

INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE MINAS
GERAIS - *CAMPUS* BETIM
BACHARELADO EM ENGENHARIA MECÂNICA

Fabício Rodrigues Fonseca

TÉCNICAS DE DETECÇÃO DE DEFEITOS EM MATERIAIS METÁLICOS:
Usos e aplicações

Betim
2026

Fabício Rodrigues Fonseca

**TÉCNICAS DE DETECÇÃO DE DEFEITOS EM MATERIAIS METÁLICOS:
Usos e aplicações**

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado à banca examinadora do
curso de Engenharia Mecânica do Instituto
Federal de Educação, Ciência e
Tecnologia de Minas Gerais *Campus*
Betim, como parte dos requisitos para
obtenção do título de Bacharel em
Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. Me. Rogério Eustáquio
de Souza

Betim

2026

F676t Fonseca, Fabricio Rodrigues

Técnicas de detecção de defeitos em materiais metálicos: usos e aplicações
/ Fabricio Rodrigues Fonseca. – 2026.

59 f. : il.

Trabalho de conclusão de curso (Bacharelado em Engenharia Mecânica) -
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Minas Gerais, Câmpus
Betim, 2026.

Orientação: Prof. Me. Rogério Eustáquio de Souza

1. Ensaio de materiais. 2. Indústria metalúrgica. 3. Confiabilidade. 4.
Localização de falhas (Engenharia). 5. Engenharia Mecânica. I. Fonseca,
Fabricio Rodrigues. II. Título

CDU: 669.14

Fabício Rodrigues Fonseca



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
SECRETARIA DE EDUCAÇÃO PROFISSIONAL E TECNOLÓGICA
INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE MINAS GERAIS
Campus Betim
Diretoria de Ensino
Docentes Mecânica
Rua Itamarati - CEP 32677-564 - Betim - MG
3135976360 - www.ifmg.edu.br

ATA DE DEFESA DE TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

Aos 22 dias do mês de julho do ano de 2026, às dezessete e trinta horas, nas dependências do IFMG – Campus Betim, sala 01, reuniu-se a banca examinadora presidida por mim, Rogério Eustáquio de Souza e demais membros, Flávio Magno de Carvalho Fonseca e Evanilton José Alves Barbosa. Nesta ocasião o discente **Fabício Rodrigues Fonseca** do curso de Bacharelado em Engenharia Mecânica, com registro acadêmico de número 0055545 do IFMG – Campus Betim, defendeu seu Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) intitulado “**Técnicas de Detecção de Defeitos em Materiais Metálicos: Usos e aplicações**” e foi APROVADO, com 75 (setenta e cinco) pontos. A sessão foi encerrada às dezenove horas. Para constar, eu, Rogério Eustáquio de Souza, redigi a presente ata que, após lida publicamente, foi aprovada e assinada pelos membros da banca examinadora.

Betim, 23 de julho de 2026.



Documento assinado eletronicamente por **Rogério Eustáquio de Souza, Professor**, em 24/07/2026, às 11:08, conforme Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020.



Documento assinado eletronicamente por **Flavio Magno de Carvalho Fonseca, Professor**, em 24/07/2026, às 18:04, conforme Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020.



Documento assinado eletronicamente por **Evanilton Jose Alves Barbosa, Professor**, em 25/07/2026, às 16:45, conforme Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020.



A autenticidade do documento pode ser conferida no site <https://sei.ifmg.edu.br/consultadocs> informando o código verificador **2818539** e o código CRC **5B2BEDA2**.

23792.000877/2026-74

2818539v1

*Ao meu saudoso Pai, que me ensinou as
virtudes da paciência e da sabedoria.*

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus, pelas bênçãos e graças que me concedeu e sua presença eterna.

À minha família, maior tesouro que possuo, por me criar dentro dos valores da integridade, respeito e honestidade para com o próximo.

Aos professores e colegas do IFMG-Campus Betim pelo companheirismo, aconselhamento, orientação e ajuda de todas as formas que foram de grande valor em minha jornada acadêmica e profissional.

RESUMO

O presente trabalho demonstra por meio de revisão bibliográfica estudo comparativo entre as técnicas de detecção de defeitos em materiais metálicos nos produtos comuns da indústria metalúrgica como chapas, tubos, barras, lingotes, peças fundidas e/ou usinadas, de geometria complexa ou prismáticas, tanto no corpo do material quanto nas uniões soldadas. Buscou-se, neste trabalho, identificar as técnicas de detecção de descontinuidades mais adequadas para cada tipo de produto, analisando os resultados obtidos pelos critérios de exatidão de medições, duração total da inspeção e custo operacional. Dentro dos limites de uma revisão bibliográfica e do rol dos materiais ofertados comercialmente, o escopo deste trabalho limita-se aos produtos padronizados, comumente chamados “de prateleira”, excluindo-se os produtos de grande porte, fabricados sob medida, de ligas metálicas especiais protegidas por patente e de equipamentos e técnicas de inspeção específicas desenvolvidas para aplicações particulares.

Palavras-chave: Ultrassonografia industrial. Radiografia industrial. Ensaio não-destrutivo. Defeitos metálicos. Integridade estrutural. Confiabilidade.

ABSTRACT

This paper demonstrates, through a literature review, a comparative study between techniques for detecting internal defects in metallic materials in common products of the metallurgical industry such as sheets, tubes, bars, ingots, cast and/or machined parts, with complex or prismatic geometry, both in the body of the material and in welded joints. This work aimed to identify the most suitable techniques for each type of product, analyzing the results obtained based on measurement accuracy, total inspection duration, and operational cost. Within the limits of a literature review and the range of commercially available materials, the scope of this paper is limited to standardized products, commonly called “off-the-shelf,” excluding large-scale custom-made products, special metal alloys protected by patents, and equipment and specific inspection techniques developed for particular applications.

Keywords: Industrial ultrasonography. Industrial radiography. Non-destructive testing. Metal defects. Structural integrity. Reliability.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Linha do tempo dos ensaios não-destrutivos.....	18
Figura 2 - Tipos de defeitos em materiais metálicos.....	19
Figura 3 – Diagrama esquemático de um aparelho de raios x ou gama.....	21
Figura 4 – Radiografia de uma união soldada de tubos em curva.....	22
Figura 5 – Diagrama esquemático de um aparelho de Ultrassonografia.....	24
Figura 6 - Curva de onda ultrassônica típica.....	27
Figura 7 - Varredura tipo A-Scan.....	28
Figura 8 - Ultrassonografia do olho humano no modo B-scan.....	29
Figura 9 - Imagem gerada pelo modo C-Scan.....	30
Figura 10 – Princípio de detecção do ensaio PM.....	31
Figura 11 – Ensaio PM fluorescente de uma engrenagem sob luz UV.....	32
Figura 12 – Ensaio PM em união soldada de tubulação.....	33
Figura 13 – Diagrama esquemático de um sistema de detecção de correntes parasitas.....	34
Figura 14 – Aparelho de ensaio de correntes parasitas (EDT ou EDA).....	35
Figura 15 - Espaçamento entre a sonda e a peça no EDT.....	36
Figura 16 - Gráfico de frequência X potência dissipada num ensaio EDT.....	37
Figura 17 - Exemplo de defeito encontrado num ensaio EDT.....	38
Figura 18 - Diferença de fase indicando defeito encontrado.....	39
Figura 19 - Interpretação do gráfico do ensaio EDT.....	40
Figura 20 - Diagrama esquemático de ensaio de emissão acústica.....	41
Figura 21 - Exemplo de gráfico gerado no ensaio de EA.....	43
Figura 22 - Etapas do método PRISMA.....	45
Figura 23 – Fluxograma de Decisão.....	55

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Principais normas brasileiras aplicáveis aos ensaios não destrutivos.....	19
Tabela 2 - Principais normas internacionais aplicáveis aos ensaios não destrutivos.....	20
Tabela 3 - Características das fontes de energia radiante.....	23
Tabela 4 - Velocidade do som em metais.....	25
Tabela 5 - Comparativo entre modos de apresentação e varredura de US.....	30
Tabela 6 - Tipos de partículas para ensaio PM.....	32
Tabela 7 - Equipamentos para ensaio EA.....	41
Tabela 8 - Preços de equipamentos para ensaio de Radiografia Industrial.....	46
Tabela 9 - Preços de equipamentos para ensaio US.....	47
Tabela 10 - Preços de equipamentos para ensaio PM.....	48
Tabela 11 - Preços de equipamentos para ECT.....	49
Tabela 12 - Preços de equipamentos para ensaio EA.....	50
Tabela 13 - Comparativo técnico-econômico entre métodos END.....	51

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABENDI - Associação Brasileira de Ensaaios Não-Destrutivos e Inspeção

ABM - Associação Brasileira de Metalurgia, Materiais e Mineração

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas

ASTM - *American Society for Testing and Materials* (Sociedade Americana para Materiais e Testes)

BNDES – Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social

CNEN - Comissão Nacional de Energia Nuclear

DIN - *Deutsches Institut für Normung (Instituto Alemão de Normatização)*

EA - Emissão Acústica

ECT – *Eddy-Current Testing* (Ensaio de correntes parasitas)

END – Ensaaios Não-Destrutivos

FINAME – Financiamento de Máquinas e Equipamentos

FINEP – Financiadora de Estudos e Projetos

FoFo – Ferro Fundido

IFMG - Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Minas Gerais

kV – Quilo Volt (10^3 V)

MeV – Mega Elétron-Volt (10^6 eV)

mT – Mili Tesla (10^{-3} T)

NBR - Normas Técnicas Brasileiras

NDT – *Non-Destructive Testing* (Ensaio Não-Destrutivo)

PM - Partículas Magnéticas

PRISMA – *Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses* (Principais Itens para Relatar Revisões Sistemáticas e Meta-análises)

SI – Sistema Internacional de Unidades

T – Tesla (unidade de fluxo magnético no SI) [$1\text{ T} = 1\text{ Wb/m}^2 = 1\text{ V.s}$]

TCC - Trabalho de Conclusão de Curso

US – Ultrassom

LISTA DE SÍMBOLOS

H_d	Profundidade da descontinuidade (mm)
V_1	Velocidade do som no meio analisado (m/s)
T_r	Tempo de percurso do eco (ms)
Y	Módulo de Young (N/mm ²)
ρ	Densidade (kg/m ³)
δ	Profundidade de penetração (mm)
ω	Frequência angular (rad/s)
μ	Permeabilidade magnética (H/m ou T.m/A)
σ	Condutividade elétrica (μ S/cm)

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	14
1.1 Justificativa.....	14
1.2 Colocação do Problema.....	15
1.3 Objetivos.....	15
1.3.1 Objetivo Geral.....	15
1.3.2 Objetivos Específicos.....	15
1.4 Organização do Trabalho.....	16
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	17
2.1 Pequeno Histórico dos END's.....	17
2.2 Tipos de defeitos mais comuns.....	18
2.3 Normas Técnicas aplicáveis.....	19
2.4 Técnicas e equipamentos atuais.....	20
2.4.1 Radiografia Industrial.....	20
2.4.2 Ultrassonografia Industrial.....	24
2.4.3 Ensaio de Partículas Magnéticas.....	30
2.4.4 Ensaio de Correntes Parasitas (<i>Eddy-Current</i>).....	33
2.4.5 Ensaio de Emissão Acústica.....	40
3 METODOLOGIA.....	44
3.1 Método PRISMA.....	44
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	46
4.1 Limitações e Problemas.....	46
4.1.1 Custos de implantação e operação.....	46
4.1.2 Dificuldades Operacionais e qualificação da mão de obra.....	53
4.2 Proposta de Critério de Escolha.....	53
4.2.1 Determinação por simplicidade e rapidez.....	53
4.2.2 Determinação por tipo de produto e cliente.....	54
4.2.3 Fluxograma de Decisão.....	55
5 CONCLUSÃO.....	56
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	57

1 INTRODUÇÃO

Na indústria moderna, a detecção precoce de defeitos aparentes ou internos nos diversos produtos é de suma importância para garantir a qualidade e confiabilidade da produção. O impacto negativo de um lote não-conforme ou mesmo de um produto individual imperfeito traz efeitos adversos que vão além de prejuízo e retrabalho: podem, também, gerar perda de imagem e *market-share*, diminuindo a propensão da clientela atual a manter a parceria e afastando potenciais novos clientes. A falha de um componente, peça ou equipamento por mais simples que seja pode ocasionar descumprimento de prazos, acionamento de sinistros nos contratos assegurados e demais implicações legais e contratuais que minam a imagem e a boa reputação da empresa de modo, às vezes, irreparável. Kotler e Keller (2012) ressaltam que a confiança é um ativo intangível essencial para a manutenção de relacionamentos de longo prazo com clientes.

Portanto, a etapa de verificação da integridade de produtos, especificamente neste trabalho, de materiais metálicos é indispensável num ambiente de alta competitividade do mercado atual. Contudo, a realização de ensaios com resultados confiáveis e em tempo hábil se mostra dispendiosa e complexa, exigindo altos investimentos, qualificação dos operadores e uma sistemática de manutenção e calibração periódica dos sistemas.

Dimensionar adequadamente o sistema ou técnica de detecção de defeitos se tornou uma etapa essencial para garantir a qualidade e atendimento dentro do prazo e, também, para afastar riscos de ociosidade, superdimensionamento e diagnóstico incorreto: deixando de constatar defeitos reais ou detectando erroneamente uma falha de integridade, acarretando descarte de um material em boas condições.

1.1 Justificativa

Devido a necessidade cada vez maior de se obter qualidade com alta eficiência e baixo custo, técnicas de detecção de defeitos e imperfeições ocultas em materiais se tornaram indispensáveis na indústria de fabricação, em especial nos produtos metalúrgicos em suas mais diversas aplicações. Portanto, a capacidade de

se selecionar o método mais adequado de inspeção para verificação da integridade de um material, considerando suas particularidades e características próprias da aplicação, é essencial para o atingimento das metas de produtividade, qualidade e custo de um processo/indústria.

1.2 Colocação do Problema

Diante das exigências atuais de produtividade alta e custo reduzido, a eliminação de falhas de fabricação é tema central dos programas de *Lean Manufacturing* e KAIZEN (melhoria contínua) nas empresas modernas. A detecção de falhas, seja no estado inicial de matéria prima ou já em produtos acabados ou semiacabados, evita desperdícios, retrabalho, não-conformidades, reclamações e devoluções que oneram o custo e geram perda de mercado para o fabricante. Portanto, a escolha correta e célere de um método de detecção de falhas é fator determinante para o bom andamento da produção e confere ao fabricante um diferencial de qualidade perante a concorrência.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo Geral

O objetivo geral deste trabalho é estudar as técnicas de detecção de defeitos usadas atualmente e propor um critério de escolha de um método de detecção baseado numa combinação de ensaios, dentre as técnicas disponíveis comercialmente, de maneira simplificada e de custo adequado.

1.3.2 Objetivos Específicos

- Identificar as técnicas de inspeção mais adequadas para materiais e produtos específicos da indústria metalúrgica

- Comparar métodos e propor critério de escolha da combinação de ensaios a ser realizada

1.4 Organização do Trabalho

Este trabalho foi estruturado em capítulos e subtópicos para introduzir, expor e esclarecer o assunto a ser discutido. Iniciando-se com a tipificação dos defeitos mais comuns e as técnicas e equipamentos atuais, seus usos e aplicações. Em seguida, apresenta-se as limitações e problemas encontrados na inspeção em cada método, as consequências da falha na detecção de defeitos e as possíveis medidas de mitigação e amenização destas dificuldades. Por fim, é apresentada uma proposta de critério de escolha da melhor combinação de técnicas, dentro dos limites mencionados.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Atualmente, existem diversas técnicas de detecção de defeitos em materiais metálicos, sendo eles internos ou superficiais, cada uma com características próprias de aplicabilidade e limitações. Os critérios de comparação são baseados na circunstância de chão de fábrica, visando a agilidade da verificação e o baixo custo.

Foram desenvolvidos capítulos expondo e comparando as diferentes técnicas de END (Ensaio Não-Destrutivo) e suas aplicações na indústria, entre elas: Ultrassonografia, Radiografia, Ensaio de correntes parasitas, Ensaio de partículas magnéticas e Emissão acústica.

Ensaio não considerados neste trabalho: Os ensaios Visual (EV) e de Líquido Penetrante (LP) não foram analisados neste trabalho devido suas capacidades de detecção serem efetivas apenas para descontinuidades superficiais. Porém, a adoção deles se torna adequada como uma verificação preliminar, a fim de se identificar rapidamente os materiais com defeitos aparentes e/ou superficiais e rejeitá-los, evitando assim a realização desnecessária de ensaios posteriores.

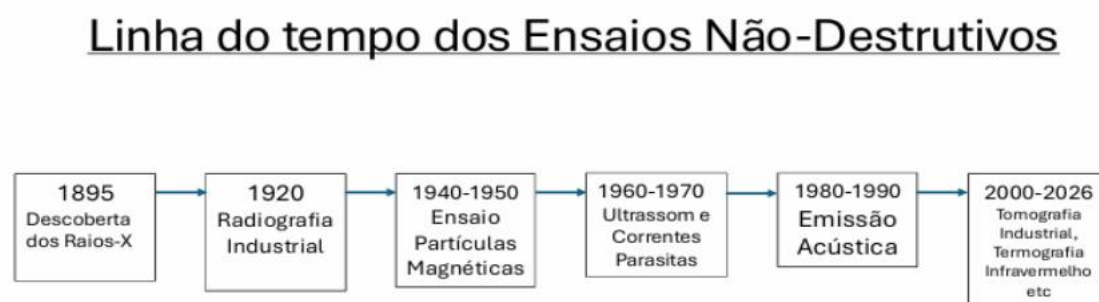
2.1 Pequeno Histórico dos END's

No início do século XX, após a consolidação da revolução industrial como grande motor da economia mundial, surgiu a necessidade de se garantir produtos isentos de defeitos, em especial os produtos ferrosos, pois o aço se mostrava superior como material de construção mecânica em substituição à madeira.

Com isso surgiram técnicas para detectar falhas nos produtos, de início inspeção visual e gabaritos de medição. Logo depois surgiu a necessidade de encontrar defeitos internos, não contemplados pelas técnicas disponíveis. Impulsionados pela Primeira Guerra Mundial (1914-1918) os Ensaio Não-Destrutivos (END) foram desenvolvidos para eliminar o grande número de falhas que ocorriam no campo de batalha: canhões que trincavam precocemente, mecanismos de gatilho e disparo que quebravam sob uso repetitivo, cápsulas que rachavam sob alta pressão etc.

Uma das primeiras técnicas aplicadas foi a Radiografia Industrial, que havia sido criada recentemente após a descoberta dos Raios-X por Wilhelm Conrad Röntgen (1845-1923). Usada principalmente na inspeção de uniões soldadas nas indústrias bélica, naval, petroquímica e aeronáutica, a radiografia industrial mostrou o enorme potencial que a detecção precoce de defeitos metálicos tem para garantir a qualidade dos produtos e a economicidade da produção. A Figura 1 demonstra a evolução das técnicas que serão pormenorizadas no decorrer do trabalho.

Figura 1 – Linha do tempo dos ensaios não-destrutivos

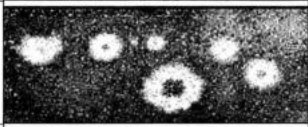
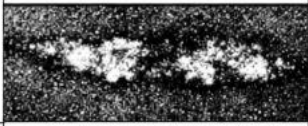


Fonte: Elaborado pelo autor (2026)

2.2 Tipos de defeitos mais comuns

A Figura 2 apresenta os principais tipos de discontinuidades detectáveis por meio do ensaio de partículas magnéticas. Cada imagem exemplifica o padrão típico de indicação formado pela acumulação das partículas sobre a superfície da peça, permitindo ao inspetor identificar a natureza e a gravidade da falha. As trincas, poros, inclusões e defeitos de soldagem são as ocorrências mais comuns, e sua correta interpretação é essencial para garantir a integridade estrutural dos componentes inspecionados. A visualização direta das indicações facilita o diagnóstico e contribui para a padronização dos critérios de avaliação conforme as normas técnicas vigentes.

Figura 2 – Tipos de defeitos em materiais metálicos

Tipo de Descontinuidade	Imagem de Exemplo	Descrição
Trinca		Fissura linear, típica por fadiga ou soldagem.
Poros e Cavidades		Pequenos buracos ou vazios de fundição.
Inclusões Não Metálicas		Partículas de escória ou óxidos no material.
Defeitos de Soldagem		Falhas como falta de fusão ou mordedura.

Fonte: Elaborado pelo autor (2026), adaptado de normas ABNT NBR 16182:2013, ASTM E1444/E1444M, ISO 9934-1:2016.

2.3 Normas Técnicas aplicáveis

Acompanhando a evolução dos END no século XX, diversos institutos e órgãos de normatização e qualidade foram criados para padronizar e servir de referência técnica na elaboração de procedimentos para assegurar o diagnóstico preciso de falhas. No Brasil, a ABNT se destaca como órgão normatizador enquanto ASTM, ISO e DIN são referências mundiais. Citamos nas Tabelas 1 e 2 as normas mais importantes aplicáveis ao tema do trabalho:

Tabela 1– Principais normas brasileiras aplicáveis aos ensaios não destrutivos

Norma	Título	Aplicação
ABNT NBR 15841:2010	<i>Ensaios não destrutivos — Ultrassom — Detecção de descontinuidades</i>	Define parâmetros para inspeções ultrassônicas em materiais metálicos.
ABNT NBR 15571:2013	<i>Ensaios não destrutivos — Estandeidade — Detecção de vazamentos</i>	Define procedimentos para testes de estanqueidade e detecção de vazamentos.
ABNT NBR 16182:2013	<i>Ensaios não destrutivos — Partículas magnéticas — Detecção de descontinuidades</i>	Especifica critérios para ensaios em materiais ferromagnéticos.

ABNT NBR ISO 9712:2022	<i>Ensaaios não destrutivos — Qualificação e certificação de pessoal</i>	Regula a formação e certificação de profissionais que executam END.
-------------------------------	--	---

Fonte: Elaborado pelo autor (2026), com base em ABNT NBR 15571:2013, ABNT NBR NM 334:2005, ABNT NBR ISO 9712:2022 e ABNT NBR 15841:2010.

Tabela 2 – Principais normas internacionais aplicáveis aos ensaios não destrutivos

Norma	Organização	Escopo
ASTM E1444/E1444M	ASTM International	<i>Standard Practice for Magnetic Particle Testing</i> — estabelece critérios para partículas magnéticas.
ASTM E213	ASTM International	<i>Standard Practice for Ultrasonic Testing of Metal Pipe and Tubing</i> — define parâmetros para ultrassom em tubos metálicos.
ISO 9712:2021	ISO	<i>Qualification and Certification of NDT Personnel</i> — harmoniza padrões internacionais de certificação de profissionais.

Fonte: Elaborado pelo autor (2026), com base em ASTM E1444/1444M, ASTM E213 e ISO 9712:2021.

2.4 Técnicas e equipamentos atuais

A seguir serão apresentadas as técnicas atuais de forma mais detalhada, focando no uso industrial em produtos metálicos atuais de ampla adoção no mercado.

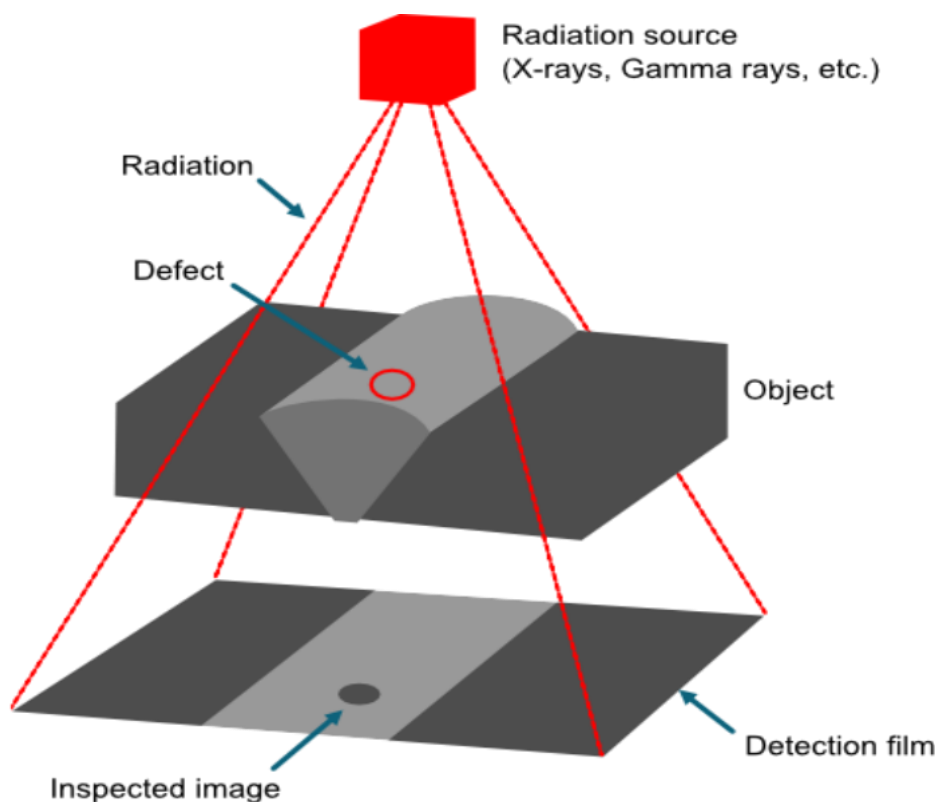
2.4.1 Radiografia Industrial

Princípio de detecção: Usando a radiação proveniente de alguma fonte de energia, um aparelho concentra o feixe de raios-x ou gama sobre uma área determinada. Este, por sua vez, atravessa o material e é parcialmente absorvido pelo mesmo, enquanto o restante da energia radiante atinge um painel detector posicionado atrás do objeto em análise. O painel detector pode ser provido de filme radiográfico ou, em aparelhos modernos, um detector de cintilação digital que transforma a radiação absorvida em sinais elétricos gerando uma imagem digitalizada da radiografia.

Fontes de energia radiante: Tubos de Raios-X, Radioisótopos como Irídio-192, Cobalto-60 ou Césio-137.

Análise da imagem e diagnóstico: Na radiografia gerada, representada na Figura 3 é possível ver as descontinuidades e defeitos no interior do material maciço pela diferença de tonalidade entre áreas escuras, material sólido impedindo a passagem do feixe, e áreas claras, vazios internos ou descontinuidades do material.

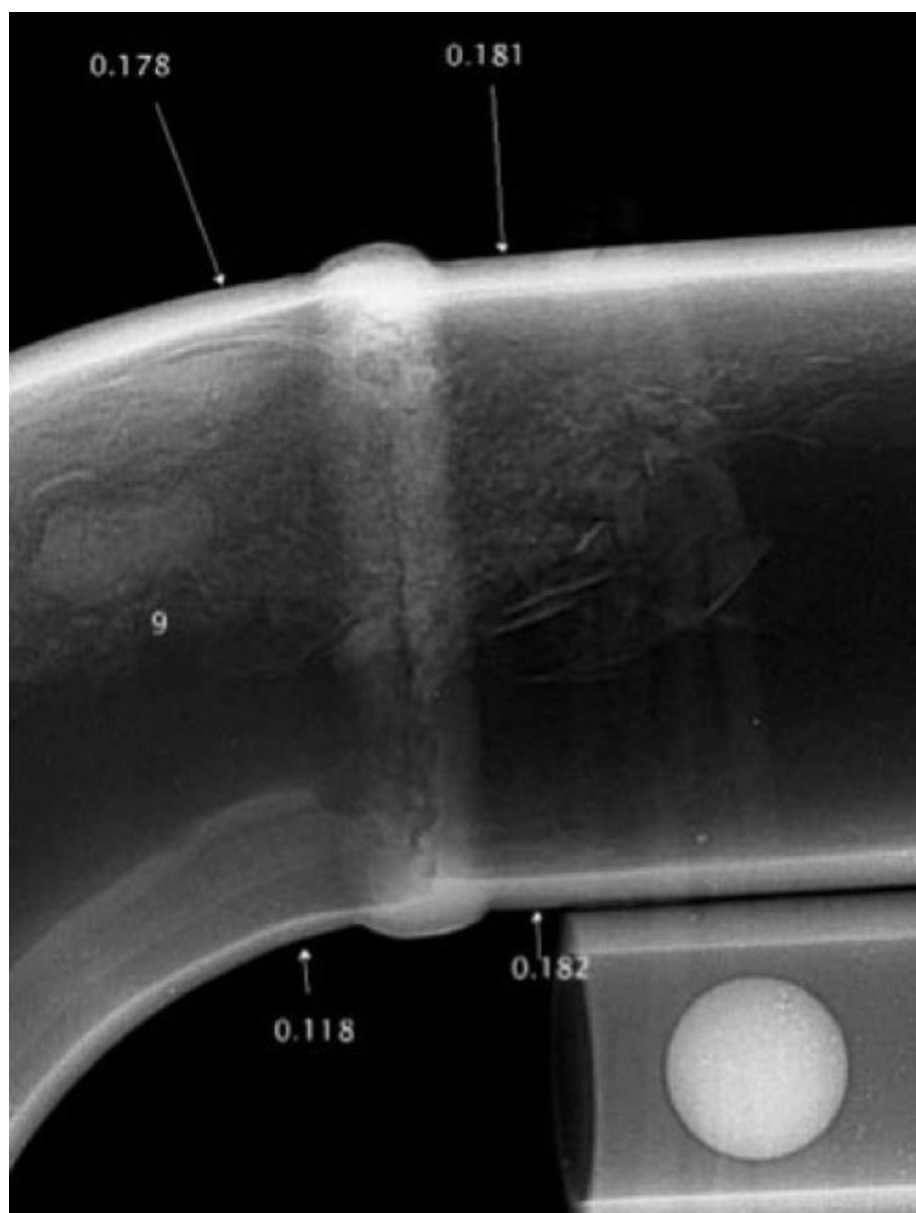
Figura 3 – Diagrama esquemático de um aparelho de raios x ou gama



Fonte: American Metal Testing – 2026

É possível detectar diferentes tipos de defeitos como: trincas, porosidades, inclusões etc. Após a exposição controlada ao feixe de radiação o filme fotográfico é revelado por um processo químico, gerando uma imagem com alto contraste onde é possível visualizar a estrutura interna do objeto. O filme gerado pode ser arquivado para análises posteriores e comparações (Figura 4).

Figura 4 – Radiografia de uma união soldada de tubos em curva



Fonte: American Metal Testing – 2026

Características do método de inspeção: Detecção de defeitos superficiais e subsuperficiais, compatibilidade com vários metais, capacidade de identificar diferentes tipos de defeitos, registro visual permanente da inspeção.

A Tabela 3 traz algumas características comparadas entre raios-X e gama.

Tabela 3 - Características das fontes de energia radiante

Tipo de Fonte	Energia Média (MeV)	Espessura Máxima (mm)	Metais Aplicáveis	Aplicações Típicas
Raios Gama				
Ir-192	0,38	50	Aço carbono, Alumínio, Cobre	Unões soldadas em tubos e vasos de pressão
Co-60	1,25	200	Aço carbono, FoFo, Níquel	Peças fundidas de grande porte
Cs-137	0,66	100	Aço Inox, Ligas Leves	Materiais de densidade intermediária
Raios X				
Tensão (kV)				
Convencionais	40-300	60	Alumínio, Cobre, Titânio	Peças de pouca espessura e componentes eletrônicos
Alta Energia	150-450	200	Aço Carbono e Inox, Chumbo	Peças de grande espessura em geral

Fonte: Adaptado de *Brasil Inspect (2024)* e *CNEN - Radioproteção Industrial (2023)*

Infraestrutura e Operação: Devido aos efeitos nocivos da exposição aos raios ionizantes, medidas de radioproteção devem ser tomadas pelo fornecedor do serviço e adotadas integralmente pelo operador. Tais medidas são regidas pela norma CNEN-NN-3.01 que se baseia nos princípios fundamentais de radioproteção:

- Justificação: Toda exposição deve trazer benefícios que superem os riscos;
- Otimização: As doses devem ser mantidas no menor nível que seja possível alcançar: ALARA (*As Low As Reasonably Achievable*);
- Limitação de dose: Respeitar os limites estabelecidos pelos órgãos de controle

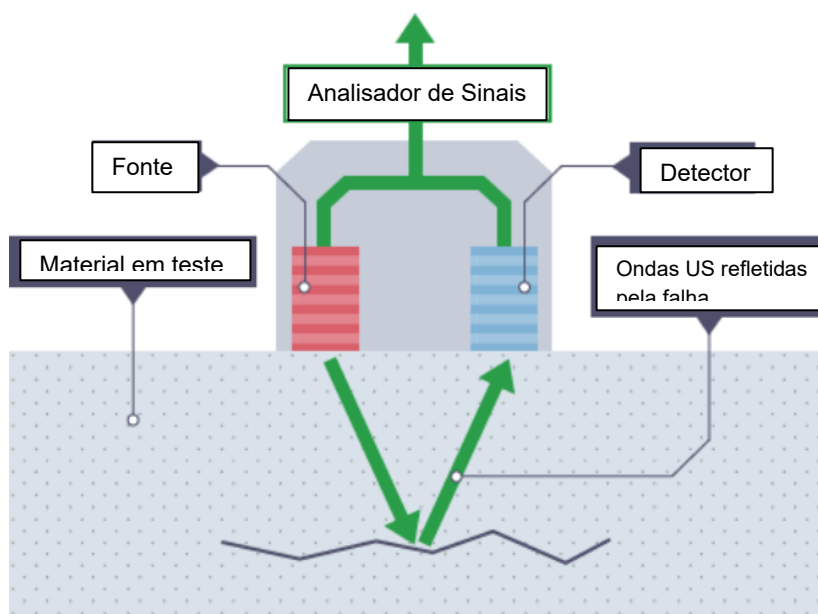
As medidas de proteção demandam infraestrutura adequada para operação segura dos equipamentos de inspeção radiográfica como: blindagem das fontes como Chumbo ou Tungstênio, paredes de contenção em concreto armado reforçado e de espessura mínima calculada em função do potencial de exposição. Além destas,

outras medidas individuais devem ser tomadas para garantir a segurança do operador: distância mínima da fonte no momento da exposição, tempo exposto reduzido ao máximo possível, monitoração constante com dosímetros individuais e do ambiente com aparelhos de detecção coletivos.

2.4.2 Ultrassonografia Industrial

Princípio de detecção: Baseia-se na propagação e reflexão de ondas mecânicas ultrassônicas, ou seja, acima da faixa de frequências audíveis pelo ouvido humano (20 Hz a 20kHz). A Figura 5 demonstra o esquema de montagem do dispositivo. Através de dois transdutores piezoelétricos, um emissor e um receptor, o aparelho de US emite uma onda mecânica que se propaga pelo corpo do material em análise. Quando essas ondas encontram interfaces com diferentes impedâncias acústicas, como trincas ou inclusões, parte da energia é refletida, gerando ecos que são captados pelo transdutor receptor (SILVA, 2024). A determinação do defeito interno se dá a partir da análise das propriedades do eco como tempo de resposta e amplitude do sinal.

Figura 5 – Diagrama esquemático de um aparelho de Ultrassonografia



Fonte: American Metal Testing – 2026

Cálculo da profundidade do defeito: Considerando-se a velocidade do som no ar e em diversos materiais e medindo-se o tempo entre a emissão do sinal e a

captação do eco é possível calcular, com razoável precisão, a profundidade da descontinuidade a partir da superfície pela Equação 1, medida em mm:

$$H_d = v_1 \cdot t_r \quad [\text{Equação 1}]$$

Onde H_d é a profundidade da falha, v_1 é a velocidade de propagação da onda no meio analisado e t_r é o tempo de percurso do eco. A velocidade do som varia de acordo com o material em que a onda se propaga, sendo possível calculá-la através de outras propriedades como módulo de Young (Y) e densidade (ρ) (Equação 2, em m/s):

$$v_1 = \sqrt{\frac{Y}{\rho}} \quad [\text{Equação 2}]$$

A Tabela 4 traz alguns dados sobre a velocidade de propagação nos metais:

Tabela 4 – Velocidade do som em metais

Material	Módulo de Young (GPa)	Densidade (ρ) (kg/m ³)	Velocidade Longitudinal (m/s)	Observações técnicas
Alumínio	69	2.700	6.300	Alta velocidade devido à baixa densidade e boa elasticidade.
Cobre	125	8.930	4.700	Densidade elevada reduz a velocidade de propagação.
Aço carbono	200	7.850	5.900	Valor médio usado em inspeções ultrassônicas industriais.
Aço inoxidável	193	8.000	5.800	Leve redução pela presença de ligas de cromo e níquel.

Ferro fundido cinzento	170	7.870	4.600	Estrutura granular e presença de grafita reduzem a velocidade.
Latão	97	8.500	4.300	Menor elasticidade e maior densidade.

Fonte: ABENDI, *Ensaio por Ultrassom*, Apostila, Ed. Jun./2018.

Análise do gráfico e diagnóstico: O gráfico gerado pelo aparelho de US mostra informações muito relevantes sobre o estado do material abaixo da superfície inspecionada, que, quando interpretadas corretamente, resulta num diagnóstico preciso. As grandezas envolvidas na análise são:

Amplitude (A): indica a intensidade do sinal refletido, sendo proporcional à energia da onda que retorna ao transdutor. Ecos de maior amplitude correspondem a superfícies mais refletoras ou descontinuidades de maior dimensão. Sendo uma grandeza elétrica, geralmente medida em Volts, dB ou % de escala.

Tempo (t): representa o intervalo entre a emissão e o retorno do pulso ultrassônico, utilizado para calcular a profundidade da descontinuidade pela equação mencionada anteriormente. Geralmente medido em ms ou s.

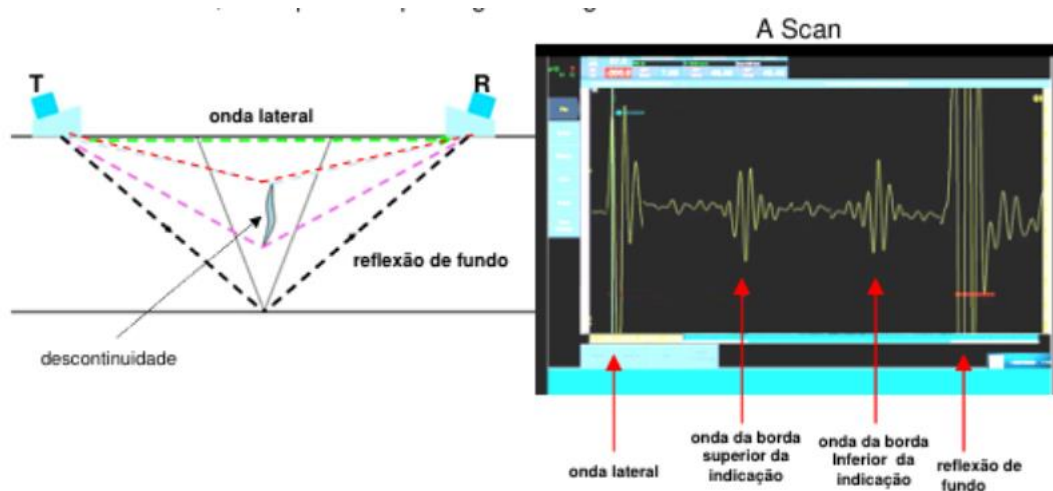
Espessura da parede: determinada pelo primeiro eco de reflexão, que indica a distância entre as superfícies externa e interna do material.

Forma do eco: fornece informações sobre a textura e uniformidade da superfície interna, sendo útil para distinguir defeitos de natureza diferente.

Envelope do sinal: linha que contorna os picos de amplitude, permitindo visualizar a energia total do pulso e identificar ecos múltiplos.

A interpretação do gráfico segue uma lógica sequencial: o primeiro eco representa a reflexão na superfície externa, o segundo eco corresponde à parede interna, e ecos intermediários indicam defeitos internos, como trincas ou inclusões. A distância entre os picos revela a profundidade das interfaces, enquanto a diferença de amplitude auxilia na classificação da severidade da descontinuidade. A Figura 6 ilustra o perfil de uma onda ultrassônica.

Figura 6 – Curva de onda ultrassônica típica



Fonte: ABENDI, *Ensaio por Ultrassom*, Apostila, Ed. Jun./2018.

O eco de fundo (ou *back wall echo*) é o último sinal refletido que aparece no gráfico de ultrassonografia industrial, correspondendo à reflexão da onda ultrassônica na parede posterior do material inspecionado. Ele representa o ponto em que o feixe sonoro atravessa todo o corpo de prova e atinge a superfície oposta, retornando ao transdutor. Quando o pulso ultrassônico é emitido, ele se propaga pelo interior do material até encontrar uma interface, seja uma descontinuidade interna ou a parede posterior. Se não houver defeitos, o eco de fundo será o segundo grande pico no gráfico, indicando que a onda percorreu toda a espessura do material sem interrupções.

Se houver defeitos internos, parte da energia será refletida antes de atingir o fundo, reduzindo a amplitude do eco de fundo ou até eliminando-o. No gráfico de onda ultrassônica, o eco de fundo aparece após o eco da superfície interna e é identificado como o “*2nd echo*”. A análise da amplitude do sinal revela as seguintes condições: Amplitude alta: indica ausência de falhas significativas. Amplitude reduzida ou distorcida: sugere presença de trincas, inclusões ou corrosão que dispersam parte da energia sonora. Ausência total (*Flatline*): pode indicar defeito severo ou perda de acoplamento entre o transdutor e o material. Em resumo, ele funciona como um marcador de referência: quanto mais íntegro o material, mais nítido e intenso será o eco de fundo (PEREIRA; COSTA, 2021).

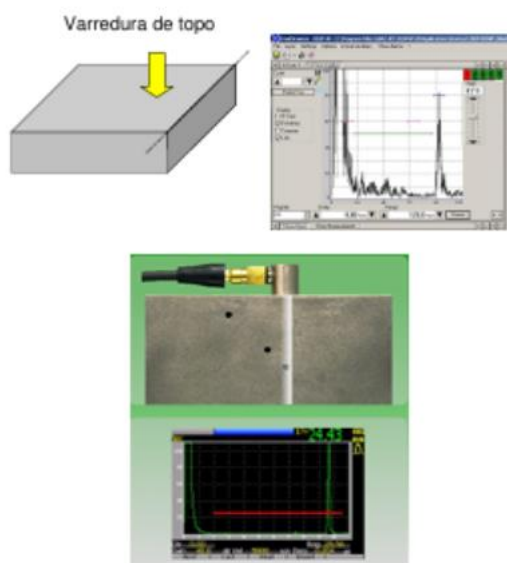
Equipamentos e operação: Os aparelhos de US são projetados para detectar descontinuidades internas em materiais metálicos, medir espessuras e

avaliar a integridade estrutural de componentes sem causar danos. O sistema básico é composto por um gerador de pulsos, um transdutor piezoelétrico, um amplificador de sinais, um processador eletrônico e um visor gráfico.

Modos de apresentação e varredura: Os resultados da inspeção podem ser exibidos em diferentes formatos de varredura (A-scan, B-scan e C-scan) cada um oferecendo um nível distinto de detalhamento e representação gráfica.

A-scan (Amplitude Scan): É o modo mais básico de exibição. Mostra um gráfico unidimensional da amplitude do sinal em função do tempo de percurso. Cada pico representa um eco, o primeiro da superfície, os seguintes de discontinuidades internas e o último do eco de fundo. Usado para medir espessura, localizar falhas e calibrar equipamentos. É o formato típico dos gráficos apresentados em ensaios pontuais. A Figura 7 mostra o posicionamento do transdutor neste tipo de varredura.

Figura 7 – Varredura tipo A-Scan

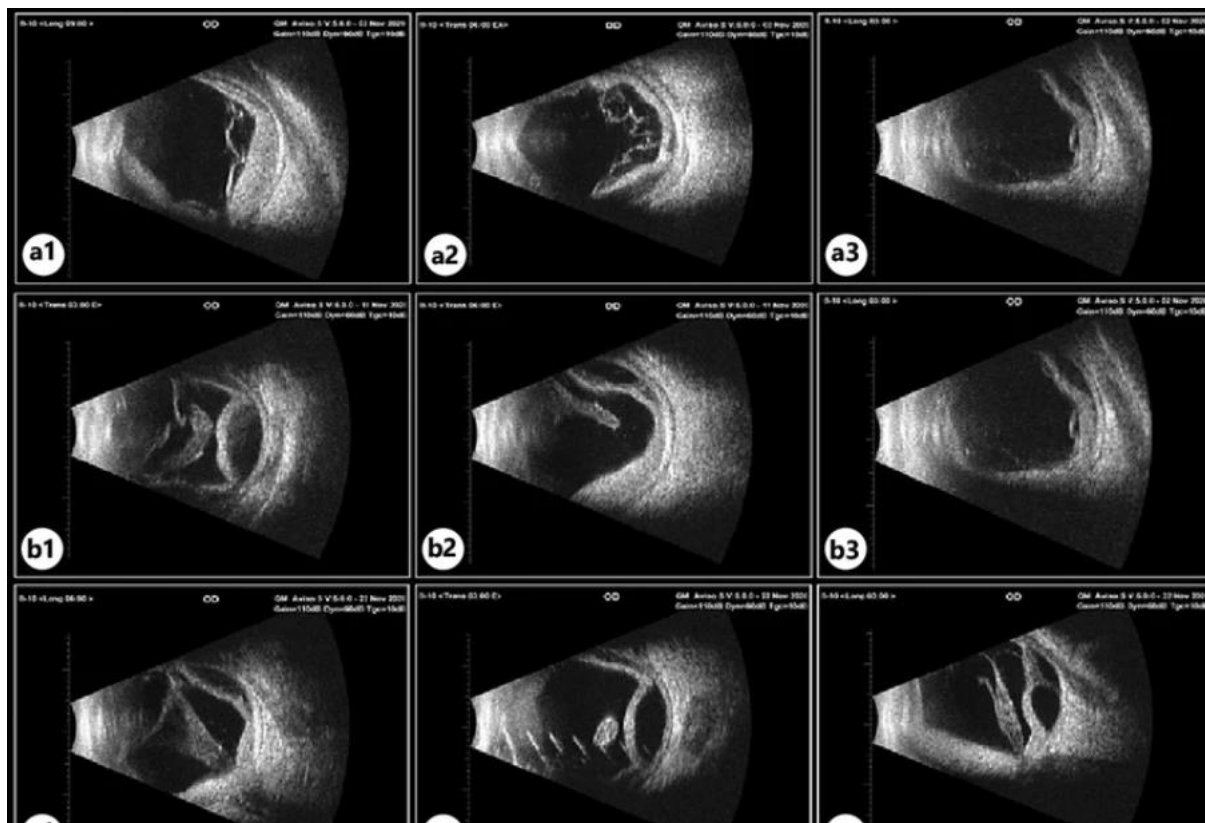


Fonte: ABENDI, *Ensaio por Ultrassom*, Apostila, Ed. Jun./2018.

B-scan (Brightness Scan): Representado na Figura 8, mostra uma seção transversal bidimensional do material. Cada ponto do gráfico corresponde à intensidade do eco em uma posição específica. Permite visualizar a forma e a profundidade das discontinuidades. É obtido pela varredura linear do transdutor

sobre a superfície, gerando uma imagem semelhante a uma “radiografia ultrassônica”. É o tipo mais comum usado em diagnósticos médicos.

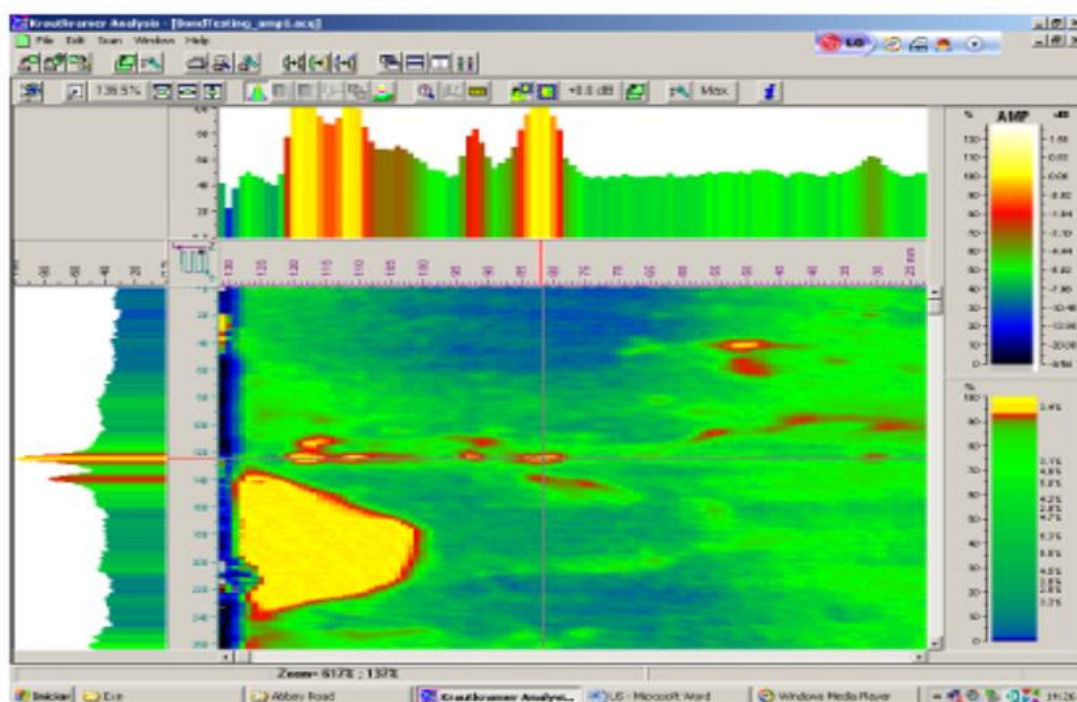
Figura 8 – Ultrassonografia do olho humano no modo B-scan



Fonte: Adaptado de ResearchGate, B-scan ultrasonography of the right eye, 2020.

C-scan (Contour Scan): Fornece uma imagem tridimensional ou topográfica da área inspecionada, exemplificada na Figura 9. Mostra a distribuição espacial das discontinuidades em um plano, com variação de cores ou tons conforme a amplitude dos ecos. É o método mais avançado, usado em controle de qualidade automatizado e mapeamento de grandes superfícies. Requer sistemas computadorizados e transdutores de varredura controlada.

Figura 9 – Imagem gerada pelo modo C-Scan



Fonte: ABENDI, Ensaio por Ultrassom, Apostila, Ed. Jun./2018.

Na Tabela 5 comparamos os três tipos de varredura do ensaio de Ultrassom.

Tabela 5 – Comparativo entre modos de apresentação e varredura de US

Modo	Dimensão	Tipo de informação	Aplicação típica
A-scan	1D	Amplitude x tempo	Medição de espessura e detecção pontual de falhas
B-scan	2D	Seção transversal	Visualização da profundidade e forma das discontinuidades
C-scan	3D	Mapeamento superficial	Inspeção detalhada e controle de qualidade automatizado

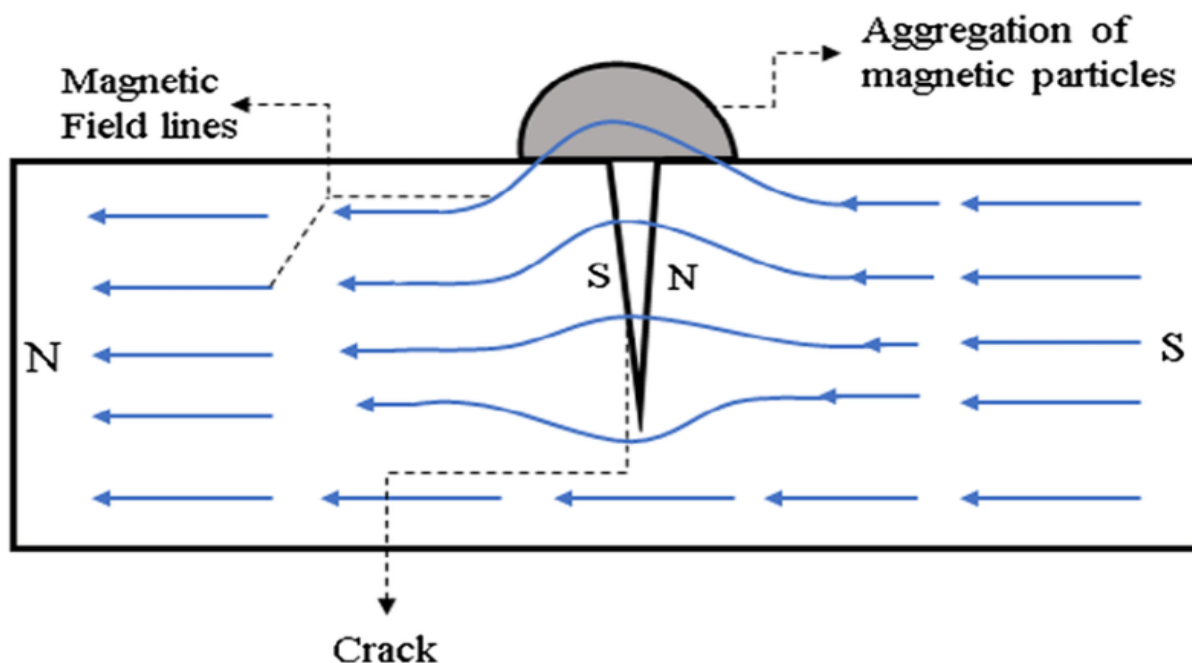
Fonte: Adaptado de ABNT NBR 15610 (2018) e SCHEMPP; PREUß; TRÖGER (2016).

2.4.3 Ensaio de Partículas Magnéticas

Princípio de detecção: Em uma superfície metálica ferrosa como aço e ferro fundido aplica-se um forte campo magnético e espalha-se certa quantidade de um pó de granulometria fina, a partícula magnética (PM), de material ferromagnético. De maneira visual, identifica-se ou não defeitos superficiais ou subsuperficiais na peça em inspeção. Na Figura 10 podemos ver o desvio nas linhas de magnetização

causado pela descontinuidade do material. Devido a este desvio, a região logo acima do defeito se magnetiza de maneira ligeiramente diferente do entorno, o que faz com que o pó magnético se concentre nesta região, revelando a descontinuidade oculta.

Figura 10- Princípio de detecção do ensaio PM



Fonte: Adaptado de WDB Group (2023)

Equipamentos e materiais: O ensaio é realizado com a utilização de equipamentos elétricos que geram o campo magnético necessário, o pó magnético de inspeção e acessórios para melhor visualização dos defeitos. Atualmente, os mais usados são: Eletroímã estacionário ou portátil (*Yoke*), gera o forte campo magnético na peça; Gaussímetro, medidor de intensidade e direção do campo magnético; Luminária natural ou UV, para melhor visualização de defeitos muito pequenos; Partículas Magnéticas, pó de óxidos de ferro (Fe_3O_4), com diâmetro variando entre $1\text{ }\mu\text{m}$ e $150\text{ }\mu\text{m}$, de geometria esférica ou irregular. Podem ter coloração preta, vermelha, amarela ou fluorescentes a depender da iluminação empregada. Pode ser apresentada como pó seco ou dispersão em óleo ou água mineral. Mais detalhes são apresentados na Tabela 6:

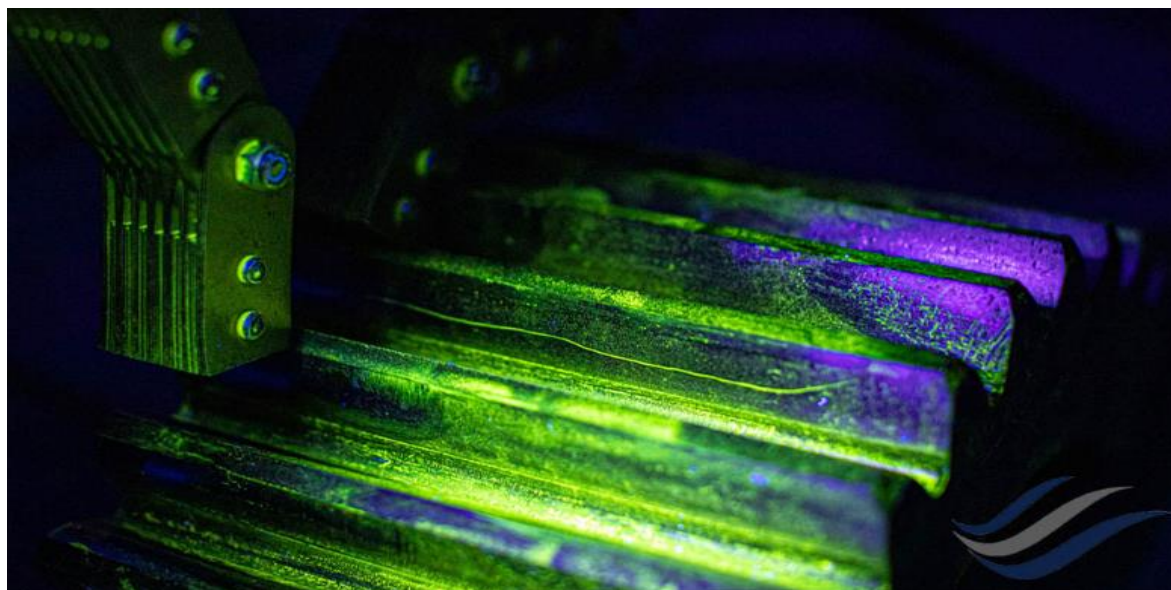
Tabela 6 – Tipos de partículas para ensaio PM

Tipo	Modo de aplicação	Ambiente de uso	Sensibilidade
Secas coloridas	Aplicadas por aspersão ou peneira	Campo aberto, peças grandes	Média
Fluorescentes líquidas	Aplicadas por spray ou imersão	Luz UV-A controlada	Alta
Pretas líquidas	Aplicadas por spray	Luz branca	Boa para inspeções gerais

Fonte: Adaptado de ABNT NBR 15238 (2018), ASTM E1444/E1444M (2023)

A Figura 11 exemplifica a aparência das partículas no ensaio, ressaltando o contraste com a peça metálica:

Figura 11 – Ensaio PM fluorescente de uma engrenagem sob luz UV



Fonte: UTDK Serviços Técnicos (2026).

Disponível em: <https://www.utdk.com.br/particula-magnetica-prod>

Procedimento de ensaio: Deve-se limpar a peça em inspeção, removendo óleos, graxas e quaisquer resíduos da superfície, em seguida magnetizar a peça com o Yoke, bobinas ou banco de ensaio no sentido em que se espera que haja trincas (longitudinal ou transversal ao eixo da peça). O campo deve ser orientado perpendicularmente ao eixo da peça para maximizar o vazamento de fluxo, conforme demonstrado na Figura 12. Aplica-se então as partículas sobre a superfície e com

ajuda da iluminação natural ou UV o inspetor, visualmente, analisa a área em busca de trincas, porosidades, descontinuidades e outros defeitos.

Figura 12 – Ensaio PM em união soldada de tubulação



Fonte: UTDK Serviços Técnicos (2026).

Disponível em: <https://www.utdk.com.br/particula-magnetica-prod>

Interpretação do ensaio e diagnóstico: Com base nos critérios de padrão de acumulação das partículas e do formato apresentado por elas, o inspetor avalia o resultado encontrado e dá seu parecer sobre a gravidade da falha encontrada. Após o encerramento, a peça é desmagnetizada e limpa de quaisquer resíduos.

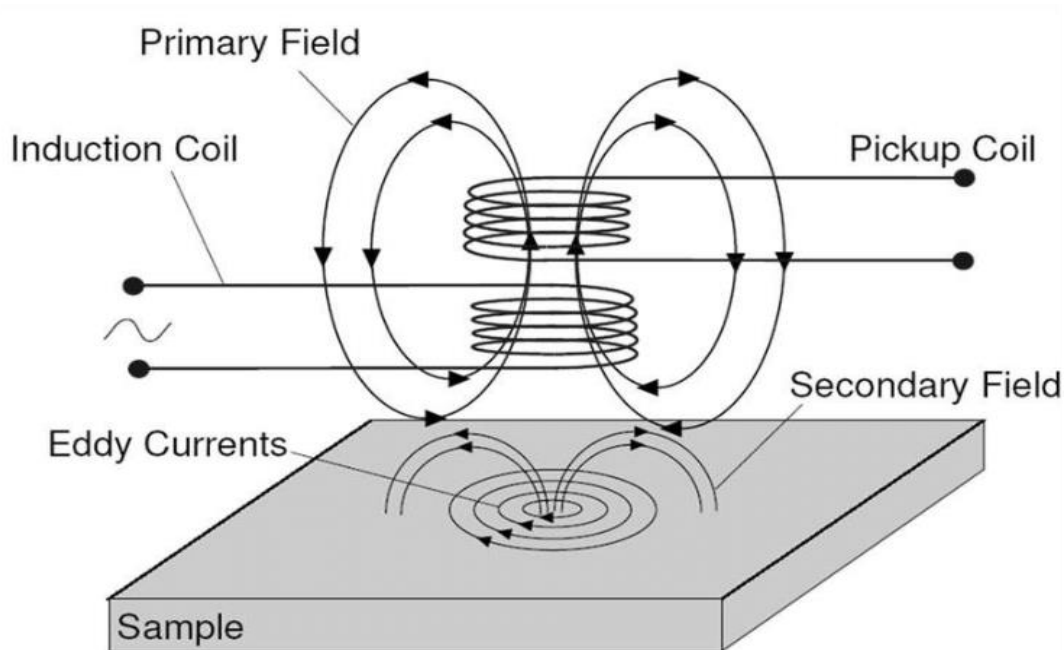
Uma desvantagem deste ensaio é a falta de registro permanente da inspeção. Deve-se fotografar ou marcar o local do defeito encontrado.

2.4.4 Ensaio de Correntes Parasitas (*Eddy-Current*)

Princípio de detecção: Devido ao fenômeno da indução eletromagnética é possível gerar, em um corpo metálico, uma corrente elétrica induzida por um campo eletromagnético externo, sem contato com o corpo. Esta corrente por sua vez cria um campo eletromagnético secundário que interage com o campo principal, afetando a sua intensidade e direção de uma maneira contínua e uniforme, demonstrado na

Figura 13. Porém, caso haja no corpo metálico analisado quaisquer discontinuidades, estas provocarão uma variação local no fluxo magnético em torno do defeito e, por consequência, uma variação também no campo magnético principal. Esta variação na intensidade do fluxo magnético é um indicativo de discontinuidades do material.

Figura 13 – Diagrama esquemático de um sistema de detecção de correntes parasitas



Fonte: Adaptado de MoviTherm (2022).

Disponível em: <https://movitherm.com/wp-content/uploads/2022/09/eddy-current.png>.

Equipamentos e materiais: Fonte de alimentação CA; Bobina de inspeção (*induction coil* ou *excitation coil*); bobina de detecção (*pick-up coil*); sonda de detecção (*Probe*) superficial, interna ou diferencial; analisador gráfico, padrões calibrados de referência com defeitos já conhecidos. Estes elementos (exceto os padrões calibrados) são agrupados num aparelho único e portátil chamado *Eddy-Current Tester* ou *Eddy-Current Analyzer*, facilitando a inspeção em campo com mais agilidade na preparação do ensaio e obtendo resultados mais confiáveis. Na Figura 14 podemos ver um destes aparelho em uso.

Figura 14 – Aparelho de ensaio de correntes parasitas (EDT ou EDA)



Fonte: Richconn. What Is Non-Destructive Testing: Methods, Applications and Benefits. Disponível em: <https://richconn.com/what-is-non-destructive-testing>. Acesso em: jul. 2026.

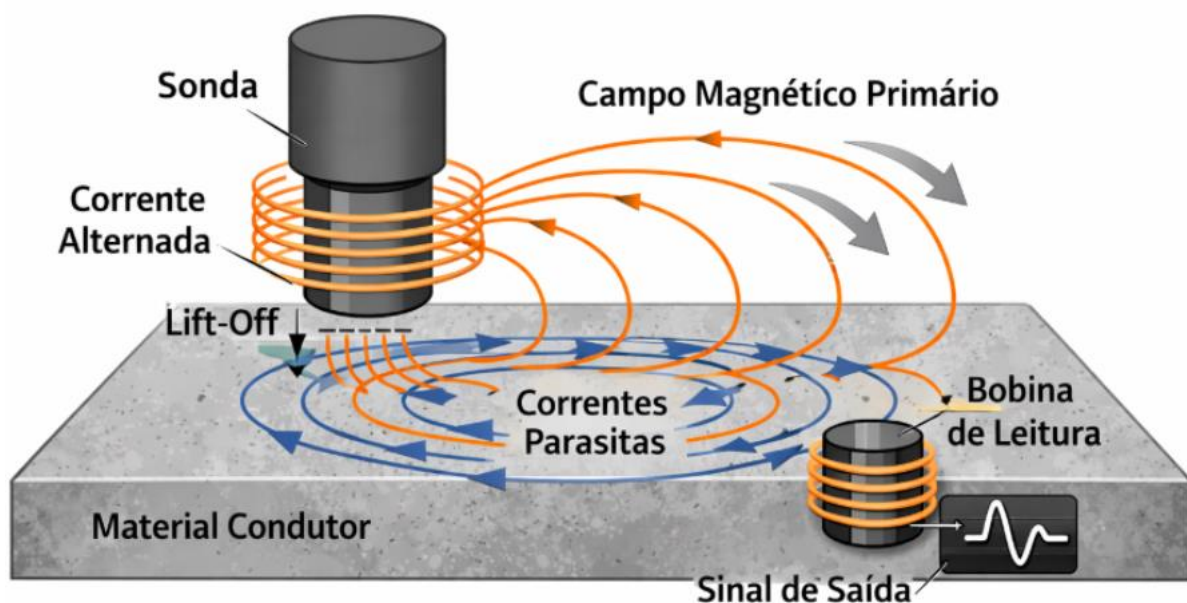
Sensores de Efeito Hall: O efeito Hall é o fenômeno físico em que surge uma diferença de potencial elétrico (tensão Hall) transversalmente a um condutor percorrido por corrente elétrica quando ele é submetido a um campo magnético perpendicular. Essa tensão é proporcional à intensidade do campo magnético e à densidade de corrente no material. Em alguns sistemas, o sensor Hall substitui ou complementa a bobina tradicional, oferecendo maior resolução espacial e resposta linear. A leitura direta do campo magnético via efeito Hall é menos sensível a variações de lift-off e ruído elétrico, aumentando a confiabilidade do diagnóstico.

Procedimento de ensaio: Primeiramente seleciona-se qual tipo de aparelho e sonda usar conforme a aplicação: Tipo superficial, para superfícies planas; tipo interna, para furos, tubos e superfícies curvas e tipo diferencial para detectar pequenas variações de material na peça. Parte-se então para o ensaio propriamente dito, limpando-se a superfície a analisar e aplicando o campo magnético via sonda próxima do corpo metálico. A sonda deve ser movimentada, manualmente, ao longo do comprimento e largura do corpo, perfazendo toda a superfície que se deseja

ensaiar, com velocidade constante e distância controlada (*lift-off*). Este espaçamento é crítico para um resultado correto da inspeção, variando entre 0,1 e 1mm. A Figura 15 ilustra este procedimento.

Ajuste da frequência: a frequência de excitação deve ser adequada à profundidade que se deseja inspecionar, sendo que frequências baixas penetram mais profundamente e frequências altas atingem apenas a superfície e a região logo abaixo a ela.

Figura 15 - Espaçamento entre a sonda e a peça no EDT



Fonte: Elaborado pelo autor (2026), adaptado de Abendi (2024).

Faixas de frequência e valores de campo magnético: As frequências mais comuns no ensaio de correntes parasitas variam entre 100 Hz e 10 MHz, dependendo da profundidade de inspeção e do tipo de material. Os valores de densidade de campo magnético são medidos em Tesla, unidade do Sistema Internacional (SI) e tipicamente oscilam entre 0,1 mT e 10 mT (Mili Tesla), sendo ajustados conforme a sensibilidade desejada e a condutividade da peça.

A frequência ideal é determinada pela relação entre a profundidade de penetração δ e a condutividade σ do material, dada pela Equação 3:

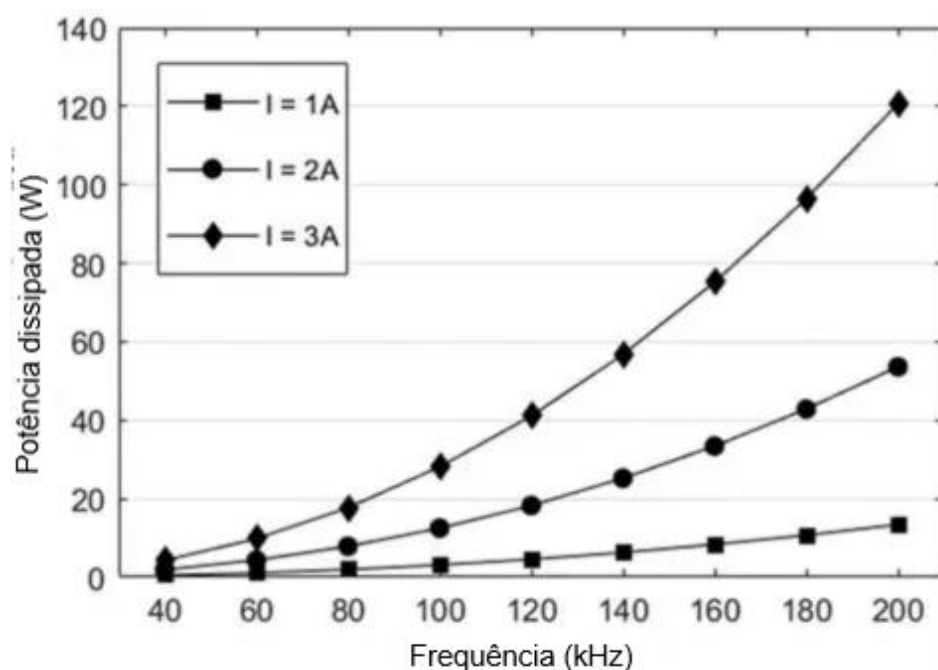
$$\delta = \frac{1}{\sqrt{2\omega \cdot \mu \cdot \sigma}} \quad [\text{Equação 3}]$$

onde $\omega=2\pi f$ é a frequência angular, μ a permeabilidade magnética e σ a condutividade elétrica. Frequências mais altas reduzem δ , tornando o ensaio mais sensível a defeitos superficiais.

Interpretação dos resultados e diagnóstico: De posse do resultado da inspeção, o gráfico gerado pelo aparelho, e comparando-o com os padrões já conhecidos o inspetor pode identificar as discontinuidades encontradas de acordo com os critérios abaixo:

Sinais simétricos e estáveis: indicam material homogêneo e livre de defeitos (Figura 16).

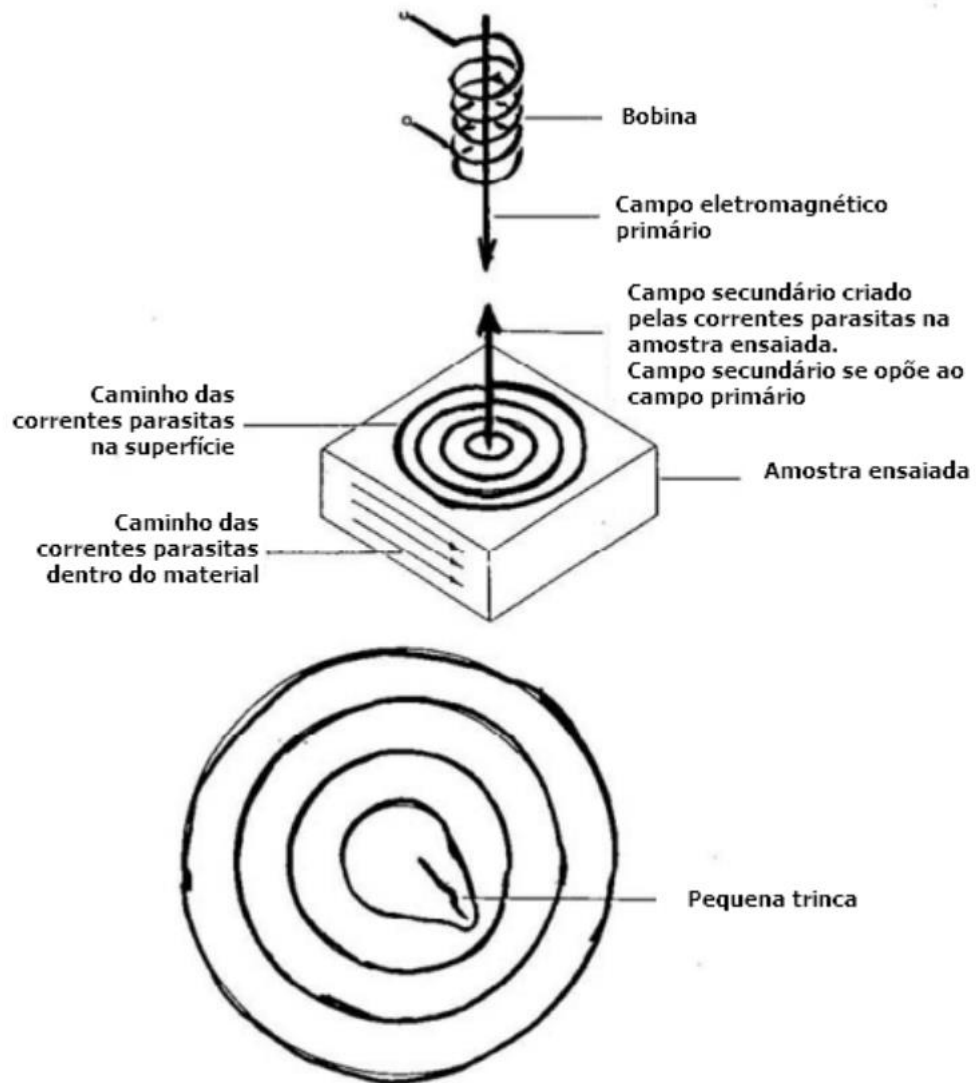
Figura 16 - Gráfico de frequência X potência dissipada num ensaio EDT



Fonte: Adaptado de McClanahan, J. et al. Advanced eddy current test signal analysis for steam generator tube defect classification and characterization. Semantic Scholar, 2020.**

Sinais abruptos ou assimétricos: sugerem trincas, corrosão localizada ou variações de espessura (Figura 17).

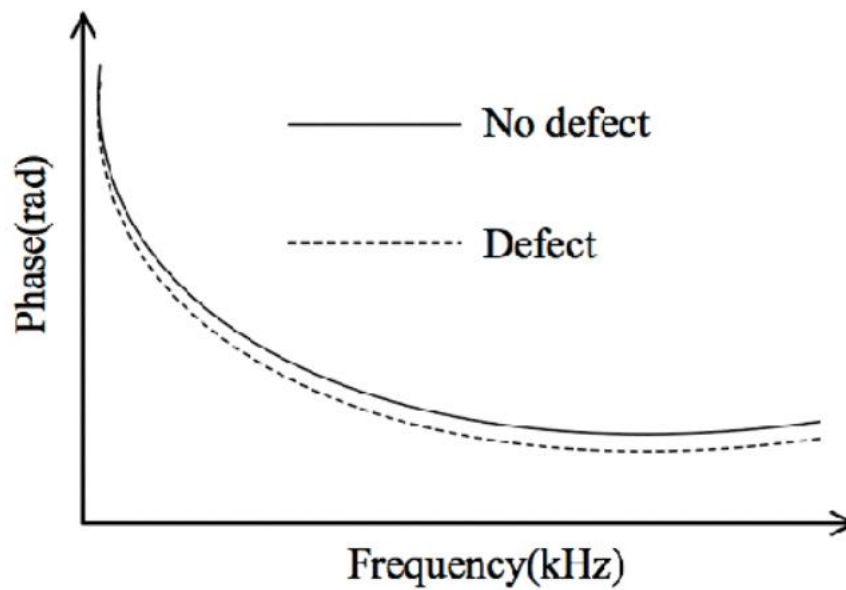
Figura 17 – Exemplo de defeito encontrado num ensaio EDT



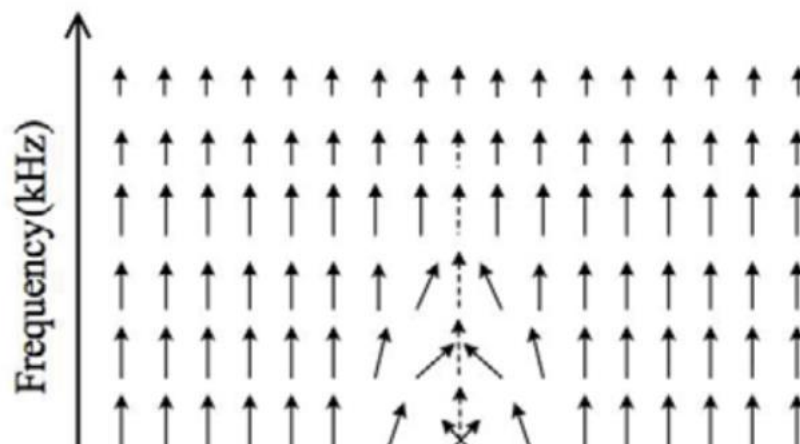
Fonte: IAEA – International Atomic Energy Agency. Training Course Series No. 3: Non-Destructive Testing: Eddy Current Testing Method, Vienna, 2000.

Alterações de fase: podem indicar mudanças na condutividade ou na permeabilidade magnética do material (Figura 18).

Figura 18 - Diferença de fase indicando defeito encontrado



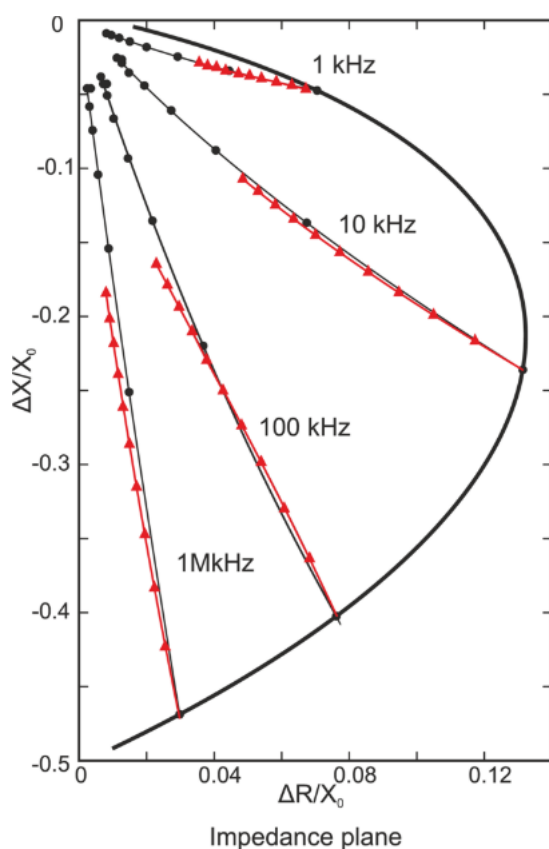
(a) Phase spectrum analysis method



Fonte: MA, X.; LI, Y. Eddy Current Phase Gradient and Its Identification of Conductive Material Defects. Semantic Scholar, 2020.

O diagnóstico final é realizado considerando a forma e amplitude do sinal, correlacionadas à profundidade e extensão da descontinuidade, e a localização da indicação, determinada pela posição da sonda e pela resposta do campo magnético. Uma trinca superficial causa uma defasagem maior entre os campos, enquanto uma variação de espessura altera principalmente a amplitude do sinal. Compara-se os resultados com padrões de calibração para validar se o sinal corresponde a uma falha real ou a uma variação de material (Figura 19).

Figura 19 - Interpretação do gráfico do ensaio EDT



Fonte: Adaptado de Sensors, v.11, n.3, p.2525, 2011.

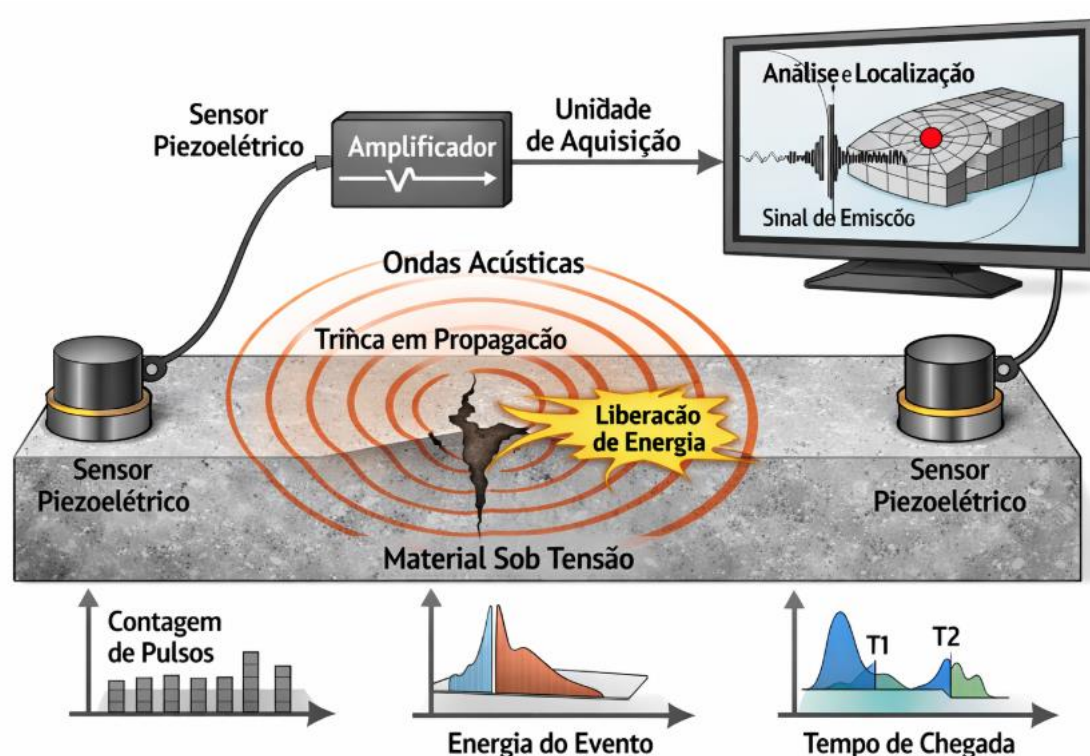
Disponível em: https://www.mdpi.com/sensors/sensors-11-02525/article_deploy/html/images/sensors-11-02525f11-1024.png.

Esse processo requer experiência do inspetor e calibração adequada do equipamento, garantindo que as indicações sejam corretamente interpretadas e classificadas conforme as normas técnicas.

2.4.5 Ensaio de Emissão Acústica

Princípio de detecção: É baseado na emissão de ondas sonoras quando o material é submetido a alguma solicitação ou esforço. Estas ondas têm um perfil característico que é modificado quando há alguma descontinuidade presente no corpo de prova.

Figura 20 – Diagrama esquemático de ensaio de emissão acústica



Fonte: Elaborado pelo autor (2026), adaptado de Knoeller & Ingold (2011).

Equipamentos e materiais: o equipamento principal do ensaio são os sensores piezoelétricos que captam as ondas geradas pela liberação de energia do material e a convertem em sinais elétricos que podem ser interpretados por um sistema de aquisição de dados e apresenta-os num *software* de análise específico para emissão acústica. A Tabela 7 apresenta os demais equipamentos segundo a NBR 16185:2013.

Tabela 7 – Equipamentos para ensaio EA

Item	Descrição
Sensores piezoelétricos	Captam as ondas acústicas geradas pela liberação de energia no material, convertendo vibrações mecânicas em sinais elétricos.
Amplificadores de sinal	Aumentam a amplitude dos sinais captados pelos sensores, melhorando a relação sinal/ruído e a precisão da leitura.
Unidade de aquisição de dados	Registra e digitaliza os sinais provenientes dos sensores para posterior análise e armazenamento.

Software de análise e localização	Processa os sinais, determina parâmetros como amplitude, energia e tempo de chegada, e localiza a origem dos eventos acústicos.
Corpos de prova ou estrutura em teste	Material ou componente sob tensão mecânica, onde ocorrem as emissões acústicas.
Cabos coaxiais e conectores	Transmitem os sinais dos sensores até o amplificador e a unidade de aquisição, minimizando interferências externas.
Material de acoplamento (gel ou graxa acústica)	Garante boa transmissão das ondas acústicas entre o sensor e a superfície da peça.
Sistema de sincronização e disparo	Controla o início e o tempo de aquisição dos sinais, especialmente em ensaios dinâmicos ou monitoramento contínuo.
Fontes de alimentação e calibração	Equipamentos auxiliares para energizar o sistema e verificar a resposta dos sensores antes do ensaio.

Fonte: Adaptado de ABNT NBR 16185:2013

Procedimento de ensaio: Inicialmente, realiza-se a preparação da superfície do corpo de prova, garantindo limpeza adequada e aplicação de material de acoplamento (gel acústico) para assegurar a transmissão eficiente das ondas elásticas. Em seguida, os sensores piezoelétricos são fixados nas posições previamente definidas, de modo a permitir a cobertura da região de interesse e a triangulação das fontes de emissão.

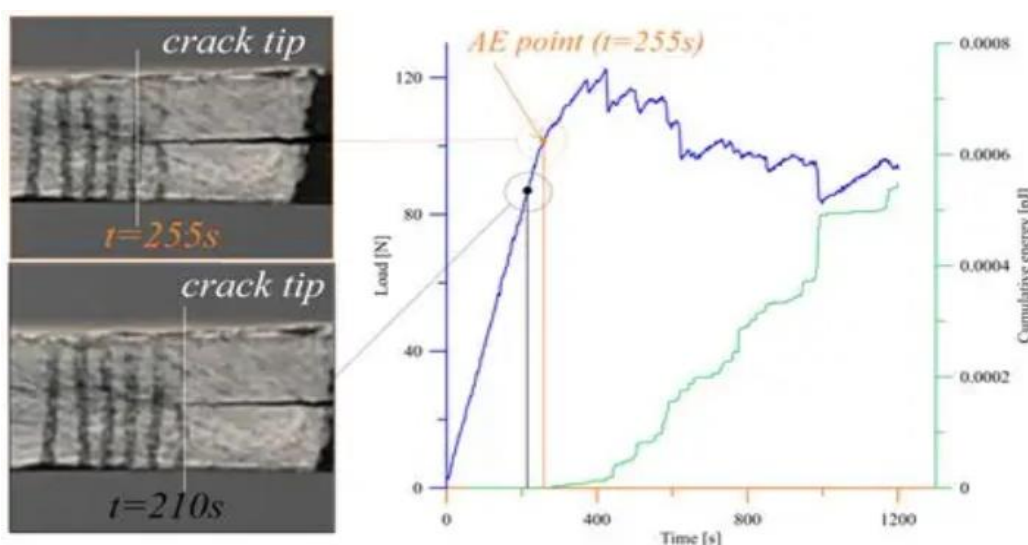
Em seguida é executada a calibração do aparelho segundo o método Hsu-Nielsen (reconhecido pela norma ASTM E976) que consiste em quebrar uma mina de grafite usada em lapiseiras comuns (0,3 a 0,7 mm) ligeiramente acima da face da peça, tipicamente a 3 mm da superfície, gerando uma onda acústica semelhante às emissões reais de trincas e defeitos internos. Esta calibração é importante para se evitar leituras incorretas e verificar o funcionamento dos transdutores. Após esta etapa, com o sistema calibrado, inicia-se a aplicação de carga mecânica sobre o corpo de prova (excitação).

Geralmente os ruídos são gerados por aplicação de sobrecarga, porém é possível também, com o uso de um martelo, dar leves pancadas no corpo de prova a fim de produzir uma vibração no mesmo, com intensidade suficiente para que possa ser captada pelos transdutores.

Análise e interpretação dos resultados: Os sinais captados são filtrados e tratados pelo software de análise que plota o gráfico com os parâmetros

características das emissões como amplitude, energia, duração, tempo de chegada e frequência. Durante o ensaio, cada incremento de carga induz micro processos internos, como nucleação de trincas, deslizamento de discordâncias e delaminações, que liberam energia na forma de ondas acústicas. Essas ondas são captadas pelos sensores piezoelétricos e transmitidas à unidade de aquisição, onde são registradas em tempo real, conforme a Figura 21.

Figura 21 – Exemplo de gráfico gerado no ensaio de EA



Fonte: Bing Images. Disponível em

<<https://tse3.mm.bing.net/th/id/OIP.Av9pOuJCq3xNt6gLViQHaeER>>. Acesso em: 18 jun. 2026

Na Figura 21 podemos ver à esquerda, fotografia do corpo de prova em diferentes instantes de carregamento ($t = 210$ s e $t = 255$ s), evidenciando o avanço da trinca. À direita, gráfico de carga versus tempo e energia acumulada de emissão acústica, indicando o ponto de ocorrência do evento acústico principal (AE point).

3 METODOLOGIA

O método utilizado para elaboração deste trabalho foi o de revisão bibliográfica, na qual foram utilizadas pesquisas na internet através do computador e livros relacionados ao tema. A organização deste trabalho se baseou em pesquisas relacionadas ao tema de Ensaaios Não-Destrutivos através da plataforma Google Acadêmico e acesso ao acervo de diversas bibliotecas, incluindo o acervo do IFMG Campus Betim.

As fontes consultadas são, entre outras, artigos acadêmicos, literatura técnica, imprensa especializada, manuais, normas técnicas de associações nacionais e internacionais e notas técnicas de fabricantes.

Foram também utilizados recursos de IA (Inteligência Artificial) como ferramentas on-line gratuitas para geração de imagens e pequenos textos explicativos.

3.1 Método PRISMA

Na elaboração deste trabalho foi utilizado o método PRISMA (*Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses*), cuja finalidade é assegurar o rigor metodológico das revisões bibliográficas, mantendo a organização e a padronização.

O método se baseia em quatro etapas, resumidas na Figura 22: Identificação, Triagem, Elegibilidade e Inclusão. A identificação é a busca ampla e generalista dos dados em fontes consagradas como literatura técnica, revistas especializadas e artigos acadêmicos, visando reunir o maior conteúdo possível sobre o tema. Em seguida, na etapa de triagem, são filtradas as informações em duplicidade e as que têm pouca correlação com o tema específico. Após esta depuração das fontes, na etapa de elegibilidade, o material coletado é avaliado com maior profundidade, verificando-se a adequação aos critérios do trabalho, eliminando aqueles que não atendem a estes requisitos e por fim, na inclusão, os estudos que serão efetivamente analisados são listados e organizados num fluxograma de seleção.

Figura 22 – Etapas do método PRISMA



Fonte: Elaborado pelo autor (2026)

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Limitações e Problemas

Apesar da relevância dos métodos demonstrados, os ensaios não-destrutivos possuem limitações que impedem seu uso de forma mais abrangente, seja por questões técnicas, de segurança, de material, de espaço ou mesmo de custo e treinamento dos operadores.

4.1.1 Custos de implantação e operação

Os valores financeiros investidos pela empresa que deseja adquirir um sistema de detecção de defeitos são um dos maiores impeditivos da adoção ampla dos END. Por vezes, este custo é tão alto que é necessário recorrer a linhas de financiamentos subsidiado (p.ex.: BNDES, FINAME, FINEP, Nova Indústria Brasil-NIB etc.). Dificilmente, empresas de pequeno ou mesmo médio porte conseguem acesso à estas benesses, devido às exigências institucionais e garantias bancárias.

Na Tabela 8, veremos estimativas de custos para aquisição e operação dos métodos de detecção:

Radiografia Industrial (Tabela 8):

Tabela 8 - Preços de equipamentos para ensaio de Radiografia Industrial

Tipo de equipamento	Faixa de preço (R\$)	Observações
Fonte de radiação (raios X ou gama)	50 000 – 300 000	Equipamentos de raios X industriais de alta potência ou fontes gama (Ir-192, Co-60) com blindagem e controle remoto.
Sistema de detecção (filme ou digital)	500 – 25.000	Detectores digitais (painéis de silício amorfo) são mais caros, mas reduzem custos e tempo de exposição.
Colimadores e sistemas de posicionamento	4.000 – 20.000	Inclui suportes, guias e mecanismos de ajuste para controle da direção do feixe.
Sistema de controle e software de aquisição	5.000 – 25.000	Softwares de reconstrução de imagem, calibração e análise automatizada.

Blindagem e infraestrutura (câmara de ensaio)	20 000 – 400 000	Estruturas de concreto ou chumbo para contenção da radiação, exigidas por normas da CNEN.
Equipamentos de proteção e dosimetria	10 000 – 30 000	Dosímetros pessoais, detectores de vazamento e barreiras móveis.

Fonte: Coletado pelo autor (julho de 2026)

Custos adicionais: Licenciamento e segurança radiológica: cerca de R\$ 20 000 – 50 000 para adequação às normas da CNEN NN 3.01 e treinamento de operadores; Manutenção anual: entre 5 % e 10 % do valor do equipamento e Treinamento técnico: cursos de qualificação em radiografia industrial custam R\$ 5 000 – 15 000 por profissional.

Em resumo, o custo de implantação e operação varia entre R\$ 100.000 para instalações menores, com uso de radiação gama, até acima de R\$ 800.000 para sistemas sofisticados com uso de raios-x.

Ultrassonografia Industrial (Tabela 9):

Tabela 9 - Preços de equipamentos para ensaio US

Tipo de equipamento	Faixa de preço (R\$)	Observações
Gerador de pulsos ultrassônicos / Aparelho de ultrassom industrial	1.500-5.000 (portátil)	Equipamentos portáteis ou estacionários com múltiplos canais, usados para inspeção de soldas, chapas e componentes metálicos.
Transdutores (sondas piezoelétricas)	200– 500 (cada)	Variedade de sondas de contato, imersão, angulares e phased array; custo depende da frequência e do tipo de acoplamento.
Sistema phased array / TOFD (Time of Flight Diffraction)	90.000 – 200.000	Tecnologia avançada para mapeamento tridimensional de defeitos internos; usada em inspeções críticas.
Tanque de imersão e acessórios de acoplamento	2.000 – 6.000	Utilizados em ensaios de alta precisão em peças pequenas ou complexas.

Equipamentos de calibração e padrões de referência	5 000 – 25 000	Blocos padrão ASTM e ISO para calibração de sensibilidade e resolução.
---	----------------	--

Fonte: Coletado pelo autor (julho de 2026)

Custos adicionais: Treinamento técnico e certificação (Nível II ou III em ultrassom industrial): R\$ 5 000 – 20 000 por profissional; Manutenção anual: cerca de 5 % a 10 % do valor total dos equipamentos; Infraestrutura e segurança: R\$ 5.000 – 20 000 para adequação de bancada, isolamento acústico e controle ambiental.

Em resumo, o investimento inicial em um sistema completo de ultrassonografia industrial varia entre R\$ 20 mil e R\$ 250 mil, dependendo da tecnologia (convencional, *phased array* ou TOFD) e do nível de automação desejado.

Ensaio de Partículas Magnéticas (Tabela 10):

Tabela 10 - Preços de equipamentos para ensaio PM

Tipo de equipamento	Faixa de preço (R\$)	Observações
Fonte de magnetização (yoke eletromagnético ou bobina)	3.500 – 8.000	Equipamentos portáteis ou estacionários para magnetização longitudinal ou circular; custo depende da potência e do tipo de corrente (CA ou CC).
Fonte de corrente contínua de alta intensidade	40 000 – 150 000	Utilizada em sistemas estacionários para inspeção de peças grandes ou ferromagnéticas espessas.
Tanque ou bancada de ensaio estacionária	80 000 – 250 000	Estrutura completa com sistema de magnetização, aplicação de partículas e lavagem; usada em inspeções seriadas.
Sistema de aplicação de partículas magnéticas (via úmida ou seca)	5 000 – 30 000	Inclui bombas, reservatórios e dispositivos de pulverização; custo varia conforme o tipo de

		partícula e o método de aplicação.
Partículas magnéticas fluorescentes ou visíveis	300 – 2.000 (por lote)	Consumíveis utilizados na inspeção; fluorescentes exigem iluminação UV.
Iluminação ultravioleta (lâmpadas UV-A)	200 – 5.000	Necessária para inspeções com partículas fluorescentes; deve atender à norma ASTM E1444.
Equipamentos auxiliares (medidores de campo, gaussímetros, padrões de calibração)	5 000 – 20 000	Usados para verificação da intensidade de campo e calibração do sistema.

Fonte: Coletado pelo autor (julho de 2026)

Custos adicionais: Treinamento técnico e certificação (Nível II ou III em partículas magnéticas): R\$ 5 000 – 15 000 por profissional. Manutenção anual: cerca de 5 % a 8 % do valor total dos equipamentos. Infraestrutura e segurança: R\$ 5.000 – 10.000 para adequação elétrica, ventilação e controle ambiental.

Em resumo, o custo inicial em um sistema completo de ensaio por partículas magnéticas varia entre R\$ 15 mil e R\$ 400 mil, dependendo do tipo de magnetização (manual ou estacionária) e do nível de automação.

Ensaio de Correntes Parasitas (Tabela 11):

Tabela 11 - Preços de equipamentos para ECT

Tipo de equipamento	Faixa de preço (R\$)	Observações
Unidade de controle / gerador de corrente alternada	5.000 – 25.000	Equipamentos portáteis ou estacionários com múltiplos canais e ajuste de frequência; usados para inspeção de metais condutores.
Sondas de correntes parasitas (bobinas e sensores)	2 000 – 20 000 (cada)	Variedade de sondas de superfície, internas e diferenciais; custo depende da frequência e geometria da peça.
Sistema de varredura automatizado (scanner)	30 000 – 120 000	Permite inspeções repetitivas e mapeamento de grandes áreas com precisão.

Padrões de calibração e blocos de referência	1. 000 – 15.000	Usados para ajuste de sensibilidade e verificação da resposta do sistema conforme normas ASTM E215 e ISO 15548.
Sistema de posicionamento e suporte mecânico	10 000 – 40 000	Estruturas para fixação das sondas e controle de deslocamento durante o ensaio.

Fonte: Coletado pelo autor (julho de 2026)

Custos adicionais: Treinamento técnico e certificação (Nível II ou III em ECT): R\$ 5 000 – 15 000 por profissional; Manutenção anual: cerca de 5 % a 8 % do valor total dos equipamentos; Infraestrutura e segurança: R\$ 10 000 – 20 000 para adequação elétrica, bancada e controle ambiental.

Em resumo, o investimento inicial em um sistema completo de ensaio por correntes parasitas varia entre R\$ 25 mil e R\$ 150 mil, dependendo do número de canais, da automação e da precisão requerida.

Ensaio de Emissão Acústica (Tabela 12):

Tabela 12 - Preços de equipamentos para ensaio EA

Tipo de equipamento	Faixa de preço (R\$)	Observações
Sistema de aquisição multicanal (hardware principal)	50.000 – 300 000	Equipamentos com 4 a 16 canais, alta taxa de amostragem e filtros digitais; usados para monitoramento de estruturas metálicas e compósitos.
Sensores piezoelétricos de emissão acústica	2 000 – 10 000 (cada)	Sensores de alta sensibilidade, geralmente de banda larga; o custo depende da frequência e do tipo de acoplamento.
Pré-amplificadores e cabos coaxiais blindados	1 000 – 5 000 (por canal)	Necessários para amplificação e transmissão de sinais sem ruído.
Sistema de calibração (Hsu-Nielsen ou simulador de fontes)	5 000 – 20 000	Usado para verificação da sensibilidade e resposta dos sensores.
Sistema de sincronização e controle de carga (para ensaios mecânicos)	20 000 – 80 000	Integração com máquinas de ensaio para correlacionar carga e sinal acústico.

Acessórios de acoplamento e fixação	2 000 – 10 000	Inclui pastas condutoras, suportes e dispositivos de fixação dos sensores.
--	----------------	--

Fonte: Coletado pelo autor (julho de 2026)

Custos adicionais: Treinamento técnico e certificação (Nível II ou III em EA): R\$ 5 000 – 15 000 por profissional; Manutenção anual: cerca de 5 % a 8 % do valor total dos equipamentos; Infraestrutura e segurança: R\$ 5.000 – 20.000 para adequação elétrica, isolamento acústico e controle ambiental.

Em resumo, o investimento inicial em um sistema completo de emissão acústica varia entre R\$ 80 mil e R\$ 400 mil, dependendo do número de canais, da sensibilidade dos sensores e do nível de automação.

Síntese de custos e limitações dos métodos (Tabela 13):

Tabela 13 – Comparativo técnico-econômico entre métodos END

Método de ensaio	Faixa de investimento inicial (R\$)	Aplicações típicas	Vantagens	Limitações técnicas
Radiografia industrial	100 000 – 800 000	Inspeção de soldas, fundidos, tubulações e componentes espessos.	Permite visualização direta de defeitos internos; alta precisão; registro permanente da imagem.	Envolve radiação ionizante; alto custo de infraestrutura e licenciamento; tempo de exposição elevado.
US industrial	20 000 – 250.000	Detecção de trincas internas, inclusões e descontinuidades em metais e compósitos.	Alta sensibilidade; resultados imediatos; não utiliza radiação; aplicável em diversas geometrias.	Exige operador qualificado; sensível ao acoplamento e à geometria da peça.
Partículas magnéticas	15.000 – 200.000	Inspeção superficial e subsuperficial de materiais	Método rápido e de baixo custo; alta eficiência para	Limitado a materiais ferromagnéticos;

		ferromagnéticos (soldas,eixos, engrenagens).	defeitos superficiais; fácil interpretação.	não detecta defeitos profundos; requer limpeza e preparação da superfície.
Correntes parasitas (Eddy Current)	25.000 – 150.000	Inspeção de superfícies condutoras, detecção de trincas, corrosão e variação de espessura.	Alta resolução para defeitos superficiais; aplicável a materiais não ferromagnéticos; não requer acoplamento.	Limitado à profundidade de penetração; sensível à condutividade e geometria; exige calibração precisa.
Emissão acústica	80.000 – 400.000	Monitoramento estrutural, detecção de trincas em crescimento e análise de fadiga.	Permite detecção precoce de falhas; monitoramento em tempo real; método não invasivo.	Difícil interpretação dos sinais; dependência da propagação das ondas e do acoplamento dos sensores.

Fonte: Coletado pelo autor (julho de 2026)

Nota sobre a tomada de preços: Os valores exibidos neste trabalho foram coletados no mercado da Região Metropolitana de Belo Horizonte – MG no período entre junho e julho de 2026 através de pesquisa na internet e contatos telefônicos. Foram consultados os estabelecimentos comerciais especializados em máquinas e equipamentos para ensaios mecânicos e indústria em geral. Considerou-se os preços praticados para equipamentos comuns e de uso geral.

Alternativas possíveis: No caso de ensaios pontuais e/ou esporádicos é possível alugar os equipamentos ou contratar mão-de-obra especializada por tempo pré-determinado. Outra opção é terceirizar completamente o serviço de inspeção, porém esta decisão depende de análise de viabilidade econômico-financeira que não faz parte do escopo deste trabalho.

4.1.2 Dificuldades Operacionais e qualificação da mão de obra

Cada método possui limitações e complexidades específicas, seja por questões de segurança ou de aplicabilidade restrita a materiais de grande porte ou que sejam ferromagnéticos ou condutores de eletricidade.

No caso da Radiografia Industrial existe ainda um agravante de complexidade que é o licenciamento obrigatório pelo Poder Público, visto que a energia nuclear é altamente regulada. Há também questões trabalhistas (adicional de insalubridade, férias diferenciadas etc.) e de saúde ocupacional que tornam essa opção ainda mais restritiva.

Treinamento e Qualificação: No Brasil, diversas entidades oferecem cursos de capacitação em END's. Entre as mais conceituadas estão: ABENDI, SENAI, CNEN, Petrobras/CENPES, alguns IF's e Universidades Federais. Em geral, a duração dos cursos varia entre 40 e 80h no nível básico até 250h no nível avançado. A formação completa de um inspetor pode levar até 440h de treinamento e é necessário que o aluno tenha conhecimento prévio e curso técnico ou profissionalizante.

A escolha de uma instituição de boa reputação é de extrema importância já que todo o processo de detecção recai sobre a habilidade do inspetor. É praxe de algumas empresas exigir certificação de instituições como ABENDI e Petrobrás. De nada adiantaria uma sofisticada instalação de ensaio se o profissional dedicado não souber interpretar os resultados, ou pior, dar um diagnóstico equivocado.

4.2 Proposta de Critério de Escolha

A seguir, apresentaremos duas propostas de critério de escolha: por simplicidade e rapidez, dando ênfase na detecção de defeitos mais pronunciados e por tipo de produto e cliente, focando na inspeção mais refinada para produtos mais nobres e clientes com exigências mais rígidas.

4.2.1 Determinação por simplicidade e rapidez

O ensaio de partículas magnéticas PM e o ensaio de correntes parasitas ECT são os mais simples e baratos métodos para materiais metálicos.

Dado que a maior parte dos produtos metalúrgicos padronizados são de aço ou ferro fundido, além de que as espessuras dificilmente ultrapassam 6,0mm,

estes dois métodos se mostram mais adequados devido ao alto volume e em conjunto com ensaios preliminares (Inspeção Visual e Líquido Penetrante) e a experiência do inspetor oferecem uma capacidade de detecção satisfatória.

Entretanto, os ensaios PM e ECT não são adequados para materiais de espessuras acima de 3,0mm pois a profundidade de detecção é baixa, limitada a defeitos subsuperficiais apenas. Neste caso se houver uma descontinuidade abaixo do nível máximo de detecção a mesma não será revelada. Uma alternativa é inspecionar, se houver acesso, a superfície oposta para garantir que toda a espessura da peça foi verificada. Especificamente para o ensaio PM o corpo de prova deve ser de material ferromagnético, sendo ineficaz para outros metais como Alumínio, Cobre, Bronze, Latão etc.

4.2.2 Determinação por tipo de produto e cliente

Para aplicações críticas e clientes cujas exigências de qualidade sejam acima do padrão de mercado as opções de métodos são a Radiografia, o ensaio US e o ensaio EA.

Considerando o porte das peças em análise, o ensaio EA é o mais indicado para estruturas grandes e fixas ou com mobilidade limitada como pontes, pórticos e afins. O monitoramento em tempo real e a maior profundidade de detecção justificam o alto custo de aquisição e operação.

O ensaio de Radiografia Industrial é o mais indicado para detecção de defeitos volumétricos em peças que cumpram função crítica no processo industrial. Peças que serão submetidas à alta pressão e temperatura, alto carregamento, ambiente corrosivo e demais condições adversas demandam maior uniformidade material, ausência de inclusões, porosidades e demais descontinuidades que fragilizam o maciço metálico e levam a quebras prematuras. Peças fundidas e chapas soldadas são exemplos de elementos típicos deste ensaio. A segurança operacional necessária é um fator limitante à adoção mais abrangente da radiografia devido ao risco de contaminação e exposição à radiação ionizante.

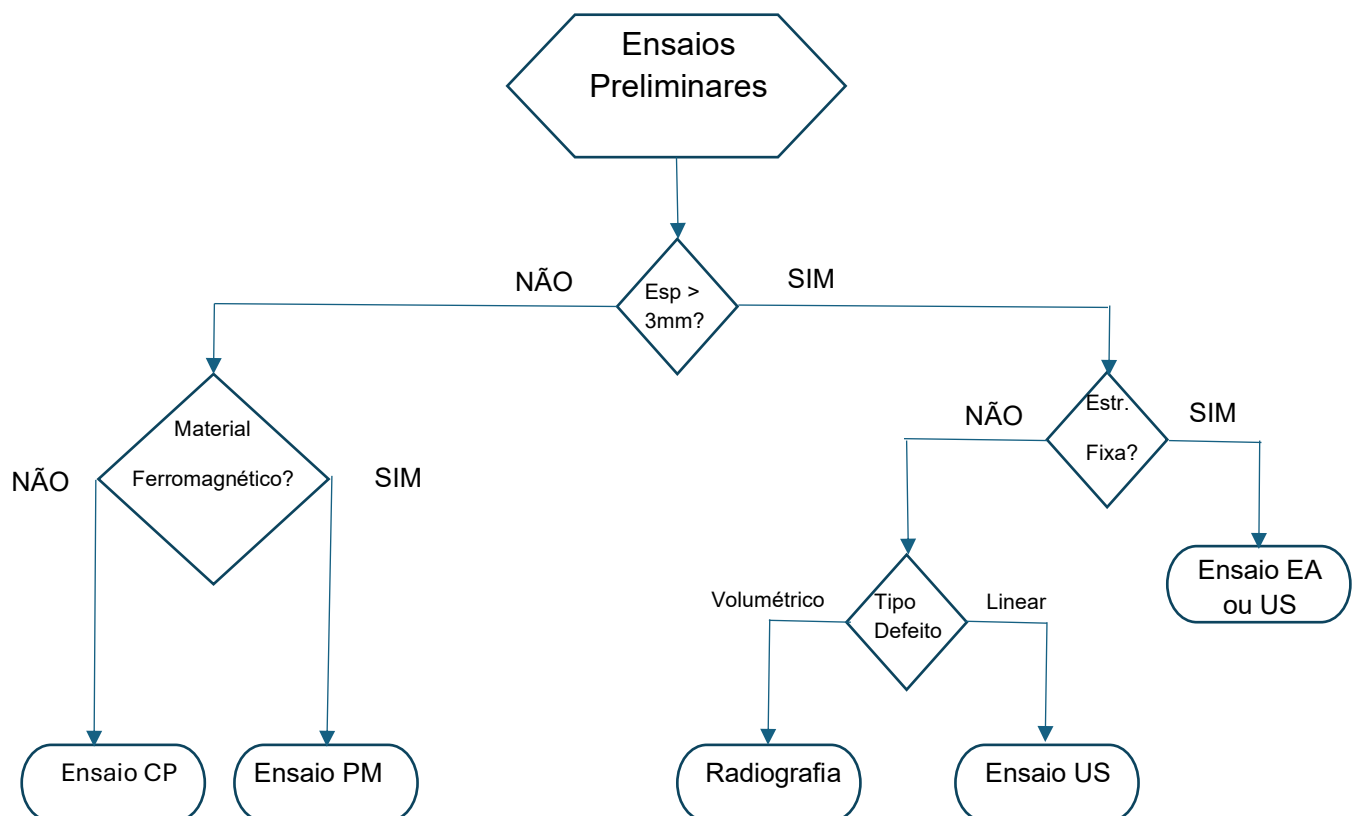
Já o ensaio US se mostra o de melhor custo-benefício para detecção de defeitos lineares em materiais metálicos e alguns não-metálicos, com profundidade de detecção acima de 10mm, portabilidade do sistema completo podendo ser usado em campo e aplicabilidade em geometrias complexas. Menos dispendioso que a

radiografia e a emissão acústica, o aparelho de US é mais compacto e leve, ideal para ensaios realizados em sequência. Contudo, a confiabilidade do resultado depende fortemente da habilidade e experiência do inspetor que deve saber posicionar os sensores de modo a captar corretamente a onda sonora refletida, filtrar os ruídos ambientais e vibrações que interferem na análise, descartando leituras incorretas antes de dar o diagnóstico.

4.2.3 Fluxograma de Decisão

Na Figura 23 está esquematizado um fluxograma de decisão com base nos critérios estabelecidos neste trabalho.

Figura 23 – Fluxograma de decisão



Fonte: Elaborado pelo autor (2026)

5 CONCLUSÃO

Neste trabalho procurou-se mostrar a importância dos ensaios não destrutivos (END) como ferramentas essenciais para garantir a integridade estrutural e a confiabilidade dos materiais e componentes industriais metálicos. A análise comparativa demonstrou que cada método possui vantagens específicas, limitações técnicas e custos distintos, sendo aplicáveis conforme o tipo de material e a criticidade da inspeção. Observou-se que técnicas mais sofisticadas, como a radiografia, a ultrassonografia avançada e a emissão acústica, são amplamente utilizadas em setores estratégicos, como aeronáutico, petroquímico e nuclear, enquanto métodos como partículas magnéticas e correntes parasitas se destacam em inspeções superficiais e manutenção preventiva.

Salientamos o caráter complementar dos END's e a necessidade de qualificação do inspetor. A garantia de detecção de não-conformidades nos materiais está na combinação adequada dos ensaios e na habilidade e experiência do executante da inspeção.

Conclui-se, portanto, que a escolha adequada do END depende da combinação entre requisitos técnicos, profundidade de detecção e viabilidade econômica, reforçando a necessidade de capacitação contínua dos profissionais e da adoção de tecnologias avançadas para atender às demandas crescentes da indústria moderna.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABENDI. *Ensaio por ultrassom*. São Paulo: ABENDI, jun. 2018. Disponível em: <<https://www.abendi.org.br>>. Acesso em: 23 jun. 2026.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 6023: Informação e documentação – Referências – Elaboração*. Rio de Janeiro, 2018.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR NM ISO 9712: Ensaios não destrutivos – Qualificação e certificação de pessoal END*. Rio de Janeiro, 2012.

ASTM INTERNATIONAL. *ASTM E1444/E1444M: Standard Practice for Magnetic Particle Testing*. West Conshohocken, 2021.

ASTM INTERNATIONAL. *ASTM E215: Standard Practice for Eddy Current Examination of Welds*. West Conshohocken, 2020.

CNEN – COMISSÃO NACIONAL DE ENERGIA NUCLEAR. *Radioproteção e segurança em radiografia industrial*. Rio de Janeiro, 2022.

IAEA – INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. *Training Course Series No. 3: Non-Destructive Testing: Eddy Current Testing Method*. Vienna: IAEA, 2000.

PEREIRA, Maria; COSTA, Ana. *Aplicações da ultrassonografia industrial*. Revista Brasileira de Engenharia Mecânica, v. 42, n. 3, p. 55–68, 2021.

KOTLER, Philip; KELLER, Kevin Lane. *Administração de marketing*. 14. ed. São Paulo: Pearson Education do Brasil, 2012.

SENAI. *Cursos de qualificação em ensaios não destrutivos*. Disponível em: <<https://www.portaldaindustria.com.br/senai>>. Acesso em: 23 jun. 2026.

SILVA, João. *Ensaios não destrutivos: fundamentos e aplicações*. 2. ed. São Paulo: Blucher, 2020.