não ferrosos) e materiais não metálicos, na forma de peças ou componentes acabados ou semi-acabados, utilizados em equipamentos ou estruturas metálicas [4].

A capacidade de detecção de descontinuidades encontradas no interior dos materiais só é possível através da aplicação dos ensaios não destrutivos (END). O uso desses métodos permite que peças de grande responsabilidade tenham seu funcionamento em serviço garantido.

Os princípios básicos desses ensaios são norteados pela aplicação de energias físicas de modo que não causem danos aos produtos inspecionados. Entre as definições utilizadas e aceitas pela grande maioria dos usuários de END, têm-se que: “São ensaios que, ao serem aplicados, não afetam ou causam prejuízo no funcionamento posterior da peça (total ou parcialmente)” [5].

Observa-se que o ensaio pode proporcionar algum vestígio, desde que o mesmo não tenha influência no funcionamento do componente. Outra definição, que apresenta um maior rigor, determina que “são ensaios que não produzem vestígio posterior após sua aplicação” [5].

As razões para que as indústrias utilizem os ensaios não destrutivos são: para que os produtos fabricados tenham um grau de qualidade exigido, mantenham a boa reputação da empresa; gerem margens de lucros mais satisfatórias, evitem a interrupção de serviços essenciais e, principalmente reduzam o fator de segurança através da prevenção de acidentes. Dentre os principais motivos para utilização dos END, destacam-se: capacidade de detecção de descontinuidades ou defeitos em diferentes dimensões, posições e formatos. Determinação das propriedades físicas dos materiais, tais como : propriedades ópticas, elétricas, magnéticas e mecânicas, através da avaliação estrutural de componentes (microestrutura e estrutura da matriz) [1].

Segundo Andreucci [6], os END são avaliados como processos especiais pelos sistemas da qualidade como, principalmente, 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 **ABENDE** (Associação Brasileira de Ensaaios Não Destrutivos) e internacionais como a **ASME** (Sociedade Norte Americana de Engenheiros Mecânicos) são capazes de validar tais exigências.

A definição entre a escolha do método de ensaio a ser utilizado está vinculada a diversos fatores, tais como: material a ser inspecionado, tipo de propriedade a ser verificada, custo de realização do ensaio, mão de obra especializada, instalações para realização do ensaio, entre outros.

A escolha por um determinado procedimento em detrimento de outros métodos é realizada através das possibilidades de detecção que este ensaio é capaz de fornecer. Caso mais de um método possua essa capacidade, pode-se escolher o que mais se adapte a realidade de inspeção. Outro fator que pode ser levado em consideração é a velocidade com que o ensaio é realizado podendo gerar uma automatização, incorporação ao processo de fabricação e até mesmo no controle de produção, desde que, obviamente, seja economicamente viável [7].

Dentre os métodos de avaliação não destrutiva, são classificados grupos distintos que são determinados de acordo com a descontinuidade que se deseja determinar:

- Método de inspeção nas superfícies (descontinuidades observadas na superfície externa ou subsuperficial). Exemplos de ensaios desse grupo: o ensaio visual, líquidos penetrantes e partículas magnéticas.
- Método de inspeção volumétrica (descontinuidades observadas no interior dos materiais). Exemplos de ensaios desse grupo: o ensaio por ultrassom, ensaio radiográfico e a termografia.

A Tabela 1 apresenta uma comparação entre diferentes métodos de ensaio e suas variáveis relativas, tais como: custo, geometria das descontinuidades, e requisitos de operação.

Tabela 1- Métodos de ensaio x variáveis. Adaptada de [8].

Variáveis	Método de ensaio				
	Ultrassom	Raios-X	Correntes parasitas	Partículas magnéticas	Líquidos penetrantes
Capital	Médio para alto	Alto	Baixa para média	Médio	Baixo
Tempo para os resultados	Imediato	Atraso	Imediato	Pequeno atraso	Pequeno atraso
Efeito da geometria	Importante	Importante	Importante	Não tão importante	Não tão importante
Problemas de acesso	Importante	Importante	Importante	Importante	Importante
Tipos de defeito	Internos	Maioria	Externos	Externos	Superficiais
Sensibilidade	Alta	Média	Alta	Baixa	Baixa
Registros formais	Caros	Padrão	Caros	Não usual	Não usual
Habilidade do operador	Alta	Alta	Média	Baixa	Baixa
Treinamento dos operadores	Importante	Importante	Importante	Importante	Importante
Necessidade de formação	Alta	Alta	Média	Baixa	Baixa
Portabilidade do equipamento	Alta	Baixa	Alta para média	Alta para média	Alta
Dependência da composição do material	Muito baixo	Bastante	Muito	Somente ferromagnéticos	Pouca
Capacidade de automatização	Boa	Razoável	Boa	Pouca	Pouca

Outras técnicas possuem como vantagem sua utilização em tempo real. Exemplos de ensaios desse grupo: a atividade termográfica e a emissão acústica [9].

As Figuras 2 e 3 ilustram descontinuidades superficiais, subsuperficiais e internas e seus diferentes métodos de detecção respectivamente.

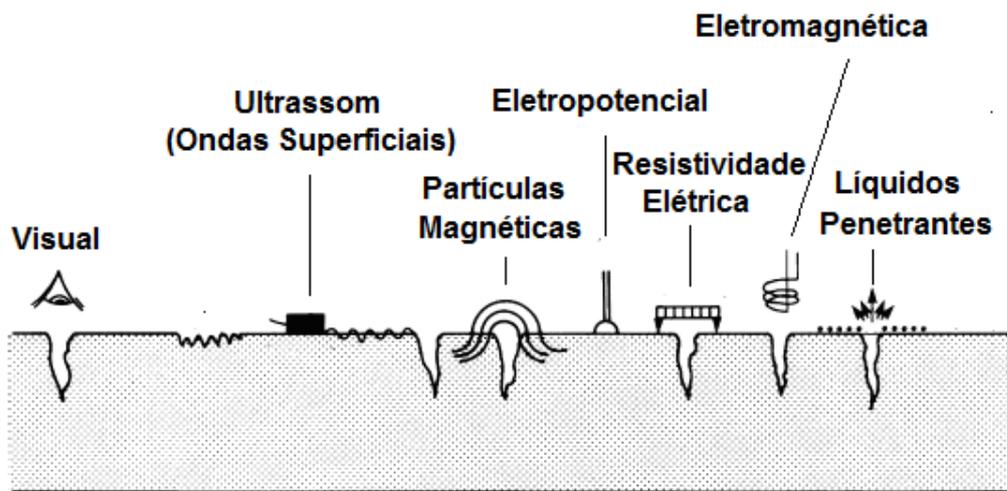


Figura 2 - Descontinuidades superficiais e subsuperficiais e seus diferentes métodos de detecção. Adaptada de [10].

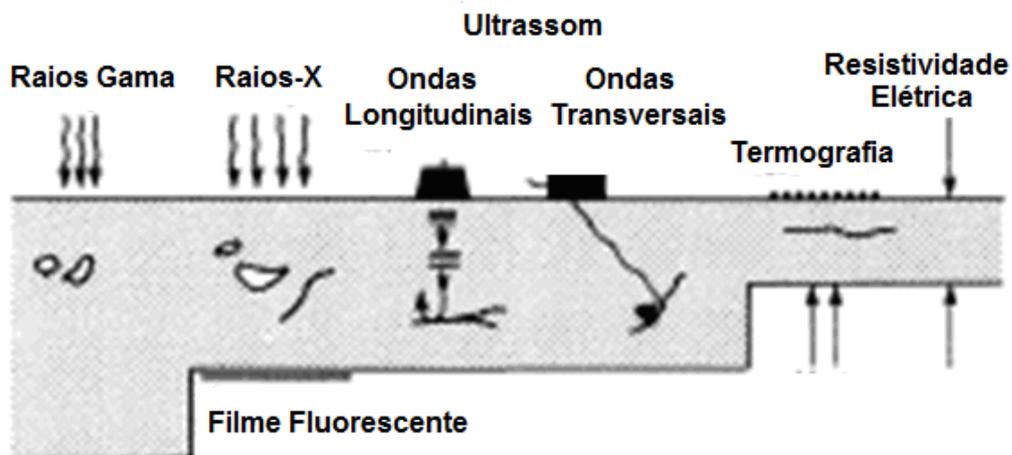


Figura 3 - Descontinuidades internas e seus diferentes métodos de detecção. Adaptada de [10].

O uso dos END, pode ser utilizado como um instrumento auxiliar ao ensaio destrutivo, visto que podem ser utilizados como processos complementares.

Os testes são realizados nas peças que efetivamente serão colocadas em operação, o que gera uma maior confiabilidade no seu emprego. Todas as peças fabricadas podem ser ensaiadas (desde que exista uma justificativa econômica), e colocadas em serviço, mesmo que apresentem diferenças no lote de fabricação, desde que atendam aos requisitos de projeto.

Os ensaios têm a capacidade de detecção de diversas propriedades em diferentes regiões do material, podendo ser implementados em sequência ou simultaneamente. A utilização dos END, muitas vezes não exige a interrupção do serviço, a parada de máquinas para verificação das peças, além de garantirem a integridade do material e que as condições de operação mantenham-se inalteradas.

Uma das grandes barreiras enfrentadas pelo END é comprovar sua capacidade de detecção de descontinuidade tanto pelo lado interno ou, de preferência, pelo lado externo do componente a ser avaliado. A Figura 4 apresenta como exemplo uma inspeção externa em vasos de pressão esféricos utilizados para armazenamento de combustíveis [11].

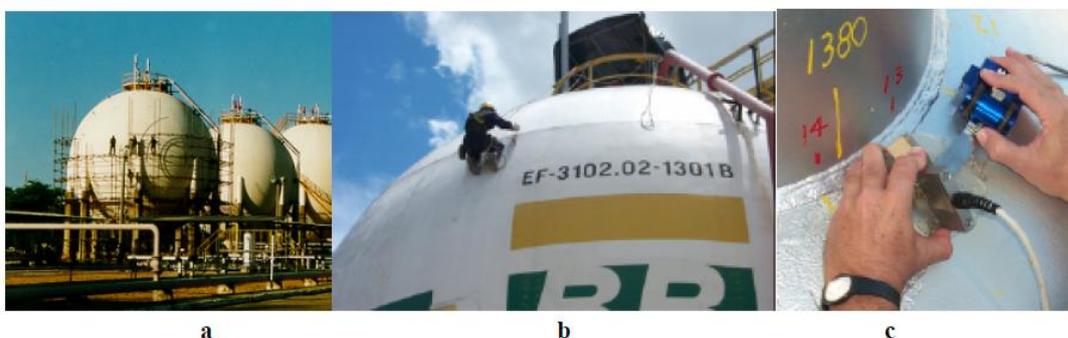


Figura 4 - Inspeção externa não intrusiva de esfera. a – montagem de andaimes pela parte externa da esfera; b – utilização de inspetores escaldores na inspeção externa; c – inspeção de cordão de solda em boca de visita de esfera [11].

Os ensaios não destrutivos são caracterizados por cinco requisitos, que são: escolha de uma fonte que ofereça um tipo específico de meio de inspeção ao produto a ser testado (som, radiação eletromagnética). A variação do meio inspecionado em função das descontinuidades presentes ou das alterações nas propriedades verificadas. Um dispositivo para detecção sensível as modificações presentes. Registro das variáveis apresentadas pelo detector de forma eficiente para que seja analisada posteriormente e por fim um operador ou equipamento capaz de fazer as interpretações das propriedades requeridas ou da presença, tamanho e localização de descontinuidades.

O objetivo primordial do ensaio não destrutivo é propiciar ao inspetor informações quantitativas e qualitativas das descontinuidades detectadas, tais como: corrosões, porosidades, bolhas, e inclusões entre outras. Em geral uma descontinuidade inicia-se com reduzidas dimensões e, eventualmente, com a

aplicação de cargas externas, pode evoluir criando defeitos catastróficos, caso não sejam descoberta com uma antecedência prévia.

Os inspetores devem possuir requisitos como habilidade e experiência, pois são fundamentais na determinação do quantitativo e posicionamento das descontinuidades. Também é fundamental para uma interpretação correta, a compreensão dos fenômenos físicos envolvidos no processo.

A comparação ou avaliação da aplicabilidade do ensaio tem como definições de desempenho a análise estatística ou probabilística. As indústrias utilizam essas informações como parâmetros na definição da técnica que apresenta melhor desempenho ou melhores índices de detecção [12].

A execução de inspeções ou uma rotina de ensaios não destrutivos na detecção de defeitos devem ser previstas durante toda a vida útil do componente. Os exemplos de END utilizados nas indústrias são: teste hidrostático, estanqueidade, ultrassom, líquidos penetrantes, raios X, gamagrafia, partículas magnéticas dentre outros [13].

As limitações de determinado método, suas vantagens, desvantagens, sensibilidade, precisão e as descontinuidades encontradas, podem induzir a necessidade do uso de mais de um ensaio não destrutivo, pois cada técnica tem a capacidade de fornecer informações específicas a determinadas classes de defeitos.

A Tabela 2, apresenta uma comparação entre as vantagens, desvantagens e utilização dos diversos tipos de ensaios não destrutivos.

Tabela 2 - Comparação entre ensaios não destrutivos. Adaptada de [14].

COMPARAÇÃO ENTRE OS ENSAIOS NÃO DESTRUTIVOS				
Método	Características	Vantagens	Limitações	Exemplos de uso
Ultrassom	Mudança na impedância acústica causadas por trincas, inclusões ou interfaces.	Podem penetrar em materiais espessos, excelente para detecções de trincas, podem ser automatizados.	Normalmente requer o acoplamento ao material, quer por contacto com a superfície ou imersão num fluido tal como a água. Superfície deve ser lisa.	Inclusões, laminação, trincas, rechupes, poros, falta de fusão.
Radiografia	Mudanças na densidade por vazios, inclusões, materiais variados, localização de partes internas.	Podem ser usados para inspeção de uma gama de materiais e espessuras, versátil possui filmes para gravação das inspeções	Segurança radiológica, requer precauções, detecção de trincas podem ser difícil perpendicularmente aos Raios X.	Soldas de penetração em tubos, para inclusões e vazios, defeitos internos.
Ensaio visual	Superfícies características tais como trincas com cores, tensão em materiais transparentes, corrosão.	Muitas vezes conveniente, pode ser automatizado.	Só pode ser aplicado em superfícies através de aberturas de superfície, trincas ou material transparente.	Madeira, papel ou metal para acabamento superficial e uniformidade.
Corrente Parasita	Mudanças na condutividade elétrica causada por vários materiais, trincas, vazios ou inclusões.	Prontamente automatizado, custo moderado.	Limitado a materiais condutores de eletricidade profundidade de penetração limitada.	Tubos de trocador de calor para a parede, desbastes e trincas
Líquido penetrante	Aberturas de superfície, devido a trincas, porosidade, soldagens ou dobras.	Barato, fácil uso, prontamente portátil, sensível para pequenas falhas superficiais.	As falhas devem estar abertas a superfície. Não é útil em materiais porosos ou superfícies rugosas.	Lâminas de turbina com trincas superficiais ou porosidade.
Partícula magnética	Fuga de fluxo magnético gerado pela superfície ou perto da superfície, trincas, vazios, inclusões ou materiais com alterações de geometria.	Baratos ou com custo moderado, sensíveis a ambas superfícies e defeitos superficiais próximos.	Limitado a materiais ferromagnéticos pode ser necessária a preparação de superfície e desmagnetização pós-inspeção.	Rodas ferroviárias com trincas, grandes peças.

2.3. Ultrassom

2.3.1. Histórico

No passado os inspetores avaliavam as peças metálicas através do “ensaio de tinido” que consistia na observação do som produzido através da percussão de peças com um martelo. As regras básicas para o uso deste ensaio eram enfatizadas no tipo de martelo, considerando o peso e o formato do mesmo e a maneira como era suspensa a peça metálica. As peças metálicas com rachaduras ao serem golpeadas produzem notas sonoras “surdas e ásperas”, quando analisadas em referência a peças semelhantes sem rachaduras. Esses termos eram utilizados para caracterizar o ensaio do tinido. Outra aplicação deste tipo de ensaio era encontrada em sinos, âncoras e ferros de navio, com paredes delgadas. A capacidade deste método era limitada a experiência e habilidade do inspetor em conhecer o som emitido pelas peças íntegras, em comparação com as peças defeituosas [15].

Atualmente a utilização da percussão de materiais e análise do som produzido ainda encontra emprego na avaliação do estado de um produto ou qualidade de um serviço, como por exemplo: em refratários onde a compacidade e aderência são necessárias [16].

Na metalurgia, o ensaio por ultrassom encontra aplicação através da detecção de descontinuidades internas em peças que possuam superfícies reflexivas, oriundas dos próprios processos de fabricação tais como: rechupes, bolhas de gás ou inclusões em produtos fabricados por fundição, escórias em junções soldadas, microtrincas em produtos forjados dentre outros. Sua utilização como um instrumento de controle de qualidade é amplamente difundida em diferentes áreas como: automobilística, mecânica, aeronáutica, naval e nuclear.

O ultrassom é utilizado para detectar e descrever descontinuidades no material, pois essa falta de continuidade causa dispersão do feixe sônico, que pode ser observada no eco. Usando as propriedades de retorno do som (velocidade e tempo) é possível descrever a posição, a dimensão e a geometria da descontinuidade, o que torna possível prever a severidade e um possível dano ao componente inspecionado [17].

O ensaio não destrutivo por ultrassom é considerado como o principal e de maior utilização dentre os métodos não destrutivos com a finalidade de detecção

e avaliação de descontinuidades internas e superficiais. Este tipo de ensaio, também é utilizado, quando existe a necessidade de medir espessuras ou especialmente no estudo de degradações, pois permite analisar a evolução do grau de corrosão ou desgaste. A determinação de propriedades físicas, estrutura, tamanho de grão e propriedades elásticas, tais como coeficiente de Poisson e módulo de Young, são exemplos que podem ser obtidos por esse método de inspeção [16,18].

Outra aplicação extremamente importante do ensaio por ultrassom é sua integração com às ferramentas da mecânica da fratura. O estudo em conjunto do ensaio e dos cálculos, auxilia na análise do tempo de vida remanescente de componentes. A qualidade do material, as ferramentas utilizadas na construção ou mesmo o processo de fabricação, não são capazes de produzir de um modo geral, peças completamente livres de descontinuidades ou defeitos. O tamanho de uma trinca admissível em um determinado material em função de uma aplicação específica, como por exemplo, uma solicitação de tração, pode ser determinada pelo ultrassom no controle do tamanho de uma descontinuidade existente e auxiliar nos cálculos da vida útil de produtos de extrema responsabilidade [19].

Os ensaios por ultrassom são executados seguindo procedimentos que são estruturados de acordo com regras ou critérios das normas técnicas ou especificações dos códigos. Como exemplo as indústrias nucleares seguem procedimentos determinados pela norma ASME, os códigos são publicados pela Sociedade Americana de Ensaio e Materiais (ASTM) e os padrões usados por regulamentos da Comissão Nuclear (NC) [20].

2.3.2. Princípios do método

O som é uma onda mecânica, pois depende do meio (sólido, líquido ou gás), para conseguir se propagar. Uma onda é uma perturbação nas condições de equilíbrio das partículas que compõem o meio sem que ocorra transporte de matéria [17]. A capacidade de propagação do som através desses meios é função de determinadas propriedades, tais como densidade, módulo de Young e frequência de transmissão da onda sonora. Essa frequência é medida na unidade Hertz, ou seja o número de ciclos por segundo [22]. A capacidade auditiva humana (som audível) é limitada entre as faixas de frequência entre 20 Hz a 20000 Hz. A faixa inferior a 20 Hz é denominada como infrassom e a faixa

superior a 20000 Hz ultrassom. A Figura 5, apresenta uma classificação dos tipos de sons em função da frequência.

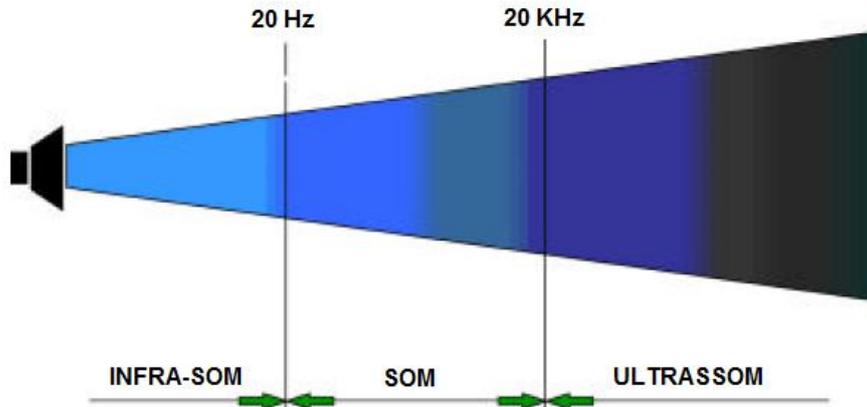


Figura 5 - Tipos de sons em função da frequência [22].

O ensaio por ultrassom possui como característica intrínseca a emissão de uma onda sônica, que é uma forma de energia mecânica, com frequência extremamente elevada acima de 20000 Hz. Essa transmissão recebe o nome de ultrassom, não é perceptível ao ouvido humano, deve atravessar o material a ser inspecionado e ao encontrar uma interface reflete e pode ser detectada para interpretação e determinação de descontinuidades [16]. Na Figura 6 observa-se um esquema de ensaio ultrassônico com o respectivo gráfico amplitude x tempo.

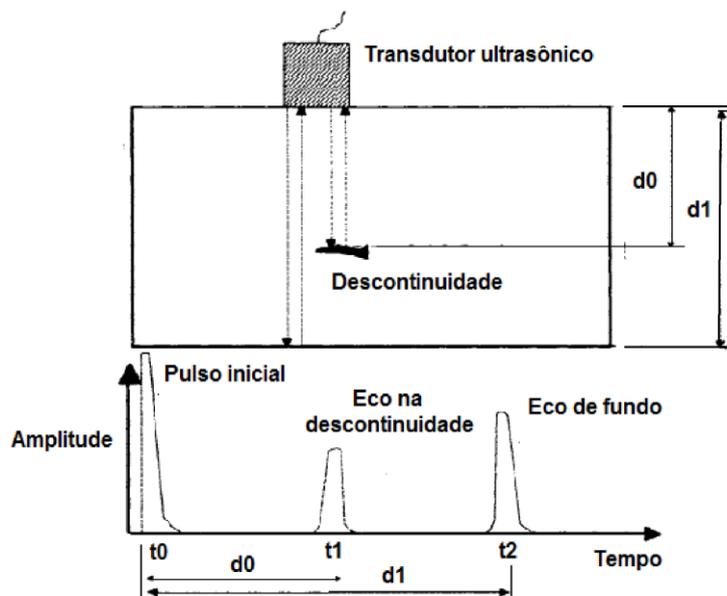


Figura 6 - Esquema de inspeção ultrassônica e gráfico. Adaptada de [1].

Este método de inspeção consiste num transdutor (equipamento que converte um tipo de energia em outro tipo de energia) [21] dotado de um cristal piezoelétrico que transforma a tensão de voltagem pulsante de alta frequência em pulso ultrassônico (energia mecânica em forma de onda vibracional), a transmissão desse pulso através do material caracterizará a geometria e propriedades mecânicas. A emissão do sinal pode ser realizada por alguns métodos: pode ser enviada a outro transdutor (método por transparência) ou refletida ao transdutor de origem (método pulso eco). Em qualquer método o retorno do sinal é convertido num sinal elétrico que pode ser analisado na tela de um osciloscópio [17].

Os aparelhos utilizados nos ensaios de ultrassom fazem a detecção das discontinuidades pelo monitoramento das reflexões sônicas enviadas ao material pelo cabeçote que deve estar sempre acoplado a peça a ser analisada. O aparelho possui um visor que tem a capacidade de determinar a intensidade da energia refletida e do posicionamento das interfaces. Através da análise dessa energia refletida a presença ou não de discontinuidades no material pode ser comprovada pelos inspetores [16]. Na Figura 7, observa-se um exemplo do princípio básico do método de transmissão pulso-eco.

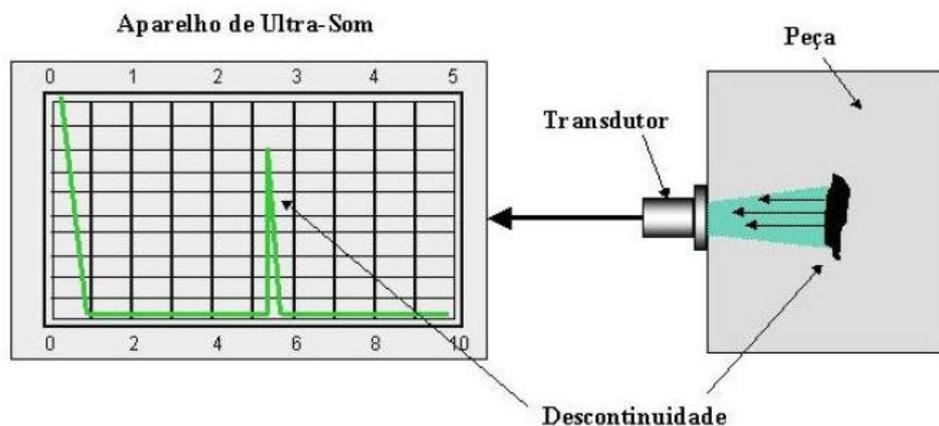


Figura 7 - Princípio básico do método por ultrassom [22].

2.3.3. Velocidade de propagação

A velocidade de propagação sonora é definida como o espaço percorrido pela onda na unidade de tempo; é uma propriedade do meio sendo constante

para cada tipo de material e sua relação com a frequência e o comprimento de onda é obtida através da Equação 1:

$$V = \lambda \cdot f \quad (1)$$

V = Velocidade de propagação da onda sonora (m/s);

λ = Comprimento de onda (m);

f = Frequência da onda (Hz).

A capacidade de detecção de descontinuidades pode ser ajustada. A velocidade de propagação é uma constante dos materiais, variando-se a frequência de transmissão (f), o comprimento de onda (λ) também sofrerá modificações, que serão de extrema importância, pois menores comprimentos de onda permitem a detecção de descontinuidades com menores dimensões. Como regra geral descontinuidades com dimensões menores que meio comprimento de onda não são detectadas [22].

Segundo Pereira [18] no ensaio por ultrassom são utilizadas altas frequências e essa escolha possibilita adequar o ensaio a diferentes elementos e suas composições. Frequências elevadas possibilitam maior detecção de trincas menores, maior resolução na distinção de trincas muito próximas e redução da capacidade de penetração da onda no meio, fato evidenciado em materiais com grãos de maiores dimensões [19]. Nos materiais metálicos as frequências de inspeção estão situadas na faixa entre 0,5 MHz a 10 MHz; e nos materiais não metálicos entre 50 kHz a 100 kHz [18].

2.3.4. Atenuação sônica

Atenuação sônica é a redução na energia mecânica da onda em função da dispersão (devido ao material possuir defeitos internos oriundos de sua estrutura (contorno de grão) ou processo de fabricação (forjamento, laminação) e da absorção que ocorre quando uma vibração acústica percorre um meio elástico transformando a energia mecânica em energia térmica [16,19]. Testes para medição e verificação da atenuação sonora podem ser difíceis, pois os sinais detectáveis dependem das frequência de operação, geometria da onda e da natureza correta dos materiais avaliados. Os materiais podem variar enormemente em função da história térmica dos constituintes de uma liga ou de

outros integrais (percentuais fibras/matriz, direções preferenciais das fibras) [20]. A Tabela 3 apresenta alguns materiais com valores de atenuação sônica.

Tabela 3 - Atenuação sônica de diferentes materiais. [22].

Material Aço Cr-Ni	Atenuação Sônica (dB/mm)
Forjados	0,009 a 0,010
Laminados	0,018
Fundidos	0,018

2.3.5. Impedância acústica

A impedância acústica é, por definição, o produto da massa específica pela velocidade com que o som é propagado. Na Equação 2 observa-se os parâmetros para o cálculo.

$$Z = \rho \cdot V \quad (2)$$

onde:

Z = Impedância acústica ($\text{kg} / \text{m}^2 \text{s}$)

ρ = massa específica (kg/m^3)

V = Velocidade de propagação da onda longitudinal (m/s)

É uma característica que determina a quantidade de reflexão e transmissão acústica entre dois materiais. Caso a impedância acústica entre os materiais seja igual, não ocorrerá reflexão e quanto maior for a divergência entre as impedâncias maior será a reflexão. A Figura 8 apresenta um esquema da reflexão e transmissão da onda sônica.

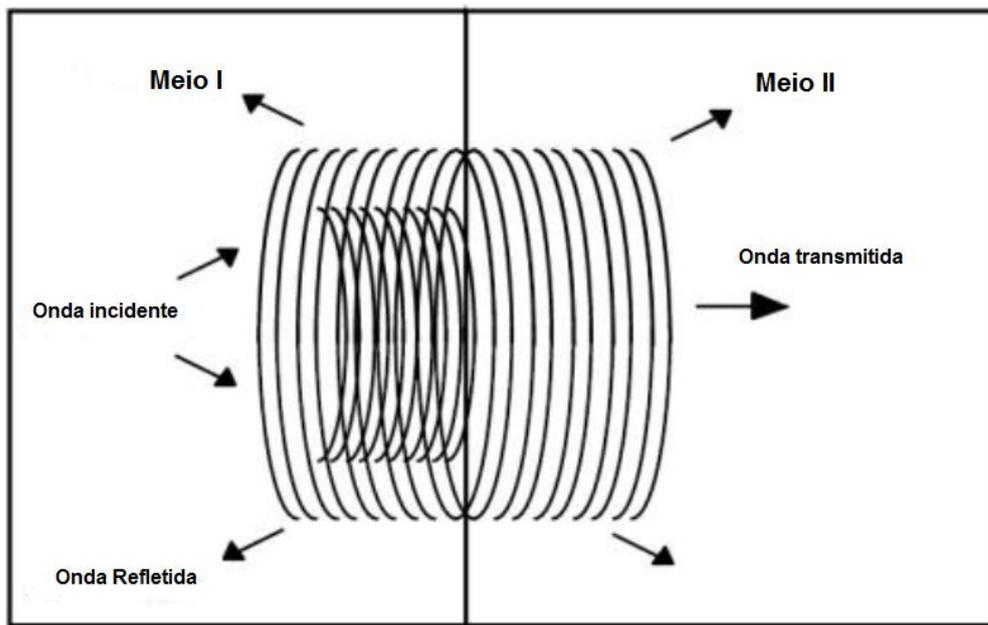


Figura 8 - Reflexão e transmissão da onda sônica [18].

2.3.6. Comportamento do feixe sônico

O feixe sônico produzido no transdutor é gerado por uma fonte de energia ultrassônica, (cristal piezoelétrico). Entretanto, essa produção não é realizada por um único ponto do cristal e sim por toda sua superfície. O cristal pode ser considerado como um grande grupo de fontes pontuais muito próximas. Fato que resulta em interferências ondulatórias construtivas e destrutivas que influencia na intensidade do feixe sonoro durante sua transmissão [16].

O feixe sonoro emitido pelo transdutor pode ser dividido em duas áreas distintas denominadas: **campo próximo** (zona de Fresnel) ou **campo distante** ou longínquo (zona de Fraunhofer) [20,22]. A Figura 9 ilustra as duas áreas do feixe sônico.

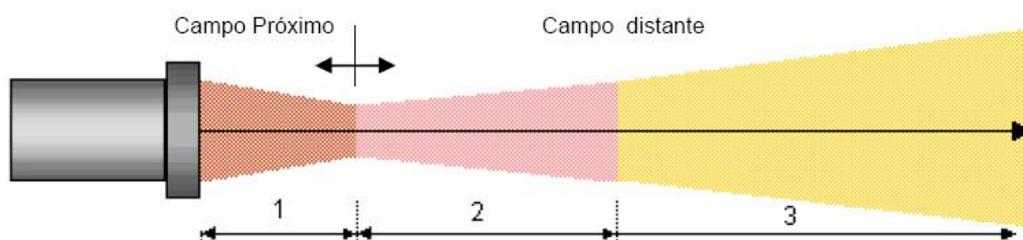


Figura 9 - Áreas do feixe sônico [22].

2.3.7. Campo próximo

O campo próximo é a região de número 1, da Figura 9, adjacente ao transdutor, que possui regiões de alta e baixa pressão simétricas produzidas por frentes de onda que surgem de interferências de uma fonte de som contínua, ou próxima [20]. Todas as fontes sonoras possuem esse campo próximo com dimensões dependentes da sua forma, características do meio onde o som é propagado e da frequência sônica [16]. É uma região de difícil avaliação das discontinuidades. Possui uma extensão N , dependente do diâmetro do cristal e do comprimento de onda (λ) que pode ser calculada através da Equação 3 [22].

$$N = \frac{D_{ef}^2}{4 \cdot \lambda} \text{ Ou } N = \frac{D_{ef}^2 \cdot f}{4 \cdot v} \quad (3)$$

onde:

D_{ef} = diâmetro efetivo do cristal (Depende da forma geométrica).

Para cristais circulares, $D_{ef} = 0,97 \times$ diâmetro do cristal

Para cristais retangulares, $D_{ef} = 0,97 \times$ metade do comprimento do lado maior do cristal.

f = frequência ultra-sônica (Hz)

λ = comprimento de onda (m)

v = velocidade de propagação do som = $\lambda \times f$ (m/s)

2.3.8. Campo distante

A região de número 2 na Figura 9 é denominada zona de transição, é a região limite ao campo próximo, possui comprimento entre $1N$ e $3N$, ângulo de divergência variável e pressão sônica máxima. Descontinuidades maiores podem ser detectadas [16, 22].

Na Figura 9 a região 3 é conhecida como campo distante ou longínquo, o feixe sonoro começa a divergir e as interferências de onda não influenciam a pressão sônica. Descontinuidades proporcionais ao comprimento de onda podem ser detectadas.

2.3.9. Propagação das ondas

As ondas ultrassônicas não são capazes de se propagar no vácuo, para que ocorra sua propagação necessitam de um meio elástico, que pode ser gasoso, líquido ou sólido. [23] A velocidade de uma onda ultrassônica é dependente das propriedades do meio que ela está atravessando e não das propriedades da onda. [22] Os meios elásticos são compostos por partículas rigidamente ligadas que podem oscilar em qualquer direção, possuem diferentes distâncias atômicas, densidades e forças de atração. A Figura 10 apresenta diferentes estruturas atômicas.

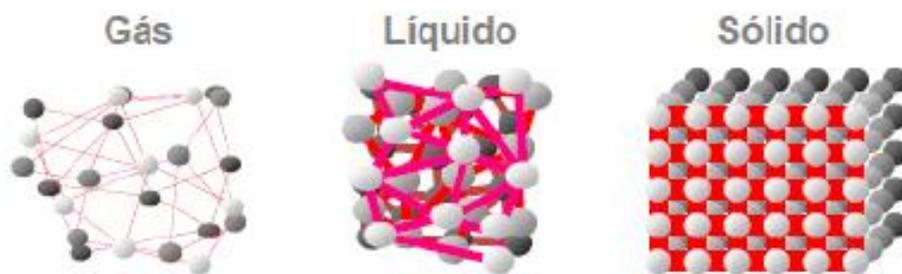


Figura 10 - Estruturas atômicas, gás, líquido e sólido [18].

Nos gases as ondas sonoras são transmitidas através da compressão ou rarefação das moléculas no sentido de propagação. Nos sólidos a densidade é maior, as distâncias moleculares são menores e as forças de coesão são extremamente elevadas, principalmente em função das estruturas cristalinas organizadas, fato que possibilita as ondas sonoras se propagarem nos sólidos em quatro diferentes modos (Superficiais, Rayleigh, Crepping e Lamb) [18].

2.3.9.1. Ondas longitudinais

As ondas longitudinais são também designadas como ondas de compressão, têm como princípio básico seu modo de atuação, que consiste nas partículas oscilarem no mesmo sentido de propagação da onda longitudinal produzindo regiões de compressão ou rarefação. Este tipo de transmissão tem boa aplicabilidade a todos os tipos de materiais. Nos líquidos e gases essa propagação é efetuada alterando pontualmente a densidade, molécula a molécula. Na inspeção de materiais esse tipo onda encontra sua maior utilização. A Figura 11 apresenta o esquema de propagação das ondas

longitudinais e, como pode ser verificado, o comprimento de onda (λ) é determinado através da distância entre duas zonas de compressão adjacentes [24].

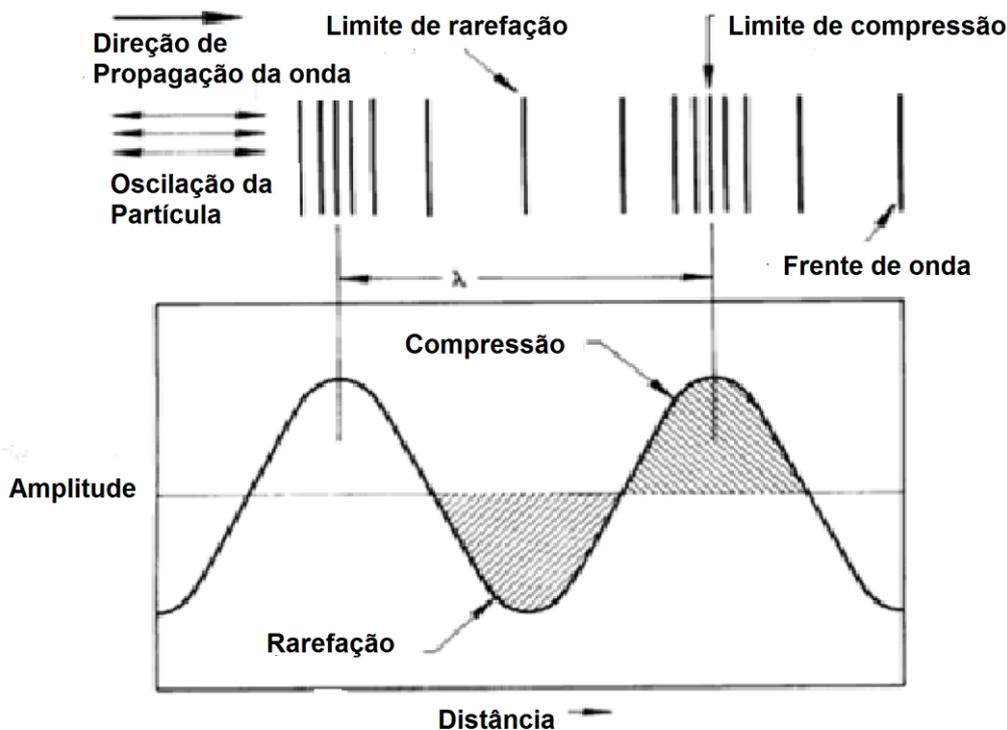


Figura 11 - Esquema de propagação das ondas longitudinais. Adaptada de [24].

2.3.9.2. Ondas transversais

As ondas de compressão são também designadas como ondas de cisalhamento ou ondas de corte e têm como princípio básico seu modo de atuação que consiste nas partículas oscilarem na direção perpendicular ao sentido de propagação da onda. Na Figura 12 pode ser observado o modo de transmissão das ondas de cisalhamento ou transversais. O comprimento de onda (λ) é determinado através da medida entre dois vales ou cristas adjacentes. O requisito básico para este tipo de propagação é que as partículas possuam elevada força de coesão, portanto é aplicável aos materiais sólidos, não sendo utilizada nos líquidos e gases. A velocidade de propagação das ondas transversais é aproximadamente metade do valor das ondas longitudinais [16, 22].

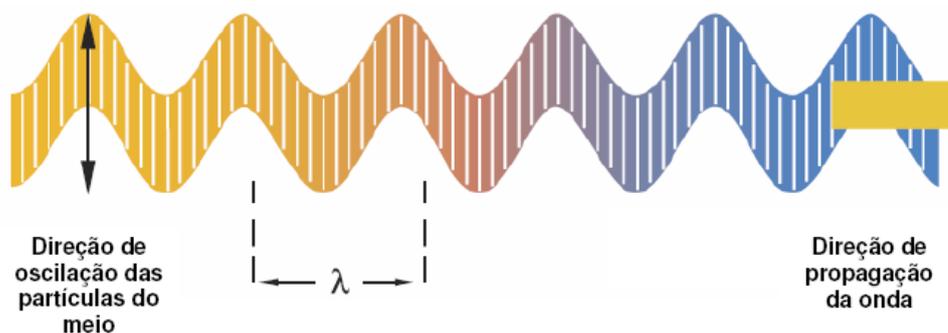


Figura 12 - Esquema de propagação das ondas de compressão [25].

2.3.9.3. Ondas superficiais

As ondas superficiais têm como princípio básico seu deslocamento através da superfície de um sólido, na interface entre o corpo sólido e um gás (ar). O alcance desse tipo de onda é função da qualidade da superfície a ser analisada e geralmente possuem alcance restrito em função de serem fortemente atenuadas. As ondas desse tipo dividem-se em ondas superficiais tipo Rayleigh e Creeping [16].

As ondas superficiais do tipo Rayleigh são ondas transversais, que viajam ao longo de superfícies planas ou curvas de peças sólidas espessas. Possuem pequena amplitude, baixa capacidade de penetração no material, cerca de um comprimento de onda (λ). A energia envolvida nessa profundidade é em torno de 4% das ondas superficiais e sua velocidade é aproximadamente 10% menor que a velocidade da onda transversal no material [24]. As partículas nesse tipo de propagação seguem uma órbita em forma de elipse, onde o eixo maior da elipse representa a profundidade e o eixo menor, a direção paralela a superfície. A Figura 13 demonstra esquematicamente a propagação das ondas Rayleigh.

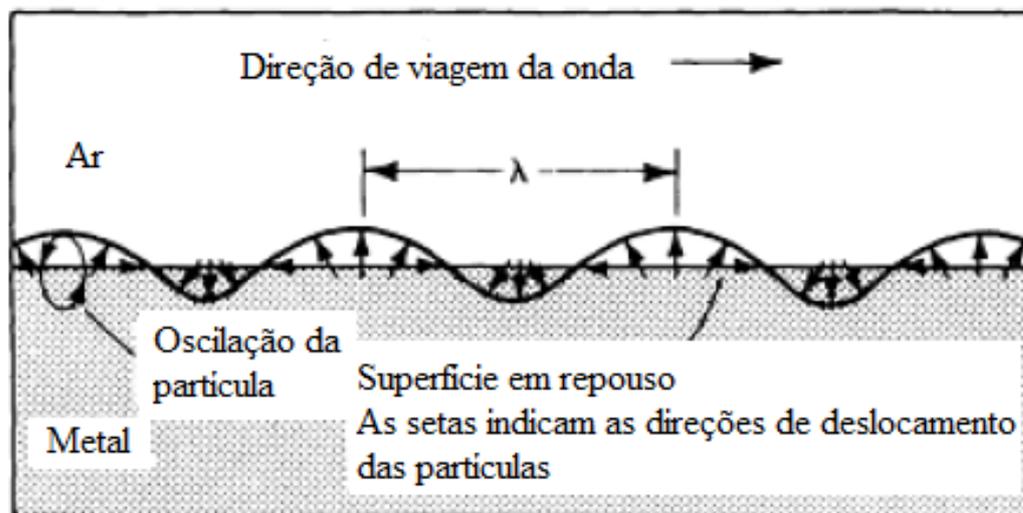


Figura 13 - Esquema de propagação das ondas Rayleigh. Adaptada de [24].

As ondas superficiais do tipo *creeping* são ondas longitudinais que têm sua propagação tangente a superfície dos objetos inspecionados. São atenuadas em função de seu deslocamento produzir ondas transversais enviadas ao material com determinados ângulos e possuem aplicabilidade na detecção de discontinuidades superficiais ou sub-superficiais [16].

2.3.9.4. Ondas Lamb

As ondas Lamb são também denominadas ondas de chapa ou placa, são transmitidas em placas com pequenas espessuras um comprimento de onda (produzidas em materiais compósitos ou metais), a propagação depende basicamente de propriedades como densidade, estrutura, espessura, frequência do transdutor, possuem duas formas básicas: simétrica e assimétrica. Essas designações são em função do tipo de movimentação das partículas em relação ao eixo central da peça ensaiada. A Figura 14 apresenta os diagramas básicos da propagação das ondas Lamb. A velocidade de propagação pode ser variada controlando-se o ângulo de incidência da onda na peça.

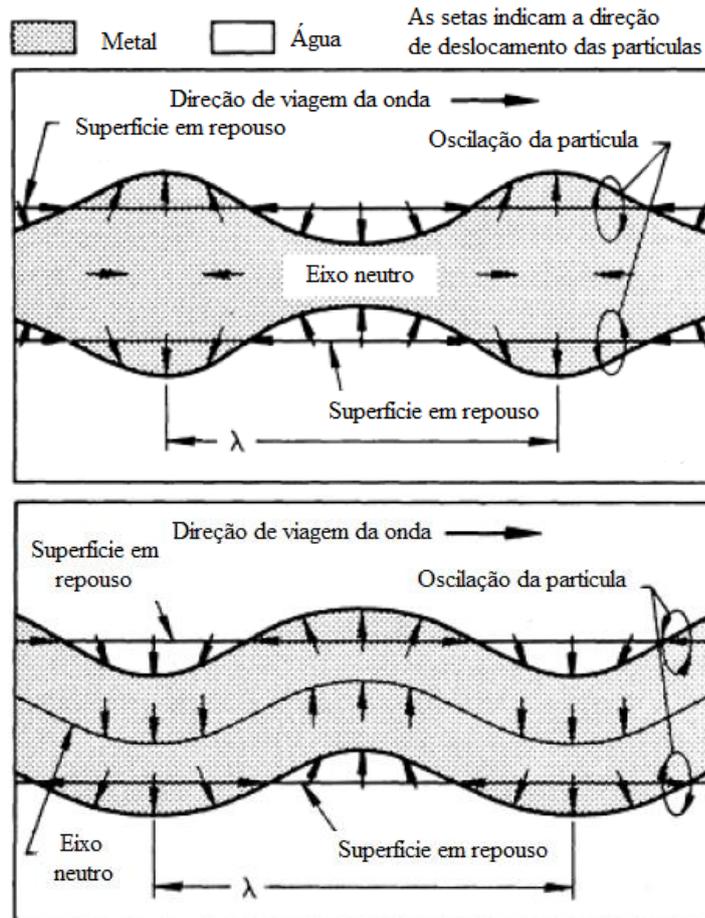


Figura 145 - Propagação das ondas Lamb. Adaptada de [24].

2.4. Equipamentos do ensaio

A produção e recepção das ondas ultrassônicas, são efetuadas através de diversos métodos: efeito piezoelétrico, choques ou atritos mecânicos, excitação térmica, processos eletrostáticos, eletrodinâmicos [16]. Os transdutores piezoelétricos são os elementos que possuem maior aplicação nas inspeções ultrassônicas. Os materiais piezoelétricos (quartzo, sulfato de lítio, titanato de bário, etc.) possuem a propriedade de ao sofrerem deformações mecânicas, produzirem cargas elétricas. Nesses cristais o inverso também ocorre, ou seja aplicando-se uma diferença de potencial em seus extremos o mesmo deforma-se mecanicamente. O cristal piezoelétrico pode ser deformado de várias maneiras, sendo a expansão na espessura o principal método [24]. Sua capacidade em ser bom ou mau produtor de ondas ultrassônicas é uma dependência das propriedades do material [17].

2.4.1. Cabeçotes

São dispositivos utilizados na emissão e recepção das ondas sônicas, são adaptados ao aparelho de ultrassom através de cabos coaxiais. Os cabeçotes são também denominados transdutores e são constituídos basicamente dos seguintes elementos: cristal piezoelétrico (podendo ser um ou mais de um cristal de acordo com o cabeçote), material amortecedor, placa protetora ou bloco de retardamento, eletrodos, conectores elétricos e carçaca [16]. A Figura 15 apresenta um esquema com um cabeçote padrão.

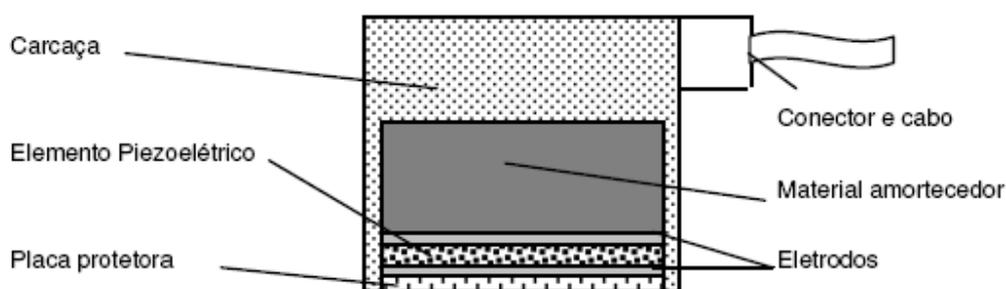


Figura 15 - Principais elementos de um cabeçote padrão [25].

Os cabeçotes podem ser agrupados em função de diferentes características: ângulo de incidência (normal ou angular); número de cristais (monocristal ou duplo cristal) e método de emissão (contato direto ou imersão) [24]. A Tabela 4 apresenta uma breve descrição dos diferentes tipos de transdutores ultrassônicos e suas características.

Tabela 4– Diferenças entre transdutores ultrassônicos. Adaptada de [1].

Diferentes tipos de transdutores ultrassônicos	
	Características
Cabeçote normal	Gera ondas longitudinais, o cristal transmite e recebe o sinal ultrassônico
Cabeçote de cristal duplo	Transmissor e receptor no mesmo corpo, mas elétrica e acusticamente separados
Cabeçote angular	Produz um feixe de ultrassons introduzido em um ângulo para os ângulos típicos.

2.4.1.1. Cabeçote normal ou reto

Os cabeçotes normais ou retos possuem um cristal piezoelétrico que tem as funções de transmissão e recepção. Produzem somente ondas longitudinais perpendiculares a superfície de teste. Na Figura 16 observa-se uma representação desse tipo de cabeçote. Sua maior eficiência é verificada na detecção de descontinuidades orientadas perpendicularmente a superfície da peça, como exemplo em chapas, peças fundidas ou forjadas [22].

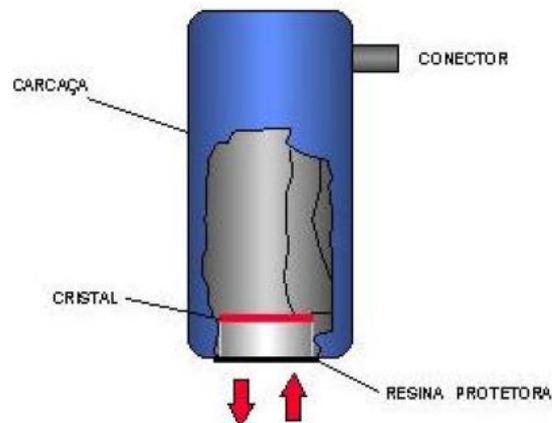


Figura 16 – Esquema básico de um cabeçote normal ou reto [22].

2.4.1.2. Cabeçote angular

Os cabeçotes angulares assim como os cabeçotes normais possuem um cristal piezoelétrico com responsabilidades de emissão e recepção das ondas sônicas. Existem cabeçotes angulares que trabalham com ondas longitudinais, porém de um modo geral, a diferença básica é que a onda longitudinal produzida sofre uma conversão de modo e refração transformando-se em onda transversal através da passagem da mesma por uma sapata colocada em ângulos típicos (30°, 45°, 60°, 70° e 80°) [16]. A Figura 17 ilustra um transdutor angular.

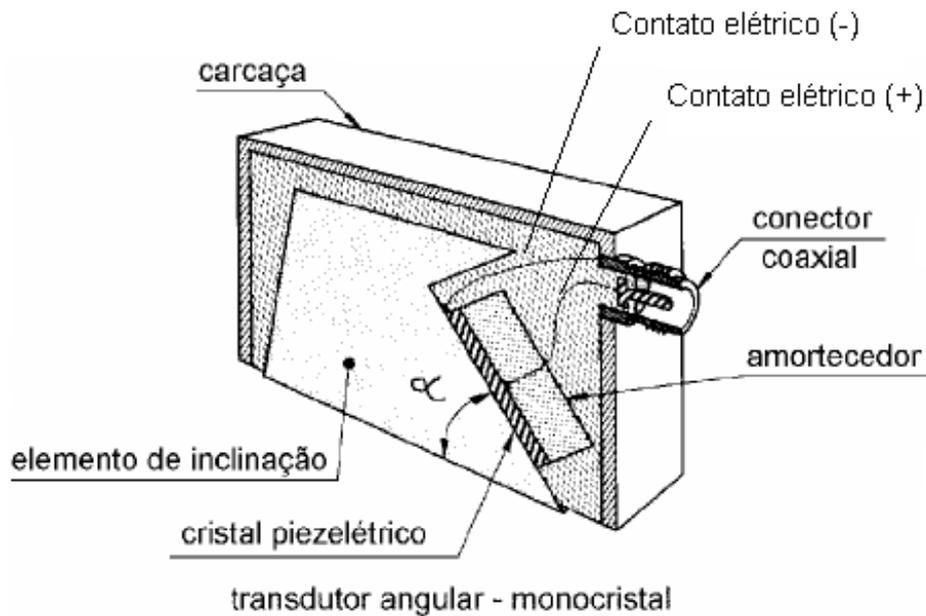


Figura 17 - Esquema básico de um transdutor angular. Adaptada de [24].

2.4.1.3. Cabeçote duplo cristal

Esse cabeçote possui em sua composição dois cristais inseridos dentro de uma carcaça com uma pequena inclinação (angulação na faixa entre 0° e 12°), de modo independente, um como emissor e outro como receptor, que funcionam isolados por um material acústico, como pode ser observado na Figura 18.

Dentre os métodos de utilização deste tipo de cabeçote, destacam-se a medição de espessuras, detecção de corrosões e descontinuidades subsuperficiais acima de 3 mm de profundidade [22].

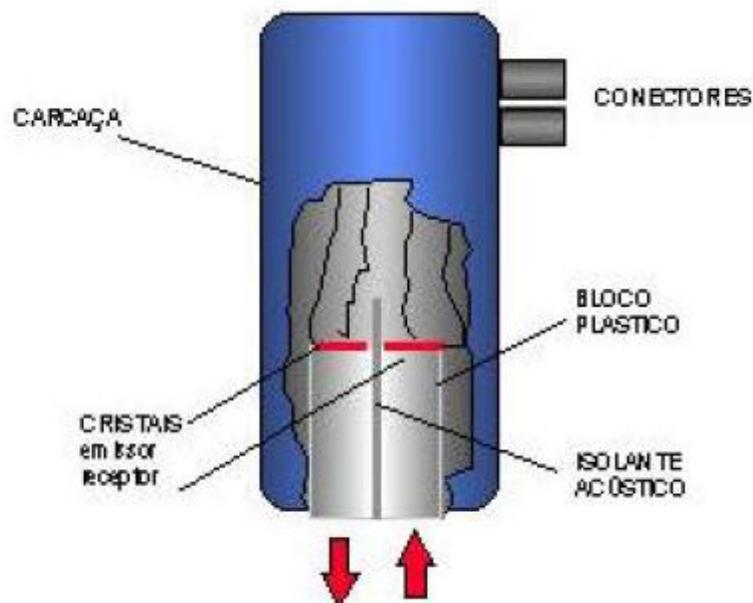


Figura 18 - Esquema básico de um cabeçote duplo cristal [22].

2.5. Acoplantes

São substâncias líquidas ou pastosas que possuem a finalidade de eliminar o ar (péssimo transmissor de ondas sônicas) entre o transdutor e a peça, os tipos mais comuns são: água, óleo, glicerina, graxas derivadas de petróleo ou de silicone, colas de papel de parede entre outros produtos comerciais [16]. Os acoplantes devem ser escolhidos de acordo com a rugosidade, temperatura e reação química com a superfície ensaiada, facilidade de remoção e possibilidade de evitar corrosão [24].

2.6. Técnicas de inspeção

A performance dos ensaios por ultrassom é uma função de diferentes características, tais como: composição e estrutura interna da peça a ser ensaiada, dimensão, geometria e orientação das discontinuidades e transdutor específico de produção do tipo de onda (longitudinal, transversal, de superfície) [17]. A utilização desses elementos determina os métodos ou técnicas básicas de inspeção que são agrupados através de três diferentes parâmetros:

- método (pulso-eco, transparência, ressonância);
- técnica (contato ou imersão);
- tipo de inspeção (manual ou automatizada) [16].

2.6.1. Método de pulso-eco

Dentre as técnicas de inspeção ultrassônica o método de pulso-eco é o que encontra maior utilização, principalmente em função de algumas de suas características como: facilidade de execução, necessidade de poucos dispositivos ou equipamentos, acesso a apenas uma face do corpo em teste [16]. Como o próprio nome diz seu princípio básico envolve a detecção de ecos gerados quando feixes ultrassônicos pulsantes são introduzidos no objeto em intervalos regulares de tempo. Quando essas ondas encontram uma descontinuidade ou superfície refletora, uma fração ou toda energia é refletida. A quantidade e direção de reflexão dependem das dimensões e orientação da superfície reflexiva, assim como o tempo de atraso entre o envio do pulso inicial e a recepção do eco [24]. A conversão da energia mecânica refletida em energia elétrica é realizada pelo transdutor e demonstrada na tela do aparelho, como pode ser observado na Figura 19. Este método propicia determinar a profundidade, localização e o dimensionamento das descontinuidades ou a espessura de material.

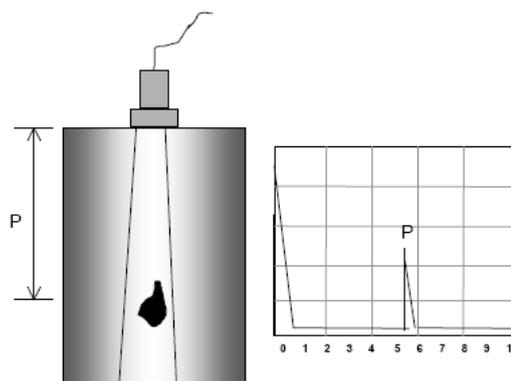


Figura 19 – Representação esquemática da técnica ultrassônica de pulso-eco [22].

2.6.2. Método da transparência

Neste método são utilizados dois transdutores que possuem funções distintas: um de transmissão e outro de recepção do feixe sônico, que devem trabalhar acoplados e corretamente alinhados em superfícies opostas da peça. A qualidade do material inspecionado é determinada pela redução da energia percorrida entre os dois transdutores, por isso não é uma técnica que permita determinar a localização e as dimensões das discontinuidades. A Figura 20 ilustra a técnica da transparência. Este método é utilizado em inspeções de chapas, juntas soldadas, barras ou detecção de diferentes estruturas do material [18,22].

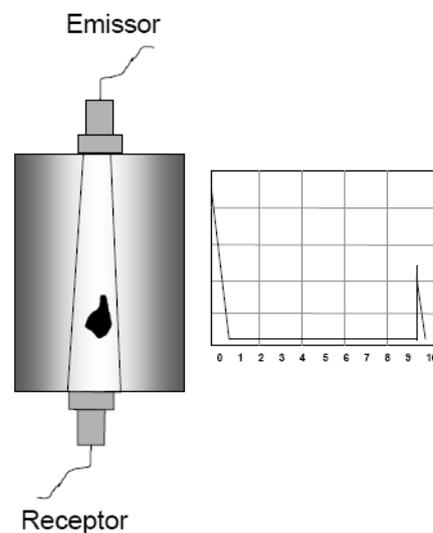


Figura 20– Representação esquemática da técnica de ultrassônica por transparência [22].

2.6.3. Método por imersão

Neste método, é utilizado um transdutor a prova de água, não existe contato entre o cabeçote e a peça que é imersa em um líquido, geralmente água, para que o acoplamento peça-transdutor seja sempre homogêneo. A Figura 21, ilustra esquematicamente a técnica. As vantagens na inspeção por imersão são: a velocidade de inspeção, capacidade de controlar e posicionar o feixe sônico e adaptabilidade à digitalização automática [24].

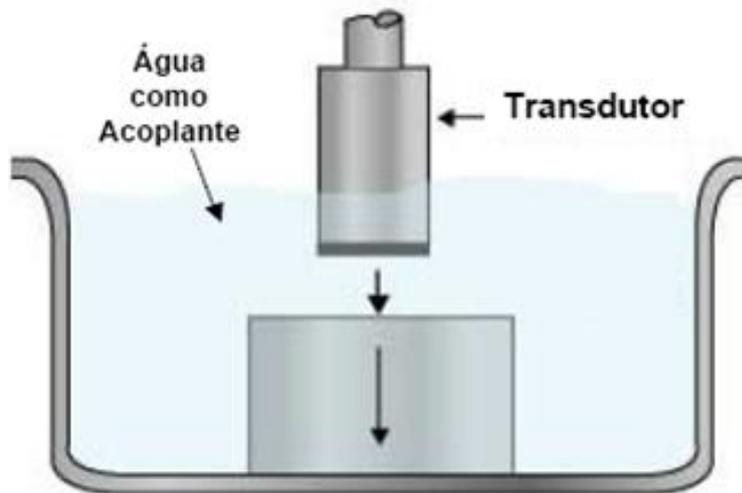


Figura 21 – Esquema da técnica ultrassônica por imersão [22].

2.7. Vantagens e desvantagens do ensaio por ultrassom

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. Profundidade de penetração superior aos outros métodos não destrutivos, que possibilita detectar descontinuidades em profundidades com centenas de milímetros. Alta precisão na determinação da localização, tamanho e forma da descontinuidade. A interpretação dos resultados não requer o uso de processos intermediários o que torna a inspeção mais ágil. Na técnica de pulso-eco, somente uma superfície de acesso é necessária para a aplicação do ensaio. Os equipamentos eletrônicos fornecem resultados instantâneos, que possibilitam ao método ser implementado em linhas de produção ou no controle do processo. Sistemas automatizados podem gerar imagens detalhadas. Não são necessários acessórios ou requisitos especiais de segurança para sua utilização [16].

Dentre os parâmetros não vantajosos na utilização deste ensaio, destacam-se: a superfície deve estar acessível a transmissão do ultrassom. 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. O uso de acoplante é necessário, a fim de que

ocorra a transmissão da energia sonora entre o cabeçote e a objeto em análise. A inspeção apresenta dificuldade de aplicação em peças pequenas, com espessura reduzida, formas irregulares ou superfícies ásperas. 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. A calibração do aparelho é realizada com a utilização de blocos padrões e de referência [24].

2.8. Raios X

2.8.1. Histórico

A descoberta dos raios X, ocorreu no ano de 1895, pelo físico e professor da Universidade de Wuerzburg, na Alemanha, Wilhelm Conrad Roentgen, em decorrência de suas pesquisas sobre as propriedades dos raios catódicos e no exame da fluorescência observada através de um tubo de raios catódicos. Na noite de 8 de novembro em seu laboratório, o professor trabalhava com um tubo de raios catódicos que era composto em seu interior por uma ampola de vidro com eletrodos positivos e negativos e coberto por um papel preto pesado. Ao ligar o tubo verificou que o mesmo produzia um brilho fluorescente. A poucos metros de distância do tubo existia uma tela de papel revestida com sais de bário que se tornava fluorescente. Roentgen concluiu que um tipo de raio desconhecido estava sendo emitido pelo tubo e que este raio possuía a capacidade de atravessar o papel pesado e excitar os materiais fluorescentes existentes no laboratório. Ciente de sua descoberta, iniciou experiências para conhecer as propriedades desse raio, ao qual ele atribui o nome de raios X em comparação a letra X utilizada nas incógnitas dos problemas. Em 22 de dezembro de 1895 Roentgen realizou como uma de suas primeiras experiências radiográficas, a radiografia da mão de sua esposa, Bertha (Figura 22) [5, 17,26].



Figura 22 – Radiografia da mão de Bertha esposa de Roentgen [27].

Em seu artigo apresentado no início de 1896, Roentgen anunciou suas experiências e descobertas sobre as propriedades dos raios X, dentre as quais: possuem uma considerável capacidade de penetração ao atingirem as substâncias, são sensíveis a placas e filmes fotográficos, tem ação sobre as emulsões fotográficas, são produzidos sempre que os raios catódicos atingem um corpo sólido, viajam sempre em linha reta, não são desviados por campos magnéticos e que ao posicionar sua mão entre o tubo de raios catódicos e um papel com substância fluorescente, seus ossos podiam ser observados e absorviam os raios X mais ativamente que o restante da mão [5,26].

A descoberta de Roentgen causou grande interesse na comunidade científica e ao público leigo de um modo geral. Em março de 1896, as primeiras fotografias obtidas com os raios X foram denominadas radiografias. Em junho de 1896, diversos médicos no campo de batalha se valeram dos raios X com a finalidade de encontrar projéteis em soldados feridos em combate. Até 1912 a medicina e a odontologia foram os principais campos de aplicação dos raios X [5,26].

2.9. Radioatividade natural e artificial

Os átomos são compostos por duas regiões distintas: o **núcleo** que contém os prótons (cargas elétricas positivas) e os nêutrons (sem carga elétrica)

e a **eletrosfera** região onde se encontram os elétrons (cargas elétricas negativas). A quantidade de prótons encontrados no núcleo do átomo, determina seu número atômico (Z), que é uma característica determinante na classificação dos elementos químicos (exemplo: Hidrogênio $Z=1$ elemento com menor número atômico e o Plutônio $Z=94$ elemento com o mais alto número atômico dentre os que ocorrem naturalmente) [28]. Na Figura 23 observa-se o modelo por Rutherford-Bohr similar ao sistema solar.

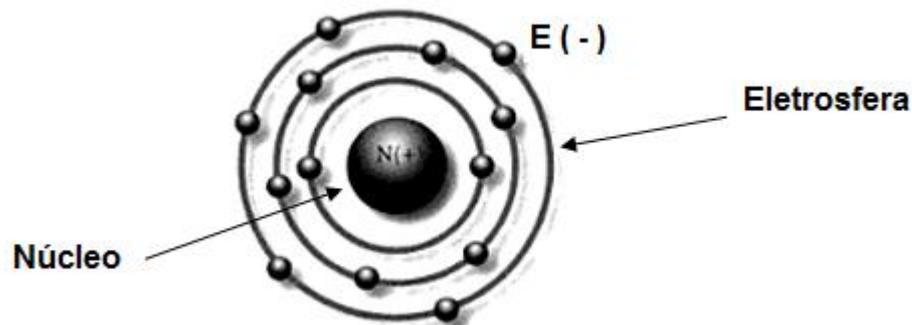


Figura 23 - Modelo Atômico apresentado por Rutherford-Bohr. Adaptada de [29].

Os elétrons são dispostos em camadas eletrônicas com diferentes valores de energia em função de sua proximidade ao núcleo, quanto mais próximo ao núcleo maior a força de ligação do átomo [29]. A Figura 24 apresenta uma representação esquemática dos valores de energia dos elétrons em função de suas camadas eletrônicas.

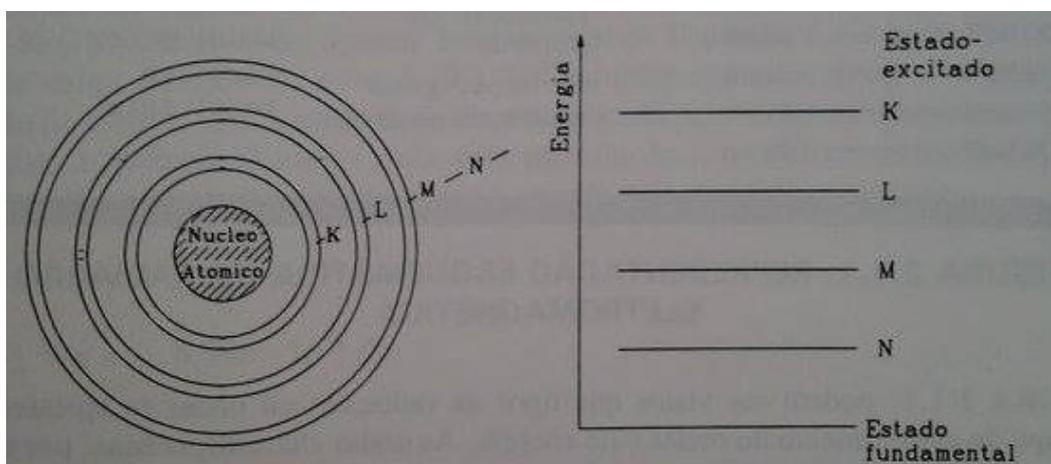


Figura 24 - Camadas Eletrônicas e Níveis de Energia [7].

Determinados átomos apresentam diferença no número de nêutrons em seu núcleo, esses átomos são denominados **isótopos**. Em função da estabilidade esses isótopos podem ser estáveis ou instáveis. Nos átomos estáveis a quantidade de prótons e elétrons é equivalente. Nos átomos instáveis existe uma diferença no número de nêutrons em relação a outros átomos do mesmo elemento químico. Quando um isótopo é radioativo, o mesmo é denominado **radioisótopo** [29].

Os isótopos radioativos emitem radiações que podem ser de três tipos diferentes: partículas alfa (α) beta (β) ou gama (γ). As partículas alfa são núcleos do elemento Hélio compostas por dois prótons e dois nêutrons com pouco poder de penetração. As partículas beta são formadas por elétrons, possuem carga elétrica negativa, são desviadas por campos magnéticos e embora o seu poder de penetração seja superior ao das partículas alfa, seu alcance é restrito. As partículas gama possuem características ondulatórias fato que proporciona elevado poder de penetração [6].

A radiação penetrante emitida pelo raios X, gama ou beta é do tipo eletromagnética. Essas radiações são distinguidas em função da frequência em radiações ionizantes e radiações não ionizantes como pode ser verificado na Figura 25. Este tipo de radiação não sofre influência de campos elétricos e/ou magnéticos, propaga-se em linha reta, possui como principais grandezas: o comprimento de onda, a frequência e a velocidade de propagação. Quanto menor for o comprimento de onda ou maior a frequência, mais elevada será a energia eletromagnética [7].

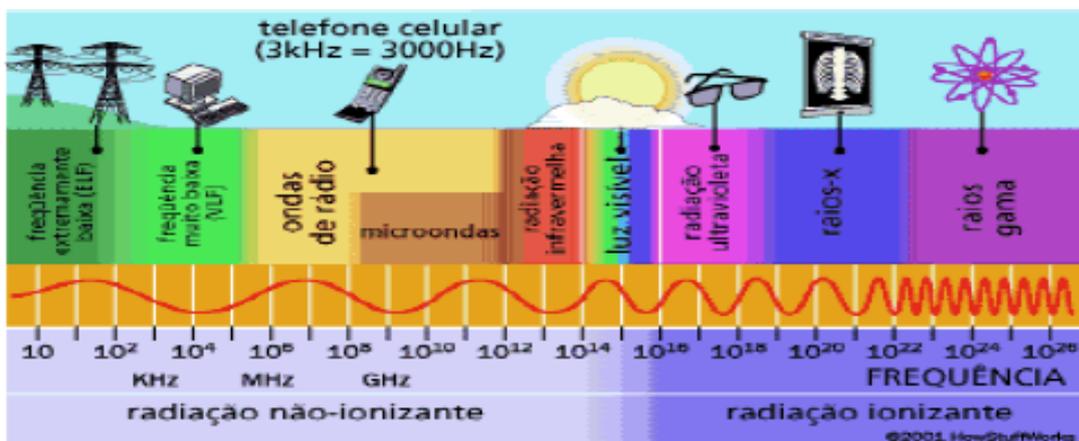


Figura 25 – Espectro magnético [30].

Em função de seus comprimentos de onda relativamente curtos (elevadas energias) os raios x e gama, possuem a capacidade de penetrar materiais opacos e revelar falhas internas [24]. A energia das radiações é o fator fundamental no ensaio radiográfico, pois é a propriedade que define qual será a capacidade de penetração dos raios no material a ser inspecionado [6].

As ondas eletromagnéticas são propagadas na velocidade da luz visível ($C = 300000 \text{ km/s}$). Essa velocidade é relacionada ao comprimento de onda (λ) e à frequência (ν) através da Equação 4.

$$\nu = \frac{C}{\lambda} \quad (4)$$

Segundo Max Planck, apud Andreucci [6] é possível determinar a energia pelo comprimento de onda ou frequência relacionando-as com a constante de Planck (h), através da Equação 5.

$$E = h \cdot \nu \quad (5)$$

onde:

E = energia em (Joule).

h = constante de Planck ($6,624 \times 10^{-34}$ Joule x segundo).

ν = frequência

Substituindo a frequência (ν) na equação (5), obtém-se:

$$E = h \cdot \frac{C}{\lambda} \quad (6)$$

onde:

c = velocidade da luz

λ = comprimento de onda.

A energia das radiações eletromagnéticas e os fenômenos energéticos atômicos são usualmente medidos através da unidade de energia elétron-Volt (1 elétron-Volt = 1.6×10^{-19} J), que é a energia cinética adquirida por um elétron ao

ser acelerado por uma diferença de potencial de 1 Volt [7]. Nas radiografias as energias usadas estão na ordem entre 10 keV e 100 keV [18].

2.10. Fontes de radiação ionizante

Nos trabalhos de radiografia industrial, as radiação eletromagnéticas (raios x e gama) são o tipo de radiação com maior utilização, diversas propriedades em comum, apesar de serem gerados por tipos de fontes distintas e capacidades de penetração diferentes [18, 31]. A Tabela 5 apresenta as diferenças entre os dois tipos de radiação.

Tabela 5- Comparação entre os raios penetrantes X e gama. Adaptada de [31].

	Raios X	Raios Gama
Poder de penetração	Menor	Maior
Fonte	Elétrica	Isótopo radioativo
Comprimento de onda	Maior	Menor

2.11. Propriedade dos raios X

Os raios X possuem propriedades específicas que são: não são visíveis ao olhar humano, viajam em linha reta, geram os fenômenos de fosforescência e fluorescência em determinadas substâncias, não são desviados por campos elétricos ou magnéticos, penetram em materiais opacos e um percentual dessa radiação é absorvida por esses materiais, chapas e filmes fotográficos são sensibilizados a ação dos raios X, têm a capacidade de causar danos genéticos aos seres humanos, bem como alterações genéticas [5, 26].

2.12. Produção dos raios X

Os raios X são formados quando feixes de elétrons são acelerados, dentro de um tubo a vácuo com a finalidade de gerar e transportar os elétrons [17]. O tubo de raios X é um dispositivo eletrônico com a finalidade de converter energia elétrica em raios X [24], pode ser metálico ou de vidro e é denominado tubo de Colidge. É constituído de duas partes singulares, o ânodo e o cátodo (Figura 26).

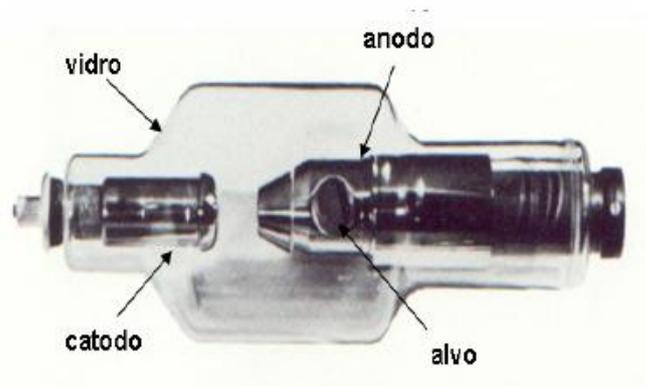


Figura 26 – Tubo de colidge [6].

Quando o tubo é ligado, uma corrente elétrica em miliampéres é gerada, atravessando e aquecendo por efeito Joule um filamento de tungstênio existente no cátodo que produz uma nuvem de elétrons, como ilustrado na Figura 27. Os elétrons são então acelerados por uma voltagem aplicada entre o cátodo e o ânodo em feixes, colimados na direção de uma placa metálica existente no ânodo, denominada alvo, a energia cinética adquirida pelos elétrons é oriunda da tensão de aceleração e determinada em elétrons-Volts. Ao atingirem o alvo (geralmente de tungstênio) os elétrons são desacelerados e essa energia cinética é perdida sendo convertida em outra forma de energia [7, 18, 24].

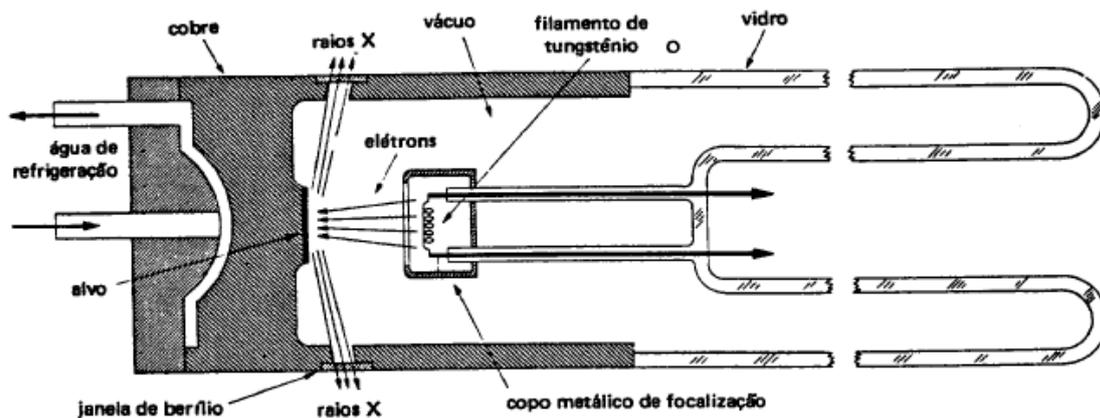


Figura 27 – Tubo gerador de raios X [32].

Diferentes características da fonte de raios X são responsáveis por determinar a qualidade do feixe de raios X produzido, dentre esses: o número de

fótons emitidos por segundo, a colimação do feixe (horizontal ou vertical), a área da fonte e a distribuição espectral [33].

2.13. Produção dos raios gama

Os raios gama são radiações eletromagnéticas de pequeno comprimento de onda, alta energia e elevado poder de penetração, emitidas por núcleos atômicos radioativos. Existem dois tipos de isótopos naturais encontrados na natureza, urânio e rádio e os artificiais gerados pela decomposição de fontes radioativas em reatores nucleares com irradiação de nêutrons nos núcleos dos átomos [12].

O núcleo atômico geralmente encontra-se em estabilidade energética (estado fundamental), porém determinados isótopos apresentam elevada energia em seus núcleos (natural ou artificial). A irradiação de nêutrons determina uma alteração no equilíbrio energético do núcleo que passa a ficar no estado excitado, entretanto o núcleo atômico deseja voltar a seu estado energético mais estável [7]. Quando isso ocorre a diferença de energia emitida pelo núcleo atômico é a radiação eletromagnética na forma de partículas α , β e raios gama. Esse processo de equilíbrio energético é denominado radioatividade ou decaimento radioativo e está representado na Figura 28.

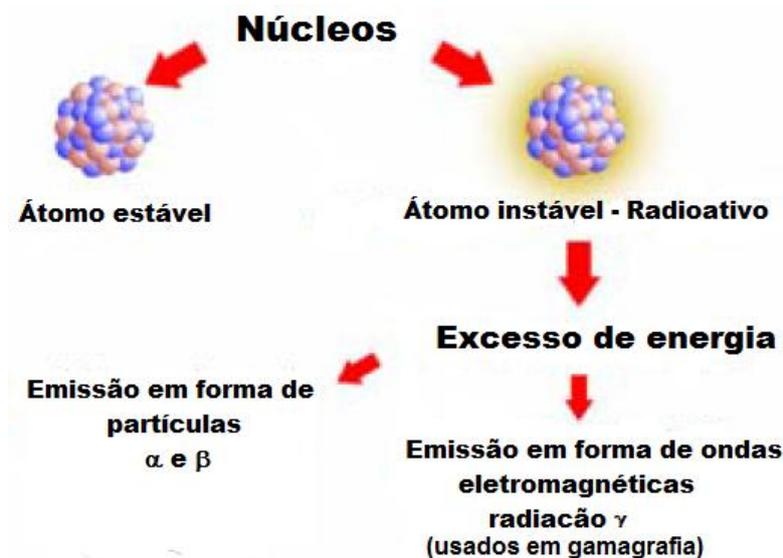


Figura 28 – Desenho esquemático representando a radioatividade [34].

Nem todas as fontes de raios gama são convenientes ao uso na radiografia industrial. As principais fontes usadas atualmente são o Cobalto 60

(Co ⁶⁰), Selênio 75 (Se ⁷⁵) e o Irídio 192 (Ir ¹⁹²). Outras fontes como o Césio 134 (Ce ¹³⁴), Césio 137 (Ce ¹³⁷) e Túlio 170 (Tu ¹⁷⁰) também podem ser usadas, porém tem seu uso restrito em função de dificuldades de produção e qualidades radiográficas. Os números 60, 75, 134, 137, 170 e 192 referem-se ao número de massa do radioisótopo [12]. Na Tabela 6 são apresentadas algumas fontes de radiação gama e suas principais propriedades.

Tabela 6 – Principais radioisótopos usados nos raios gama [35].

Fontes gama	Número de massa	Meia-vida	Constante específica	Energia (MeV)	Espessuras máximas de ensaio mm de aço)
Césio (Cs)	137	30 anos	2,44	0,66	88,9
Cobalto (Co)	60	5,3 anos	9,134	1,17 e 1,33	228,6
Irídio (Ir)	192	74 dias	3,347	0,137 a 0,651	63,5
Túlio (Tm)	170	128 dias	0,174	0,084 e 0,054	12,7
Ítérbio (Yb)	169	32 dias	0,871	0,063 a 0,308	15
Selênio (Se)	75	120 dias	1,415	0,066 a 0,410	30

As vantagens da utilização industrial da fonte de radiação gama em relação ao raios X são: maior portabilidade, não requer consumo de energia, tamanho físico menor que possibilita inspeções em espaços restritos e geometrias complexas, por exemplo em tubulações. Suas desvantagens são: não podem ser desligadas, oferecem risco de contaminação caso ocorra alguma violação do invólucro ao qual estão armazenadas, necessidade de fontes diferentes de radiação e trocas pré-determinadas em função da perda de atividade (meia vida). [17]. A Tabela 7 apresenta uma comparação entre variáveis na escolha por determinada técnica.

Tabela 7 – Comparação entre variáveis que interferem na escolha das radiações penetrantes [35].

Parâmetros	Raios X	Raio gama
Definição de imagem	Excelente	Boa
Mobilidade do equipamento	Pequena	Grande
Refrigeração	Necessária	Desnecessária
Alimentação elétrica	Necessária	Desnecessária
Acompanhamento da operação	Necessária	Necessária
Contaminação radioativa	Possível	Possível
Blindagem em operação	Necessária	Necessária
Blindagem após operação	Desnecessária	Necessária
Segurança de operação	Rígida	Rígida
Investimento inicial	Maior	Menor
Manutenção	Maior	Menor

2.14. Atividade de uma fonte radioativa

A atividade de uma fonte radioativa é especificada como o número de desintegração nucleares, que ocorrem em um determinado intervalo de tempo, sua unidade no sistema internacional (SI) é o Becquerel (Bq) onde $1\text{Bq} = 1$ desintegração de um núcleo por segundo [6]. Nas inspeções radiográficas, uma unidade de atividade comumente empregada em equipamentos antigos é o Curie (Ci), onde um Ci = $3,7 \times 10^{10}$ desintegrações nucleares por segundo [36].

O cálculo da atividade é demonstrada na Equação 7.

$$A = A_0 \cdot e^{-\lambda \cdot t} \quad (7)$$

onde:

A = atividade da fonte radioativa após decorrido um intervalo de tempo t.

A₀ = atividade inicial da fonte radioativa.

λ = constante de decaimento (propriedade característica de cada material, nunca atingindo valor nulo).

t = tempo decorrido.

A importância no cálculo da atividade da fonte é em função desse valor ser utilizado para especificar o tempo de exposição na radiografia de um objeto. Quanto maior a atividade da fonte, menor o tempo de exposição. A Figura 29 apresenta um exemplo de uma curva de decaimento do Iridio 192.

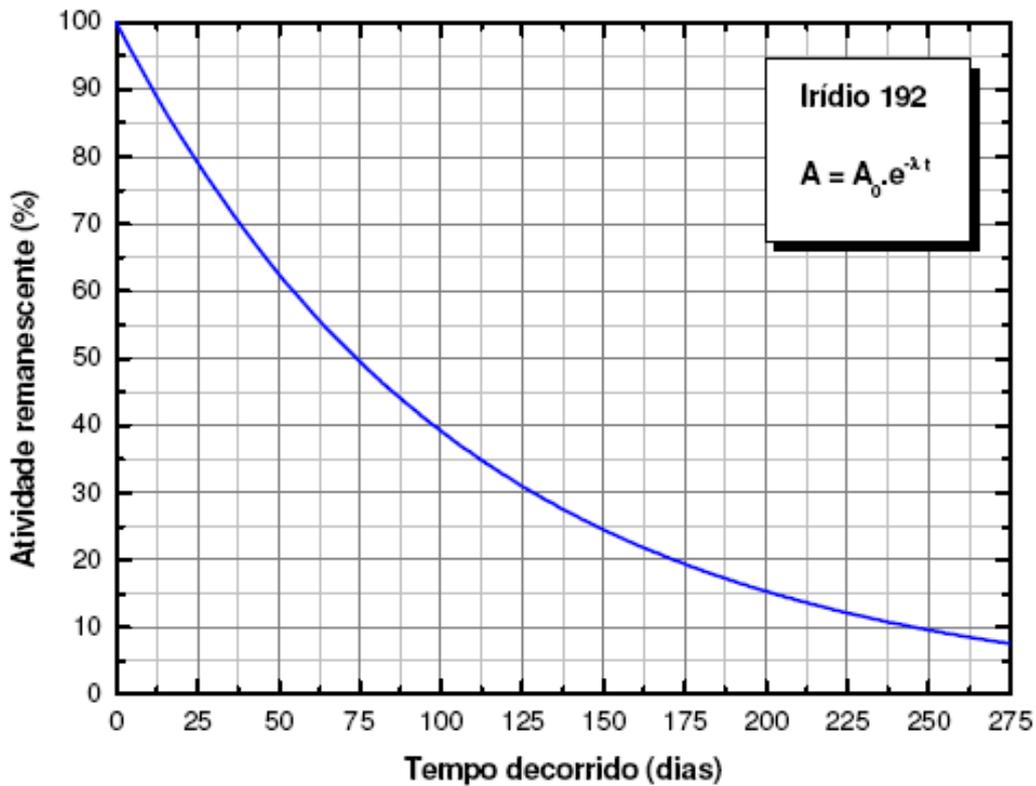


Figura 29 - Curva de decaimento do Iridio 192 [25].

2.15. Meia vida

A meia vida ou período de semidesintegração de um radioisótopo é o intervalo de tempo necessário para que o número de núcleos radioativos seja reduzido a metade. Assim como a atividade a meia vida também é uma propriedade de cada elemento. [7,17]. O cálculo da meia vida é determinada de acordo com a Equação 8.

$$T_{1/2} = \frac{0,693}{\lambda} \quad (8)$$

onde :

$T_{1/2}$ = meia vida do elemento

λ = constante de desintegração radioativa.

É importante observar que a intensidade da radiação emitida pela fonte radioativa em cada desintegração não é a mesma, podendo um percentual da atividade ou uma fração do decaimento [17].

2.16. Irradiadores

A radiação emitida pelos radioisótopos é espontânea, emitida constantemente, seu valor de energia é superior aos dos raios X e não pode ser desligada, além do perigo constante da radiação. Em função do manuseio, transporte e segurança, as fontes radioativas, em formato de pastilhas, devem ser protegidas através de uma blindagem especial (encapsuladas em estojos cilíndricos). Na Figura 30 observa-se a cápsula e o engate com porta fonte [7,37].

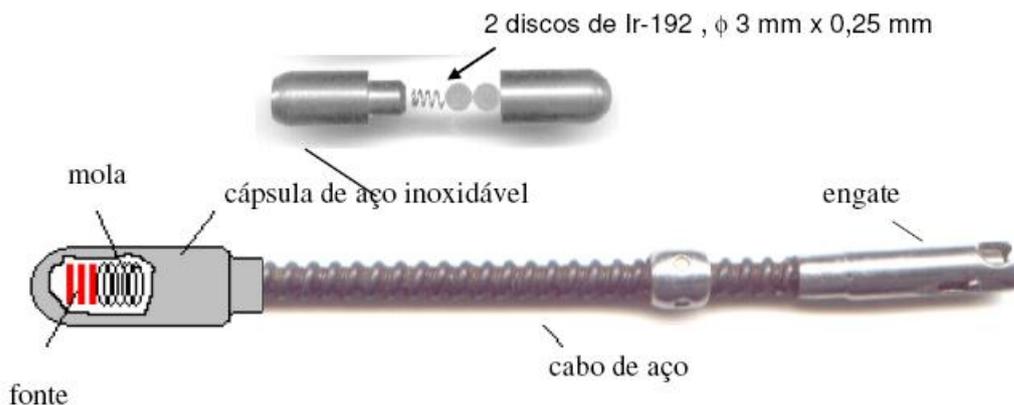


Figura 30 - Fonte selada radioativa [27].

Os aparelhos que permitem que as fontes radioativas sejam colocadas ou retiradas de operação são denominados irradiadores. Esses dispositivos são compostos por três partes: a blindagem, a fonte radioativa e o mecanismo para exposição da fonte. A blindagem usualmente é construída com materiais de elevada capacidade de absorção (chumbo ou urânio exaurido) [6].

No momento da radiografia o operador ejeta as fontes do irradiador girando uma manivela, empurrando um cabo de aço e deslocando a fonte até o ponto de emissão. As Figuras 31 e 32 apresentam uma foto e o desenho do irradiador em corte, respectivamente.



Figura 31 – Foto de um irradiador.

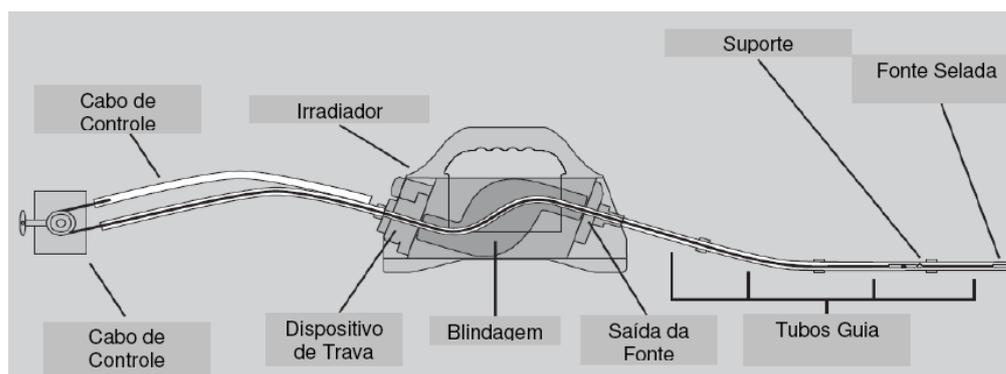


Figura 32 – Desenho esquemático de um irradiador em corte [25].

2.17. Detectores de radiação

Os detectores de radiação possuem a função de converter a radiação emitida pelas fontes X ou gama em formatos óticos ou elétrico para construção da imagem. Na detecção desta radiação são usados dois métodos: medição da radiação com filmes radiográficos ou com detectores [7].

O trabalho desenvolvido por Pereira [31] apresenta uma comparação entre a qualidade obtida pela radiografia convencional que utiliza os filmes radiográficos (detectores analógicos) e a radioscopia que utiliza os detectores digitais.

2.18. Registro radiográfico

Os filmes usados em radiografia possuem em sua composição camadas de gelatina, emulsão e substrato em ambos os lados de uma base de poliéster. A gelatina tem a função de proteger a emulsão contra abrasões [24]. A emulsão possui uma espessura de 0,25 mm, é formada por cristais de brometo de prata e através desses grãos que são sensíveis a radiação eletromagnética ocorre a sensibilização do filme. O fato da emulsão ser posicionada em ambos os lados da base propicia um aumento na velocidade do filme [6]. Na Figura 33 observa-se a composição do filme radiográfico.

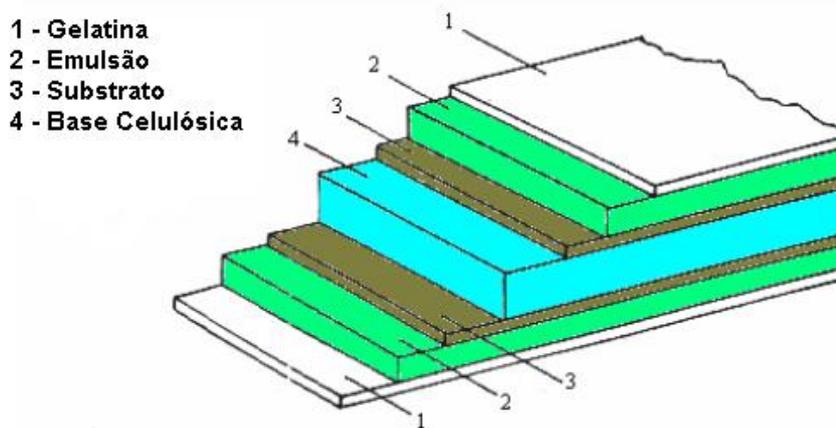


Figura 33 - Composição do filme radiográfico [6].

Para que ocorra a produção da imagem, o filme deve ser processado quimicamente. Segundo Stegemann [7], a medição da radiação é dividida nos seguintes processos: exposição, revelação e fixação do filme.

2.19. Método de trabalho

A radiografia é uma das poucas técnicas de END capaz de avaliar o interior dos elementos e que tem sua aplicação em praticamente todos os materiais [17]. O princípio dos métodos de transmissão por radiação eletromagnética é fundamentado na capacidade de penetração dos raios X ou gama na peça a ser inspecionada. Essa radiação ao atravessar o material será atenuada em função de diferenças na densidade, variações de espessura, diferentes características de absorção em função de variações de composição e

da presença de descontinuidades e registrada num filme radiográfico ou tela fluorescente [24].

O equipamento usado na execução do ensaio radiográfico é composto por: uma fonte emissora de radiação o objeto a ser examinado e um filme ou dispositivo para detecção da radiação. Na Figura 34 observam-se os fundamentos do ensaio radiográfico: na esquerda os diferentes dispositivos para geração da radiação (raios X ou gama), e na direita um objeto com uma descontinuidade e diferentes espessuras. A descontinuidade e as regiões menos espessas absorvem menores radiações (tonalidades mais escuras) a região com maior espessura absorve uma maior radiação (tonalidade mais clara) [11].

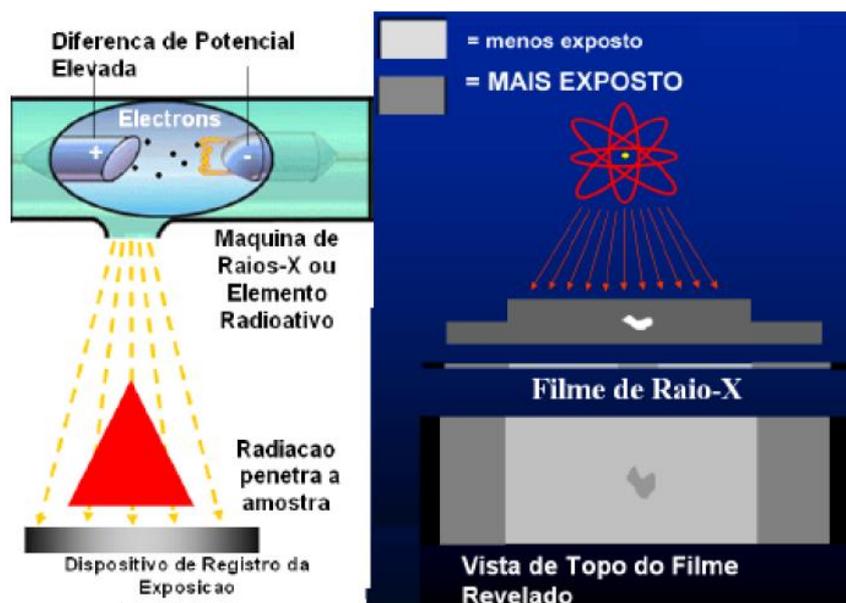


Figura 34 - Fundamentos do ensaio radiográfico [11].

2.20. Indicadores de qualidade de imagem (IQI)

Os indicadores de qualidade de imagem (IQI) ou penetrômetros (denominação usada nas associações norte americanas de ensaios) são corpos de teste que devem ser fabricados em materiais similares ao objeto radiografado e possuir a mesmas características de atenuação. São usados para avaliar o processo radiográfico em função de sua sensibilidade e condições de processamento. A imagem do IQI que aparece na radiografia final deve ser analisada e uma correta interpretação assegura que o ajuste da sensibilidade, contraste e nitidez foram adequados a norma utilizada na determinação da qualidade da imagem revelada [24].

Diversos organismos de normalização tais como, ISO, DIN, ASTM, AFNOR e BSI, são empregadas e podem ser utilizadas na determinação da qualidade da imagem radiográfica. A escolha é definida pelo projeto ou contrato realizado com o cliente da radiografia. [7]. Os IQIs são montados entre a fonte radioativa e a peça e radiografados ao mesmo tempo com o objetivo de formarem uma imagem única (Figura 35). A posição do IQI não deve interferir com qualquer área de interesse da imagem do corpo ensaiado.

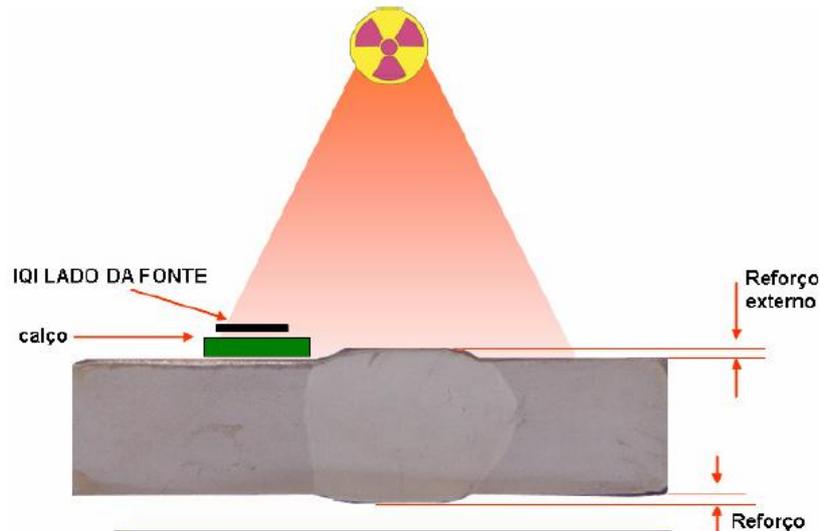


Figura 35 - Posicionamento do IQI [6].

Os IQIs mais comuns e empregados nas radiografias são: o modelo arame ou fio, que tem aplicação em diversos países europeus e no Brasil; e o modelo Chapa ou furo é mais usado nos EUA [6].

2.20.1. IQI de arame ou fio

O IQI de arame ou fio é um tipo de indicador que possui fios paralelos com diâmetros em dimensões crescentes em progressão geométrica, material similar ao do objeto a ser inspecionado envolvidos por uma proteção plástica transparente. Sua função é possibilitar uma avaliação da nitidez, contraste e conseqüentemente da qualidade radiográfica. A Figura 36 apresenta um IQI da norma ASTM. A escolha do IQI é realizada em função da espessura ensaiada e a avaliação da qualidade da imagem é realizada pelo fio mais fino detectável.



Figura 36 - IQI tipo fio (Norma ASTM) [25].

2.20.2. IQI de chapa ou furo

O IQI de chapa ou furo é um tipo de indicador que utiliza lâminas ou chapas de pequena espessura com material similar ao do objeto avaliado, possui três furos em sua face e sua espessura (T) é determinada em função da espessura a ser radiografada. O diâmetro dos furos é determinado como $1T$, $2T$ e $4T$. Assim como no IQI de fios o que determina a qualidade radiográfica é a detecção do menor diâmetro nitidamente perceptível. Na Figura 37 observa-se um IQI tipo furo.

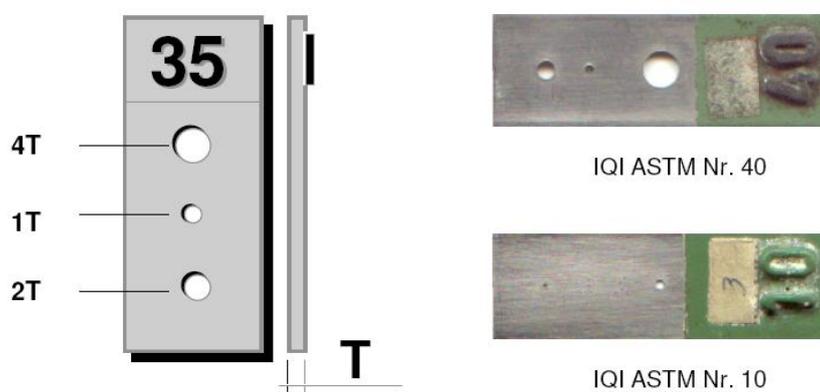


Figura 37 - IQI tipo furo (Norma ASTM) [6].

2.21. Vantagens e desvantagens do ensaio por radiação penetrante

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 capacidade de detecção de descontinuidades superficiais, subsuperficiais e internas em materiais metálicos (ferrosos e não ferrosos), compósitos, cerâmicos, etc. e o registro permanente dos dados obtidos através dos filmes radiográficos. 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 e a principal desvantagem que é a exposição às radiações.

2.22. Ensaio por partículas magnéticas

2.22.1. Histórico

Desde a antiguidade os gregos foram os primeiros a descobrir o fenômeno do magnetismo através do mineral denominado magnetita. Os físicos, Henri Berquerel, Torben Bergmann e Michael Faraday descobriram que todas as substâncias inclusive os líquidos e os gases, são influenciados pelo magnetismo, e que somente em alguns desses materiais essa influência é considerável.

Nos primeiros anos da década de 1920 William Hoke, descobre acidentalmente que ao usinar peças de aço e ferro no torno mecânico com um mandril imantado as limalhas produzidas são atraídas até as rachaduras superficiais [17]. Em 1923, L.E. Benson propõe que o ensaio seja realizado com a adição de partículas magnéticas muito finas em suspensão e a utilização de líquidos é considerado como o inventor da técnica do ensaio magnético úmido.

No início da década de 1930, principalmente no setor ferroviário inglês, para a inspeção de caldeiras, trilhos, rodas e eixos, o método de inspeção através das partículas magnéticas substituiu com enorme velocidade o método de inspeção por líquidos penetrantes [5].

Em 1968, tem-se o primeiro registro oficial do uso do magnetismo, S.M. Saxby publica um artigo demonstrando um método de inspeção de descontinuidades em tubos de canhões, que eram magnetizados e tinham seu comprimento percorrido por uma agulha imantada. Ao se aproximar das descontinuidades existentes a agulha sofria uma perturbação que a movimentava de sua posição de repouso [38].

2.22.2 Principais grandezas

2.22.2.1. Pólos magnéticos

Ao seccionar um ímã observa-se que as novas partes formadas mantêm as propriedades do ímã inicial e que seus extremos possuem força de atração ou repulsão em função dos seus polos magnéticos (dipolos), sendo denominados polo norte e polo sul como ilustrado na Figura 38. Mesmo dividindo-se em partes cada vez menores os ímãs mantêm as propriedades inalteradas em função desses dipolos, pois não existe possibilidade de dividir o dipolo magnético em pólos diferentes. O dipolo é a unidade fundamental do magnetismo [39,40].

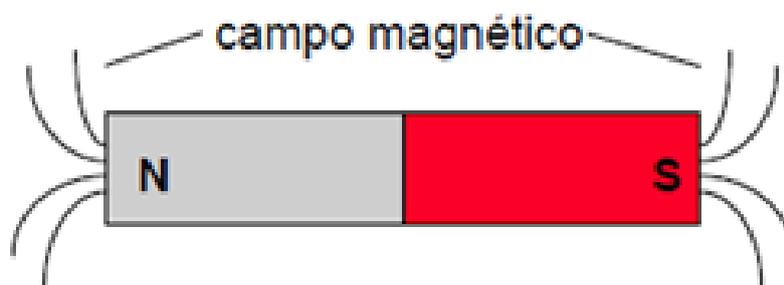


Figura 38 – Ímã com os polos magnéticos norte e sul [42].

2.22.2.2 Campo magnético

Os campos magnéticos são definidos como regiões do espaço alteradas em função da presença de um ímã e possuem representação demarcadas pela linhas de indução ou fluxo. Uma maneira de observar essas linhas é aplicar

limalhas de ferro sobre um imã de barra. Como pode ser observado na Figura 39, as linhas de indução representarão de forma clara o campo magnético [41].

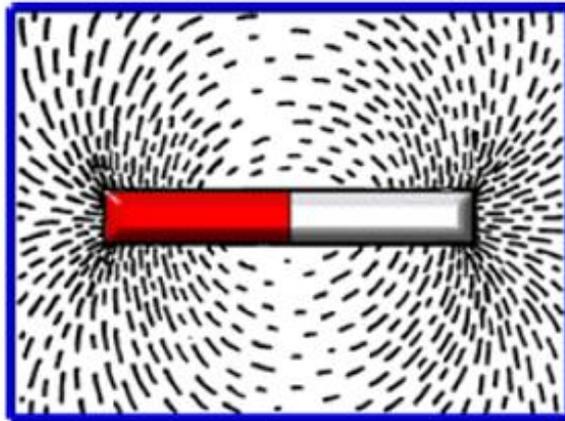


Figura 39 – Representação dos campos magnéticos e as linhas de indução [41].

2.22.2.3. Fluxo magnético

Fluxo magnético é a quantidade de linhas de campo (força) que atravessam uma superfície plana A. Seu cálculo é demonstrado pela Equação 9.

$$\Phi = B.A.\cos.\Theta \quad (9)$$

Onde:

Φ – fluxo magnético

B – campo magnético

A – área da superfície plana

Θ - ângulo formado A e B.

A unidade de fluxo magnético no sistema internacional SI é Weber (Wb).

Na detecção de uma descontinuidade a direção, dimensões e o formato são características importantes. Descontinuidades paralelas ao campo magnético são de difícil detecção enquanto que descontinuidades com ângulos de 90° ao campo magnético apresentam uma indicação mais eficiente. A Figura 40 apresenta dois componentes com campos magnéticos (longitudinal e circular) e descontinuidades em diferentes angulações.

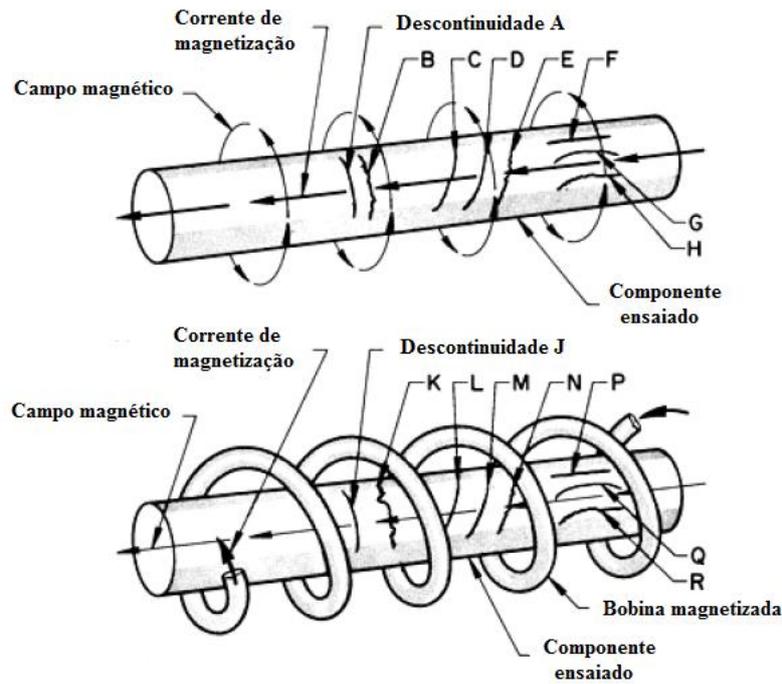


Figura 40 – Campos magnéticos longitudinal, circular e descontinuidades em diferentes angulações. Adaptada de [24].

2.22.2.4. Permeabilidade magnética

A permeabilidade magnética de um material é determinada por sua capacidade em ser magnetizado e não possui valor constante, pois depende da força de magnetização atuante. Sua representação é realizada através da letra grega “ μ ” e é um valor que não possui unidades (adimensional), pois representa a relação entre duas grandezas: a condutividade magnética do material e a condutividade magnética do ar [41]. Outra maneira de determinação da permeabilidade magnética é a relação entre o magnetismo absorvido pelo material (B) causado por uma força de magnetização externa (H).

Segundo Leite [5], a permeabilidade de metais ferromagnéticos é dependente de alguns fatores: a intensidade da indução magnética, temperatura, composição química, tratamento térmico e processamento do material.

2.23. Classificação magnética dos materiais

As substâncias em função da permeabilidade magnética são divididas em três grandes grupos: ferromagnéticos, paramagnéticos e diamagnéticos.

FERROMAGNÉTICOS: são materiais fundamentais ao ensaio por partículas magnéticas, possuem forte atração pelos ímãs, adequados a inspeção magnética e sua permeabilidade é maior que a unidade. Os exemplos desse grupo são o ferro, o níquel, o cobalto, o aço e certas ligas metálicas.

PARAMAGNÉTICOS: são materiais fracamente atraídos pelos ímãs, não são adequados aos trabalhos de inspeção magnética e sua permeabilidade é próxima a unidade. Exemplos: alumínio, cromo, estanho, magnésio, potássio.

DIAMAGNÉTICOS: são materiais levemente repelidos pelos ímãs, não são aplicáveis aos trabalhos por inspeção magnética e sua permeabilidade é menor que a unidade [17,41].

2.24. Histerese magnética

É um fenômeno que ocorre em materiais ferromagnéticos e pode ser descrito como o atraso ao longo do ciclo entre a força de magnetização e a densidade do fluxo [24].

Ao aplicar uma força magnética externa os elétrons dos materiais magnéticos tendem a alinhar-se e formar áreas de magnetismo espontâneo (domínios) e mesmo quando desmagnetizados, não retornam totalmente ao seu estado inicial apresentando uma quantidade de resíduo magnético denominado magnetismo remanescente ou **retentividade**. Para anular esse magnetismo residual é necessário aplicar um campo externo na direção oposta denominado **força coercitiva** [17,41]. A Figura 41 apresenta o caminho descrito entre B densidade de fluxo (magnetismo adquirido pelo material) x H força magnetizante (força de magnetização externa) denominada curva de histerese magnética [6].

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** [24].

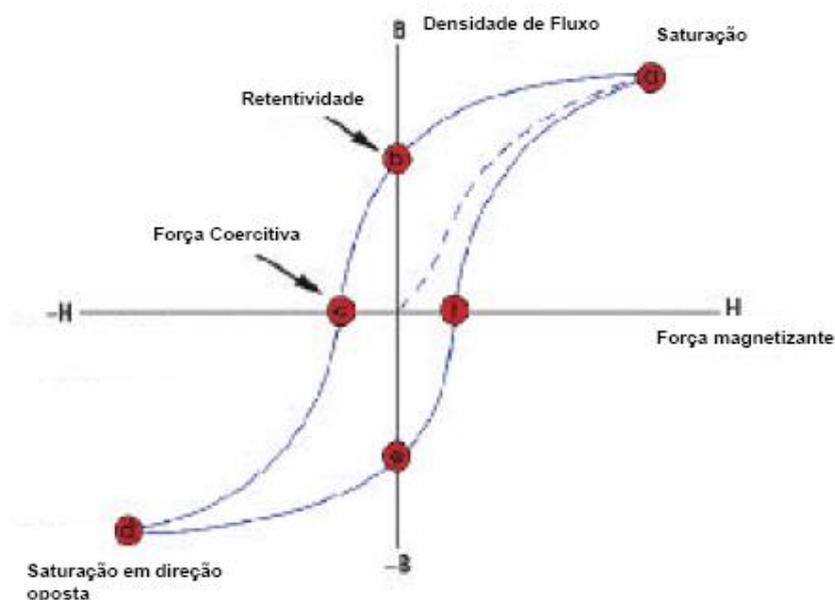


Figura 41 – Curva de histerese magnética B (densidade de fluxo) x H (força magnetizante) [41].

2.25. Descrição da técnica

O ensaio por partículas magnéticas é um método não destrutivo aplicado na inspeção de materiais ferromagnéticos para detecção e localização de descontinuidades. 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 descontinuidades ocorrerá a criação de campos de fuga ou dispersão em função de uma falta de continuidade nas propriedades magnéticas da peça [41]. A Figura 42 apresenta uma peça com uma descontinuidade superficial e a fuga do fluxo magnético originando os campos de fuga.

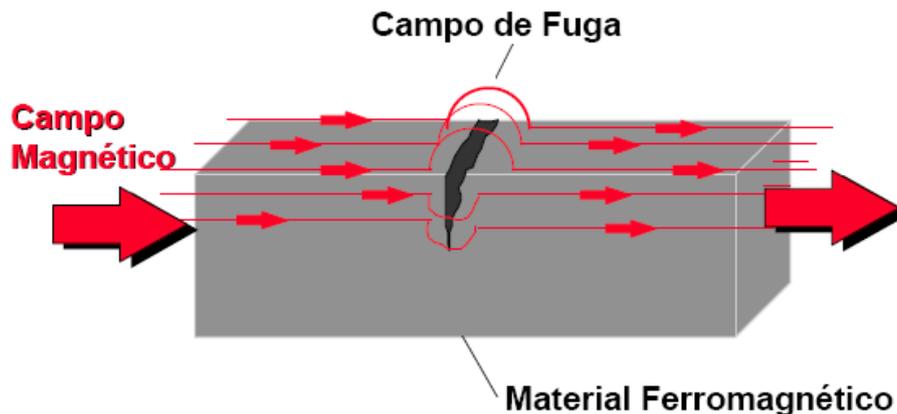


Figura 42 – Origem dos campos de fuga [41].

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 discontinuidades 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. O ensaio pode ser realizado durante as diversas etapas de fabricação, tanto em peças acabadas como semiacabadas e pode ser dividido em três diferentes etapas: magnetização do componente a ser inspecionado, aplicação das partículas magnéticas e exame visual da superfície ensaiada [41].

2.26. Métodos de magnetização

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 [17]. Em todos os casos o essencial é a utilização do campo magnético que está associada com o fluxo da corrente elétrica e a intensidade ao longo de uma direção [4]. A grande opção de métodos disponíveis, são simplesmente variações das técnicas básicas [17].

2.26.1. Magnetização longitudinal

A magnetização longitudinal consiste em envolver a peça a ser inspecionada através de bobinas, eletroímãs ou solenóides. Quando a corrente

elétrica é produzida e passa através da bobina, faz com que ocorra uma indução do campo magnético longitudinalmente a mesma e paralela ao longo do maior eixo (comprimento) do elemento inspecionado [42]. O sentido de fluxo do campo magnético ocorrerá em função do sentido da corrente na bobina. A intensidade do campo é dependente das dimensões do comprimento e diâmetro da peça ensaiada. A capacidade de detecção desta técnica é limitada a descontinuidades perpendiculares ou angulares em referência ao maior eixo da peça [24]. A Figura 43 apresenta uma barra magnetizada longitudinalmente.

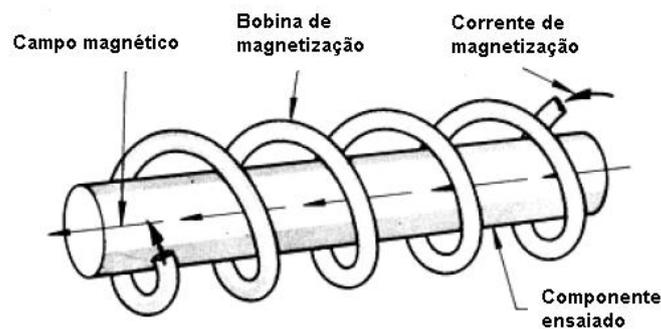


Figura 43 – Exemplo de um componente sob ação da magnetização longitudinal.

Adaptada de [24].

2.26.2. Magnetização circular

A magnetização circular consiste no efeito causado por uma corrente elétrica que atravessa qualquer condutor linear (fio ou barra) e cria um campo magnético circular ao redor desse condutor [24]. Essa técnica pode ser produzida através de indução ou passagem da corrente elétrica através do elemento e as linhas de força que geram o campo magnético circundam o objeto em um circuito fechado. É um método usado quando as descontinuidades são paralelas a direção de fluxo da corrente (descontinuidades longitudinais) [41]. Na Figura 44 observa-se uma barra com magnetização circular.

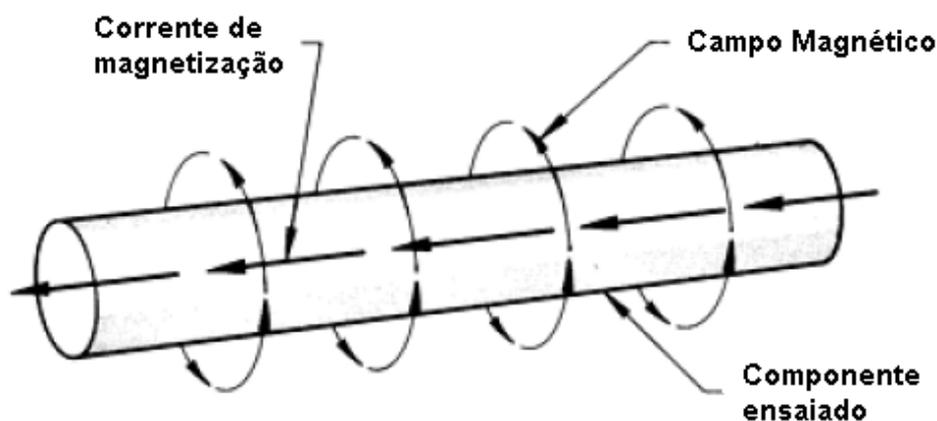


Figura 44 – Exemplo de um componente sob ação da magnetização circular. Adaptada de [24].

Uma das vantagens da magnetização circular é que os campos magnéticos produzidos são mais fortes que os campos magnéticos gerados pela magnetização longitudinal, isto também acarreta uma grande desvantagem que é uma desmagnetização mais difícil [17].

2.26.3. Magnetização multidirecional

A magnetização multidirecional é uma técnica também denominada de combinada ou vetorial [41] que alia as vantagens direcionais de dois ou mais campos magnéticos aplicados em determinadas posições (longitudinal ou circular). Possui a finalidade de verificar em uma só inspeção descontinuidades orientadas em ambos sentidos. [42].

Esta técnica apresenta como vantagem uma elevada produtividade em função da peça ser inspecionada uma única vez com maior economia de tempo, redução de erros do inspetor e maior velocidade na inspeção, pois tanto descontinuidades longitudinais quanto transversais podem ser detectadas. Sua grande desvantagem é determinar uma intensidade nos campos magnéticos que possibilite a detecção das descontinuidades em diferentes direções [41].

2.27. Técnicas de magnetização

Nesta revisão bibliográfica, somente a técnica do yoke será detalhada, pois foi o método usado no trabalho experimental. A Tabela 8 apresenta as vantagens e limitações das técnicas de magnetização.

Tabela 8 – Vantagens e limitações das técnicas de magnetização [24].

Técnica de magnetização	Vantagens	Restrições
Ímã permanente	Portátil	Campos magnéticos limitados
	Baixo custo	Magnetização difícil de remover da amostra
	Área de teste limitada	
Bobina eletromagnética	Magnetiza a amostra paralela ao eixo da bobina	Usado para materiais em forma de barra
	Campo muito uniforme	Uniformidade de magnetização é afetada pela posição da amostra.
Yoke	Portátil	A posição é importante
	Ajustável ao design da amostra	É requerido um bom contato com a amostra
	Fácil de manusear	
Cabo flexível	Magnetização de grandes amostras	O campo é limitado a superfícies exteriores do tubo
	Não existe perigo de marcas de queimadura nas tubulações em inspeções subaquáticas	Requisitos de tensão aumentam com o comprimento do cabo
Contatos	Usado para magnetização de grandes áreas	Dificuldade de posicionamento
		Requer corrente alta que pode causar marcas de queimadura

2.27.1. Técnica do yoke

Esta técnica de magnetização consiste na utilização de aparelhos denominados yokes e pode ser descrita da seguinte maneira: o aparelho tem a forma de uma letra u, constituídos de um núcleo de ferro envolvidos por uma bobina ou enrolamento e podem ter extremidades ou pernas fixas ou articuláveis, como pode ser observado na Figura 45.

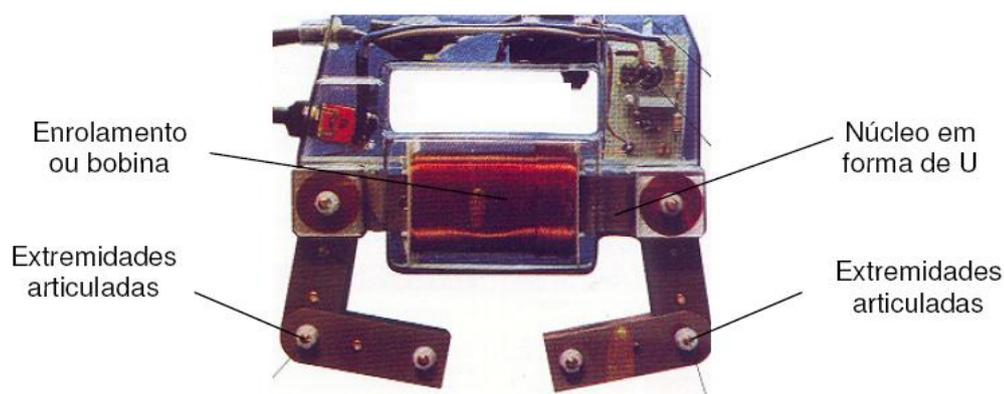


Figura 45 - Esquema básico de um yoke.[25].

Quando o equipamento é ligado, a corrente que pode ser contínua ou alternada atravessa o yoke e produz um campo magnético ao longo dos polos. No momento da inspeção o aparelho é empurrado de encontro a superfície em teste para que as linhas do campo magnético consigam penetrar e fluir na peça produzindo campo magnéticos longitudinais as extremidades do yoke. Para uma maior eficiência na detecção de descontinuidades o instrumento deve ser colocado em diferentes posições [25,41]. A grande vantagem desta técnica é que não ocorre a queima dos pontos de contato na peça, pois a corrente não penetra na peça, apenas o campo magnético [41]. A Figura 46 ilustra a magnetização de uma peça com uma junta soldada.

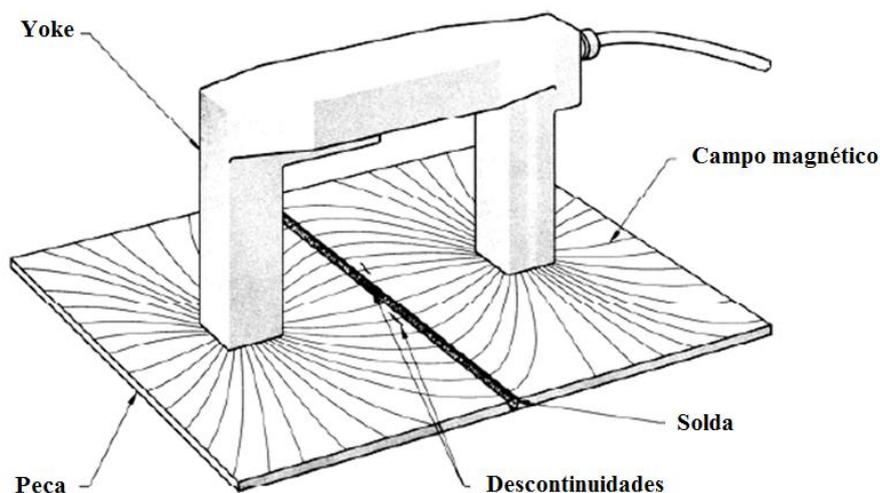


Figura 46 – Esquema de um yoke em uso. Adaptada de [24].

Segundo a norma ASME Sec. 5 artigo 7, nos ensaios de partículas magnéticas com a utilização do yoke a capacidade de magnetização do equipamento deve ser comprovada levantando uma massa de 4,5 kg em aço com corrente alternada e 18,1 kg em corrente contínua.

2.28 Desmagnetização

Frequentemente após a dificuldade na magnetização determinados elementos ferromagnéticos em função de suas propriedades magnéticas apresentam um magnetismo residual, devendo por isso serem desmagnetizados. Essa desmagnetização é gerada invertendo-se a força de magnetização até que atinja um valor nulo e pode ser de difícil execução em função do equipamento disponível [38]. As razões para que essa desmagnetização seja realizada devem-se ao fato de que uma peça magnetizada pode interferir com os processos de pintura, usinagem, soldagem e alterar instrumentos sensíveis a campo magnéticos [41].

2.29. Partículas magnéticas

As partículas magnéticas são responsáveis por determinar a indicação do campo de fuga causado pelas descontinuidades existentes nos componentes ensaiados [17]. São encontradas em pó, pasta ou diluídas em líquido [41].

A definição do tipo de partícula a ser usada está baseada em sete características: tamanho, densidade, forma, mobilidade, durabilidade, propriedades magnéticas e facilidade de visualização da partícula. Esses parâmetros devem ser avaliados em conjunto, relacionados uns aos outros, não ocorrendo preponderância de uma característica em detrimento de outras. [38].

O tamanho das partículas é um fator importante, pois partículas grandes e pesadas podem apresentar baixa mobilidade principalmente sob atuação de pequenos campos magnéticos enquanto que partículas menores podem aderir a superfícies que não possuam descontinuidades [24].

As partículas magnéticas podem ser divididas em duas classes distinguidas através do veículo ou agente usado para seu transporte em: método úmido (utiliza como veículo um líquido) e método seco (utiliza como veículo o ar) [4].

O método seco apresenta como vantagem a detecção de descontinuidades próximas a superfície e suas partículas devem possuir granulometria correspondente a região ensaiada. No método úmido a granulometria é fina e possui capacidade de detecção de descontinuidades de pequenas dimensões [41].

Dentre as propriedades magnéticas as partículas devem possuir elevada permeabilidade magnética, a fim de que sejam facilmente magnetizáveis, e baixa força coercitiva para que mantenham percentual de magnetismo residual [42].

Com relação a visualização as partículas apresentam uma variedade de cores, com a finalidade gerar um contraste com a peça. Vermelha (a mais popular), cinza e preto (via seca) e fluorescente (via úmida) [17].

2.30. Vantagens e desvantagens do ensaio

As principais vantagens do ensaio de partículas magnéticas são: não existe necessidade de uma pré-limpeza extremamente eficaz. A velocidade do ensaio, pois é um método rápido, simples e altamente portátil. Baixo custo. O treinamento da mão de obra é mais rápido para operação de um procedimento. Melhor método na detecção de fissuras superficiais finas, rasas de materiais ferromagnéticos e seus resultados são visuais [39,42].

As desvantagens apresentadas pelo ensaio são: revestimentos finos ou tintas podem atrapalhar a sensibilidade do método. Só podem ser usados em materiais ferromagnéticos. A orientação do campo magnético deve estar numa

direção que intercepte o plano principal da descontinuidade, fato que pode levar a necessidade de várias posições de inspeção. Em alguns casos pode ser necessário o uso de elevadas correntes elétricas para teste de peças grandes. Necessidade de desmagnetização após a avaliação. Experiência e habilidade do inspetor para determinar as descontinuidades. Dificuldade em registrar permanentemente os dados obtidos [24, 38, 42].