

ANÁLISE COMPARATIVA DAS TÉCNICAS DE INSPEÇÃO VISUAL, LÍQUIDO PENETRANTE, PARTÍCULAS MAGNÉTICAS E ULTRASSOM APLICADAS À AVALIAÇÃO DE JUNTAS SOLDADAS

COMPARATIVE ANALYSIS OF VISUAL INSPECTION, LIQUID PENETRANT, MAGNETIC PARTICLE, AND ULTRASONIC TESTING TECHNIQUES APPLIED TO THE EVALUATION OF WELDED JOINTS

MEDEIROS, Ronaldo Gomes de Castro¹
MENEZES JUNIOR, André Ferreira de²
DIAS, Douglas Simplicio³
FERREIRA, Fabiano⁴

RESUMO: A aplicação de ensaios não destrutivos (END) na inspeção de juntas soldadas tornou-se fundamental para garantir a integridade estrutural de componentes metálicos, especialmente em contextos de alta responsabilidade técnica. Diante disso, este estudo tem como objetivo realizar uma análise comparativa entre os principais métodos de END, inspeção visual, líquido penetrante, partículas magnéticas e ultrassom, com foco na eficácia do ensaio ultrassônico na detecção de descontinuidades internas, como trincas e falta de fusão. A metodologia adotada consistiu em uma revisão bibliográfica de caráter técnico-científico, com base em artigos, normas e estudos experimentais relevantes. Os resultados obtidos indicam que, enquanto os métodos de inspeção superficial são eficazes na identificação de falhas abertas, o ultrassom demonstrou maior sensibilidade, profundidade de penetração e precisão na identificação de defeitos volumétricos. A análise evidenciou que a escolha do método mais adequado deve considerar variáveis como o tipo de defeito, o material inspecionado, a geometria da peça e as condições operacionais envolvidas. Conclui-se que o ensaio ultrassônico se destaca como o método mais completo para inspeções estruturais em soldas, desde que executado por profissionais qualificados e com os recursos técnicos apropriados.

Palavras-chave: ensaios não destrutivos; inspeção por ultrassom; soldagem; descontinuidades internas; controle de qualidade.

ABSTRACT: The application of non-destructive testing (NDT) in the inspection of welded joints has become essential to ensure the structural integrity of metallic components, particularly in contexts that demand high technical reliability. In this regard, the present study aims to conduct a comparative analysis of the main NDT methods, visual inspection, liquid penetrant, magnetic particle, and ultrasonic testing, with a focus on the effectiveness of ultrasonic testing in detecting internal discontinuities such as cracks and lack of fusion. The adopted methodology consisted of a technical-scientific literature review, based on relevant articles, standards, and experimental studies. The results indicate that while surface inspection methods are effective in identifying open flaws, ultrasonic testing has demonstrated greater sensitivity, penetration depth, and accuracy in detecting volumetric defects. The analysis showed that the selection of the most appropriate method must take into account variables such as the type of defect, the inspected

¹ Doutorado em Engenharia Química, de Materiais e Processos Ambientais pela Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro (PUC-Rio). Professor auxiliar no Centro Universitário Augusto Motta (UNISUAM) - ronaldomedeiros@souunisuam.com.br

² Graduando em Engenharia Mecânica – Universidade Augusto Motta (UNISUAM) – andrefmenezes@souunisuam.com.br

³ Graduando em Engenharia Mecânica – Universidade Augusto Motta (UNISUAM) – douglassimplicio07@gmail.com

⁴ Graduando em Engenharia Mecânica – Universidade Augusto Motta (UNISUAM) – fabiano.ferreira@souunisuam.com.br

material, the geometry of the part, and the operational conditions. It is concluded that ultrasonic testing stands out as the most comprehensive method for structural weld inspections, provided it is performed by qualified professionals with appropriate technical resources.

Keywords: non-destructive testing; ultrasonic inspection; welding; internal discontinuities; quality control.

1. INTRODUÇÃO

Nos últimos anos, tem-se observado um esforço crescente por parte das empresas na busca por soluções que assegurem a integridade estrutural e a confiabilidade funcional de seus produtos e equipamentos. Esse movimento reflete uma preocupação não apenas com a qualidade final, mas também com a durabilidade e a segurança em operação. Dentre os diversos estágios do processo produtivo, os procedimentos que envolvem soldagem demandam especial atenção, dada a complexidade dos fenômenos físicos e metalúrgicos ali envolvidos. Durante essa etapa, ocorrem transformações significativas, como a fusão e posterior solidificação do material, além de deformações térmicas e estruturais que, se não forem cuidadosamente controladas, podem comprometer seriamente o desempenho do componente, resultando em falhas prematuras ou perdas funcionais consideráveis (Figueiredo; Valença, 2021).

Um dos principais desafios enfrentados na prática industrial reside no surgimento inesperado dessas descontinuidades, muitas vezes resultado de erros sutis no procedimento de soldagem. Tais falhas, ainda que inicialmente imperceptíveis ou aparentemente inofensivas, podem gerar concentrações de tensões internas que comprometem a integridade estrutural do componente ao longo do tempo. Como consequência, há uma redução significativa da vida útil da peça, além do aumento do risco de falhas catastróficas em serviço (Silva et al., 2024).

Segundo Silva (2023) a operação segura e economicamente viável de estruturas e equipamentos metálicos empregados na indústria depende, em grande medida, da confiabilidade quanto à sua integridade estrutural. Para que essa confiabilidade seja assegurada, é essencial conhecer, com precisão, a existência de descontinuidades no material, compreendendo seu tipo, dimensões, localização e, sobretudo, o grau de criticidade que representam para o desempenho do componente. Nesse contexto, os ensaios não destrutivos destacam-se como uma das ferramentas mais relevantes da engenharia moderna.

Os Ensaios Não Destrutivos (END) são técnicas utilizadas para inspecionar materiais e estruturas sem comprometer sua integridade, com o objetivo de identificar defeitos e prevenir falhas, contribuindo para a segurança da indústria e da sociedade. Esses métodos fornecem informações sobre a presença de descontinuidades, as propriedades do material e o nível de degradação em serviço. A escolha da técnica mais adequada depende das características do material e do tipo de análise desejada. Entre os métodos mais utilizados estão: inspeção visual, líquidos penetrantes, partículas magnéticas, ultrassom, radiografia industrial e correntes parasitas (Araújo, 2023).

Atualmente o ensaio por ultrassom é uma das técnicas mais importantes no controle de qualidade de materiais, devido à sua alta sensibilidade, versatilidade e aplicabilidade em diversos tipos de materiais e geometrias. Segundo Andreucci (2024), trata-se de um método não destrutivo que utiliza feixes sônicos de alta frequência para identificar descontinuidades internas e superficiais.

A relevância deste trabalho reside tanto em sua contribuição técnica quanto científica, uma vez que fornece subsídios para a tomada de decisão em ambientes industriais e auxilia na construção de uma base comparativa atualizada sobre as técnicas de END. Ao destacar a eficiência do ultrassom na inspeção de soldas, o estudo favorece a difusão de boas práticas e incentiva o uso de tecnologias com maior grau de precisão e segurança operacional (Oliveira, 2023).

A análise parte da premissa de que a escolha adequada do método de ensaio pode representar não apenas uma economia de recursos, mas também um diferencial competitivo na garantia da qualidade dos produtos e serviços industriais (LABTESTE, 2024). Espera-se avaliar as potencialidades e os limites das principais metodologias disponíveis, considerando aspectos como custo, tempo de aplicação, precisão na detecção de defeitos e aplicabilidade em campo.

Sendo assim, o presente estudo tem como objetivo realizar um comparativo entre diferentes técnicas de ensaio não destrutivo aplicadas à análise de juntas soldadas, com ênfase na eficiência do método por ultrassom.

2. METODOLOGIA

Esta pesquisa configurou-se como uma revisão teórica de caráter qualitativo, cujo objetivo foi analisar criticamente as principais técnicas de ensaio não destrutivo (END) aplicadas à inspeção de juntas soldadas, com ênfase na eficiência do método por

ultrassom. A escolha por essa abordagem fundamentou-se na necessidade de reunir, sistematizar e comparar conhecimentos consolidados na literatura científica, visando identificar critérios técnicos que subsidiassem a seleção da técnica mais adequada em contextos industriais distintos.

Para tornar o processo metodológico mais claro e didático, foi elaborado um fluxograma sintético com as etapas da pesquisa, abrangendo desde a definição das bases de dados até a análise comparativa dos resultados (Figura 1). A inclusão desse recurso buscou facilitar a compreensão do percurso adotado, conferindo maior transparência às decisões metodológicas.

A busca bibliográfica foi realizada nas plataformas Scopus, Web of Science, ScienceDirect, IEEE Xplore e Google Scholar, complementada por repositórios institucionais, normas da ASME e ISO, e manuais técnicos especializados. A seleção dos estudos seguiu critérios rigorosos: foram incluídas apenas publicações compreendidas entre 2020 e 2025, que abordassem aplicações práticas ou comparações diretas entre técnicas de END em juntas soldadas. Foram excluídos artigos de opinião, resumos sem texto completo, documentos não submetidos à revisão por pares e estudos que abordassem o tema de maneira genérica ou periférica, por não oferecerem respaldo técnico suficiente à análise pretendida.

Optou-se por priorizar o método de ultrassom não apenas por sua ampla aplicabilidade, mas também em razão de sua superioridade técnica na detecção de descontinuidades internas, conforme apontado em diversos estudos. A escolha foi motivada, ainda, pela crescente substituição de métodos tradicionais, como radiografia e partículas magnéticas, pelo ensaio ultrassônico em contextos onde se exige maior confiabilidade estrutural. Nesse sentido, o foco no ultrassom buscou aprofundar o debate em torno de seus critérios operacionais, vantagens e limitações, sem descartar o exame crítico das demais técnicas.

A busca utilizou combinações de palavras-chave em português e inglês, como: “ensaios não destrutivos”, “ultrassom industrial”, “juntas soldadas”, “comparativo de END”, “nondestructive testing”, “ultrasonic testing” e “weld inspection”, associadas por operadores booleanos (AND, OR) para refinar os resultados. Após a busca inicial, os artigos passaram por uma triagem com leitura exploratória e, em seguida, por uma leitura analítica mais aprofundada.

Figura 1 – Fluxograma contendo as etapas da pesquisa.



Fonte: Autor (2025).

As palavras-chave utilizadas na busca foram combinadas em português e inglês, incluindo termos como “ensaios não destrutivos”, “ultrassom industrial”, “juntas soldadas”, “comparativo de END”, “nondestructive testing”, “ultrasonic testing” e “weld inspection”, associadas por operadores booleanos (AND, OR). Após a etapa de busca inicial, os artigos selecionados foram submetidos a uma triagem exploratória, seguida de leitura analítica.

A análise comparativa foi conduzida com base em uma matriz de categorização estruturada, envolvendo critérios como sensibilidade, profundidade de penetração, custo, tempo de execução, aplicabilidade em diferentes materiais e complexidade operacional. Ainda que o estudo tenha natureza teórica, descreveu-se de forma sistemática a organização e o tratamento dos dados, assegurando rigor metodológico na comparação entre as técnicas. Por fim, os resultados foram sintetizados permitindo uma avaliação dos métodos de END sob diferentes perspectivas operacionais.

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Historicamente a soldagem é definida como um processo de união de materiais, geralmente metais, por meio do aquecimento localizado, com ou sem a aplicação de

pressão, e, em muitos casos, com ou sem o uso de material de adição. No entanto, sua aplicação vai além da simples junção de peças (Miranda et al., 2020).

Posteriormente a definição foi complementada, definindo a soldagem como uma técnica que permite reunir duas ou mais partes de um material, formando um corpo único com continuidade estrutural, preservando, sempre que possível, suas propriedades mecânicas e químicas. Trata-se de um processo que se destaca entre os métodos de união de materiais, não apenas por sua eficácia técnica (Lopes, 2020).

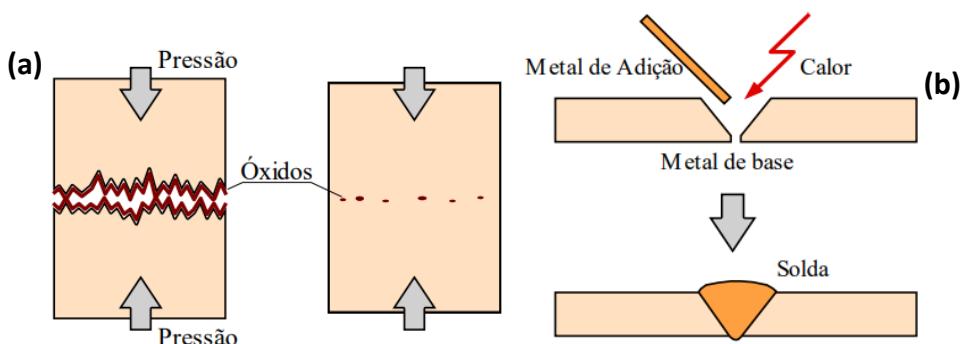
No entanto, os processos de soldagem podem ser amplamente utilizados para a deposição de material sobre superfícies desgastadas, com a finalidade de recuperar componentes danificados pelo uso, e em revestimentos técnicos, aplicados quando se busca conferir à peça propriedades específicas, como maior resistência à corrosão, ao desgaste ou a temperaturas elevadas (Figueiredo; Valença, 2021).

Segundo Lopes (2020) a soldagem ocupa posição de destaque justamente por ser um dos processos mais utilizados na fabricação e manutenção de estruturas metálicas, envolvendo um volume expressivo de atividades que vão desde a construção civil até a indústria naval, automobilística e petroquímica.

Para a união de materiais metálicos, dois métodos principais são tradicionalmente utilizados. O primeiro método, denominado soldagem por pressão ou deformação, baseia-se na deformação das superfícies de contato, promovendo uma aproximação suficientemente próxima entre os átomos, permitindo a formação de ligações metálicas (Figura 2a). Já o segundo método, a soldagem por fusão, consiste na aplicação de calor de forma localizada até que a região de contato atinja o ponto de fusão, tanto do material base quanto, quando presente, do metal de adição (Figura 2b). Nesse caso, as superfícies originais são destruídas e a união ocorre por meio da solidificação do metal fundido, formando uma junta contínua (Miranda et al., 2020).

A soldagem por pressão inclui uma variedade de métodos, como a soldagem por ultrassom, soldagem por fricção, soldagem por forjamento, soldagem por resistência elétrica, soldagem por difusão e soldagem por explosão, entre outros. Cada um desses processos possui características particulares, adequadas a diferentes tipos de materiais, geometrias e exigências operacionais. É válido destacar que alguns desses métodos apresentam características híbridas, situando-se entre os processos de deformação e os de fusão. Isso ocorre porque, embora a união se dê pela pressão, há também o aquecimento localizado gerado por corrente elétrica, podendo haver fusão parcial do material nas interfaces (Lopes, 2020).

Figura 2 – (a) Representação esquemática da soldagem por pressão ou deformação. (b) Representação esquemática da soldagem por fusão.



Fonte: Batista (2020).

Os processos de soldagem por fusão, por sua vez, são classificados segundo a fonte de energia utilizada, sendo os processos a arco elétrico os mais relevantes na indústria atual, devido à sua eficiência e ampla aplicação. Como o metal fundido tende a reagir com os gases da atmosfera, esses processos geralmente empregam algum tipo de proteção, como gases, fluxos ou atmosferas controladas, para preservar a qualidade da solda e evitar defeitos como porosidades e trincas (Figueiredo; Valença, 2021).

No entanto, falhas durante a soldagem, muitas vezes causadas por erros operacionais sutis, podem gerar descontinuidades que comprometem a vida útil e a segurança dos componentes. Entre eles estão a porosidades, trincas, falta de fusão e fissuras por contração térmica. Dentre os defeitos, a porosidade se destaca como um dos mais relevantes sob o ponto de vista do comprometimento estrutural das juntas. Trata-se da formação de cavidades internas, ou, em alguns casos, visíveis na superfície do cordão de solda resultantes do aprisionamento de gases no momento da solidificação do metal fundido (Sales, 2020). Essas cavidades, de diferentes dimensões e distribuições, comprometem a integridade da solda ao enfraquecer sua coesão interna e aumentar a suscetibilidade à propagação de trincas sob esforços mecânicos (Figura 3a).

Segundo Costa (2022), a porosidade pode se manifestar por meio de três mecanismos distintos, todos relacionados à dinâmica físico-química da poça de fusão durante o processo de soldagem. A primeira forma decorre da liberação de monóxido de carbono (CO), resultado de reações químicas na poça, geralmente associadas à desoxidação inadequada do metal fundido. Essa deficiência favorece a formação de

bolhas de gás que, ao não escaparem antes da solidificação, ficam aprisionadas na estrutura da solda.

A segunda forma de ocorrência está relacionada à expulsão de gases dissolvidos no metal líquido durante a transição para o estado sólido. Esse fenômeno é particularmente evidente em processos de soldagem de ligas de alumínio, nos quais a liberação de hidrogênio é um fator crítico, dada a elevada solubilidade desse elemento no metal líquido e sua baixa solubilidade no estado sólido, o que favorece a formação de poros (Costa, 2022).

Por fim, a terceira forma de porosidade está associada ao aprisionamento de gases provenientes do ambiente de proteção durante a soldagem com gás inerte ou ativo. Nesse caso, falhas na regulagem do fluxo de gás, impurezas ou turbulência na cobertura gasosa podem permitir a entrada de ar ou vapores, que acabam encapsulados na poça de fusão antes que o metal se solidifique completamente (Costa, 2022).

Já a perfuração, consiste na passagem não controlada do metal fundido para o lado oposto àquele em que a soldagem está sendo realizada, configurando um vazamento do material durante a execução do cordão. Esse defeito compromete a integridade da junta, podendo causar prejuízos tanto estruturais quanto funcionais, especialmente em peças submetidas à pressão ou à contenção de fluidos (Sales, 2020). A figura 3b apresenta um exemplo típico de perfuração em cordão de soldagem, evidenciando a gravidade do defeito quando não há controle adequado da penetração térmica e dos parâmetros operacionais.

O rechupe de cratera, também denominado cratera de solidificação, refere-se a uma cavidade formada geralmente no término de um cordão de solda ou em pontos de interrupção do processo. Tal descontinuidade ocorre em função da contração volumétrica natural do metal durante a fase de solidificação, quando não é realizado o fechamento adequado da poça de fusão (Sales, 2020). A figura 3c ilustra essa falha, frequentemente negligenciada, mas que pode atuar como ponto de nucleação de trincas sob solicitações mecânicas repetitivas, comprometendo o desempenho da união soldada.

As trincas constituem descontinuidades do tipo planar, com geometrias agudas e elevada razão entre comprimento e espessura, características que favorecem sua propagação sob concentrações de tensão. Essas fissuras podem surgir por diferentes mecanismos, incluindo contrações térmicas, tensões residuais ou fragilização por hidrogênio, sendo classificadas, de modo geral, em trincas a quente e trincas a frio, de acordo com a temperatura na qual se dá sua nucleação. As trincas a frio, também

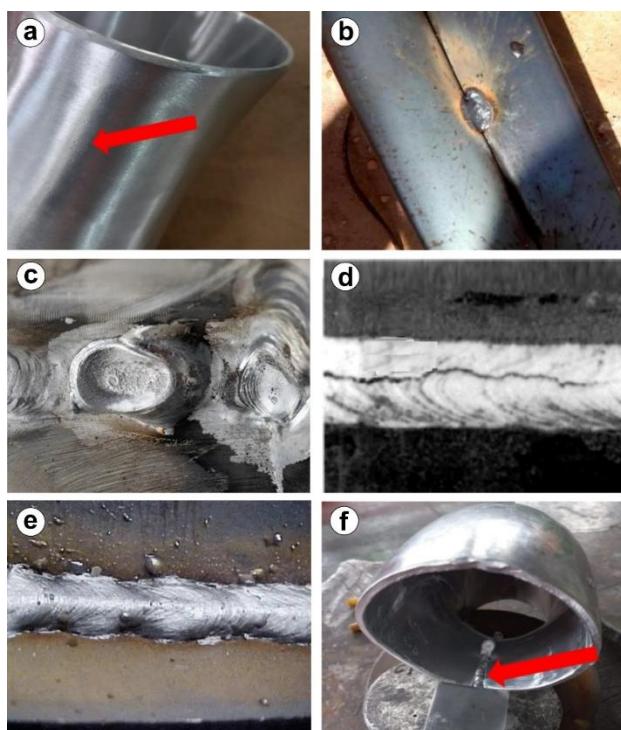
conhecidas como trincas induzidas por hidrogênio, costumam aparecer algum tempo após a soldagem e são particularmente perigosas por sua natureza insidiosa e difícil detecção (Sales, 2020). A localização dessas trincas dentro da junta soldada orienta ainda sua nomenclatura técnica, sendo essencial um diagnóstico preciso para sua prevenção e correção eficaz (Figura 3d).

As inclusões de escória correspondem à presença de partículas não metálicas, geralmente não magnéticas, aprisionadas no interior do metal de solda ou na interface entre a solda e o metal de base. Esse tipo de defeito está frequentemente associado a falhas operacionais durante o processo de soldagem, como a remoção inadequada de escória entre os passes, ou à geometria desfavorável da junta, que dificulta o acesso e favorece o acúmulo de resíduos sólidos. A figura 3e ilustra uma ocorrência típica de inclusão de escória, evidenciando sua relação com entalhes agudos nas bordas da junta ou entre os cordões, que funcionam como regiões propícias ao aprisionamento desses materiais (Costa, 2022).

Por fim, a falta de fusão configura-se como uma descontinuidade crítica resultante da ausência de coalescência entre o metal de adição e o metal de base, ou entre diferentes passes de solda, formando zonas onde a ligação não se estabelece adequadamente. Entre os fatores que favorecem esse tipo de falha destacam-se a aplicação inadequada da técnica de soldagem, o preparo deficiente das superfícies a serem unidas, projetos mal elaborados de juntas, restrições de acesso às áreas de soldagem, sobretudo em faces internas, além da presença de impurezas ou resíduos nas regiões de união. A figura 3f ilustra de forma clara um exemplo típico de cordão de solda com falta de fusão, destacando as zonas de descontinuidade onde há potencial para concentração de tensões elevadas (Costa, 2022).

Nesse sentido, o avanço contínuo no desenvolvimento de novos materiais, aliado à complexidade crescente dos projetos e à demanda por estruturas e equipamentos soldados cada vez mais eficientes, tem impulsionado transformações significativas nos processos de soldagem. Essas transformações visam, sobretudo, o aprimoramento da qualidade, a segurança operacional e a confiabilidade das construções metálicas. Nesse contexto, os Ensaios Não Destrutivos (END) surgem como ferramentas indispensáveis na inspeção industrial, oferecendo soluções eficazes para garantir a integridade das estruturas sem comprometer suas propriedades funcionais (Gasparini, 2022).

Figura 3 – Principais falhas que ocorrem durante a soldagem. (a) porosidade, (b) perfuração, (c) rechupe de cratera, (d) trincas e (e) inclusões de escória e (f) falta de fusão.



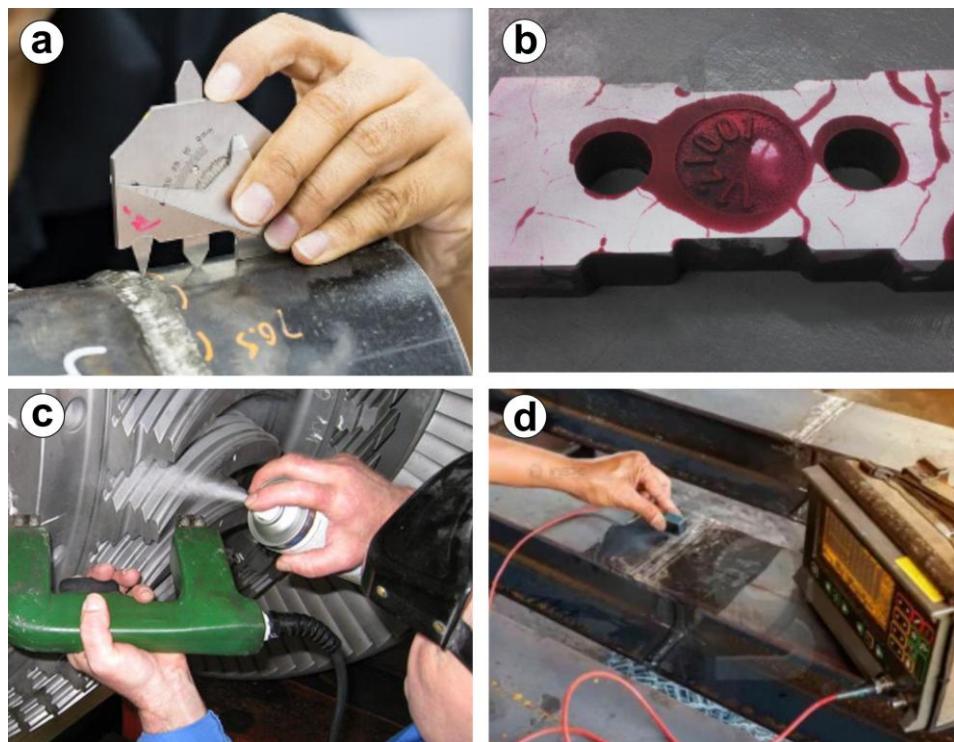
Fonte: Adaptado de Sales (2022) e Costa (2020).

Os END desempenham um papel estratégico nos programas de controle de qualidade, manutenção preventiva e avaliação da integridade estrutural, abrangendo um conjunto diversificado de métodos voltados à detecção de descontinuidades e defeitos internos ou superficiais em materiais e componentes. A principal vantagem desses ensaios reside na possibilidade de identificar falhas potenciais ou existentes sem causar danos às peças examinadas, o que os torna essenciais em ambientes industriais onde a segurança e a confiabilidade não podem ser comprometidas. Os Ensaios Não Destrutivos constituem uma abordagem crucial para a garantia da integridade de estruturas soldadas, contribuindo para a longevidade, a eficiência e a segurança dos sistemas inspecionados (Araújo, 2023).

Os métodos de ensaio não destrutivo (END) constituem ferramentas indispensáveis na detecção de defeitos, tanto superficiais quanto internos, presentes em materiais, soldas, componentes fabricados e estruturas em operação. Esses métodos possibilitam a avaliação da integridade das peças sem comprometer suas propriedades funcionais, o que os torna essenciais em contextos que exigem elevado grau de confiabilidade (Costa, 2022). Dentre as técnicas mais empregadas destacam-se: a

inspeção visual, o ensaio por líquido penetrante, a inspeção por partículas magnéticas e a ultrassonografia industrial (Figura 4).

Figura 4 – Imagens representativas das técnicas de ensaio não destrutivo aplicadas à avaliação de juntas soldadas (a) inspeção visual, (b) ensaio por líquido penetrante, (c) ensaio por partículas magnéticas e (d) ensaio por ultrassom.



Fonte: Adaptado de Reis (2020).

Como forma de orientar a escolha adequada da técnica de inspeção conforme o tipo de descontinuidade a ser investigada, o Quadro 1 apresenta uma correlação entre os defeitos de soldagem mais comuns e os métodos de ensaio não destrutivo apropriados para sua detecção. Essa classificação considera a sensibilidade e a capacidade de cada método em identificar com precisão as falhas, servindo como referência prática para o planejamento de rotinas de inspeção industrial (ASME, 2021).

Os valores atribuídos às classificações de detecção para cada tipo de defeito indicam o grau de dificuldade na identificação da descontinuidade por meio dos métodos não destrutivos. Esses níveis são interpretados da seguinte forma: (1) o defeito pode ser detectado por todas, ou pela maioria das técnicas, independentemente das condições envolvidas; (2) uma ou mais técnicas poderão detectar o defeito, desde que determinadas condições operacionais estejam presentes e (3) a detecção do defeito requer a aplicação

de técnicas específicas, sob condições controladas, além da necessidade de um profissional altamente qualificado para a execução e interpretação dos ensaios (ASME, 2021).

Quadro 1 – Relação entre defeitos de soldagem e métodos de ensaios não destrutivos. IV – Inspeção Visual; ILP – Inspeção por Líquido Penetrante; IPM – Inspeção por Partículas Magnéticas; IU – Inspeção por Ultrassom.

Defeitos de soldagem	Superficial		Subsuperficial	Volumétrico
	IV	ILP	IPM	IU
Queimaduras	1			2
Trincas	3	1	1	1
Reforço excessivo	1			2
Inclusões escórias			2	2
Fusão incompleta	2		2	1
Penetração incompleta	2	1	1	1
Desalinhamento	1			2
Porosidade	1	1	3	2

Fonte: ASME (2021).

A inspeção visual representa uma etapa fundamental dentro do sistema de controle de qualidade, sendo, na maioria das vezes, o primeiro método empregado na avaliação de máquinas, materiais e soldas. Em diversas situações, esse tipo de exame se mostra suficiente para a identificação de descontinuidades aparentes e, por isso, acaba sendo o único procedimento de inspeção adotado. Em outros casos, assume o papel de pré-requisito para a aplicação de técnicas mais avançadas de ensaio não destrutivo, configurando-se como uma triagem inicial indispensável (Costa, 2022).

A inspeção visual pode ser subdividida em três modalidades distintas: exame direto, remoto e translúcido. O exame direto é realizado quando o acesso visual ao componente é adequado, permitindo ao inspetor posicionar-se a uma distância igual ou inferior a 600 mm e a um ângulo mínimo de 30° em relação à superfície a ser inspecionada. Já o exame remoto é empregado nos casos em que o acesso visual direto não é possível, exigindo o uso de instrumentos auxiliares como espelhos, boroscópios, fibras ópticas ou câmeras (Costa, 2022).

Por fim, o exame visual translúcido constitui uma complementação do exame direto, sendo utilizado em situações que demandam a intensificação da iluminação sobre a superfície inspecionada. Para tanto, recorre-se ao uso de fontes de luz artificial, como

iluminadores com feixes direcionais, que permitem a visualização de detalhes que, de outra forma, passariam despercebidos (Paulo, 2021).

No contexto da soldagem, a eficácia da inspeção visual está diretamente relacionada à qualificação e à experiência do profissional responsável. É esperado que o inspetor não apresente quaisquer limitações físicas que comprometam sua mobilidade ou capacidade visual, uma vez que a avaliação pode exigir o acesso a posições difíceis ou de geometria complexa. Além disso, é essencial que o profissional esteja familiarizado com os equipamentos, os materiais envolvidos, as normas técnicas vigentes e as especificações do projeto (Trombini, 2020).

O ensaio por líquido penetrante, por sua vez, é uma técnica amplamente utilizada para a detecção de descontinuidades superficiais em materiais não porosos, sejam eles ferrosos ou não ferrosos. Seu princípio de funcionamento baseia-se na ação da capilaridade, que permite que o líquido penetrante se infiltre em fissuras ou descontinuidades abertas à superfície, revelando defeitos que não seriam perceptíveis a olho nu. Essa técnica pode empregar dois tipos principais de penetrantes: os fluorescentes, indicados para ambientes com baixa luminosidade, e os coloridos (visíveis), recomendados para locais com alta intensidade de luz natural ou artificial (Gasparini, 2022).

Pelas suas características versáteis, o ensaio por líquido penetrante pode ser aplicado a uma grande variedade de materiais metálicos e não metálicos, desde que apresentem superfícies não porosas. Isso inclui peças forjadas, fundidas, cerâmicas técnicas de alta densidade, entre outros. Trata-se de um método aplicável tanto na etapa de fabricação quanto na fase de manutenção de componentes, oferecendo resultados tecnicamente confiáveis e economicamente viáveis na identificação de descontinuidades superficiais, mesmo aquelas de dimensões reduzidas (Peixe, 2022).

A realização do ensaio requer cuidados específicos com a preparação da superfície a ser inspecionada. Toda a área a ser examinada, bem como uma faixa adicional de no mínimo 25 mm ao redor, deve ser cuidadosamente limpa, de forma a remover resíduos de graxa, óleo ou outras impurezas que possam interferir na capilaridade do líquido. Em seguida, aplica-se o penetrante sobre a superfície, permitindo-se que ele atue por tempo suficiente para migrar para o interior de eventuais descontinuidades. Após esse período, o excesso de penetrante é removido, com água, no caso de penetrantes fluorescentes hidrossolúveis, ou com solvente, no caso de penetrantes oleosos. Com a superfície seca, aplica-se o revelador, cuja função é extrair o penetrante retido nos defeitos e torná-los

visíveis. Por fim, procede-se à inspeção visual, momento em que o inspetor avalia a presença e a distribuição de possíveis indicações de falhas (Peixe, 2022).

O princípio de funcionamento da inspeção por partículas baseia-se na magnetização da peça, estabelecendo-se um campo magnético homogêneo ao longo de sua superfície. Quando esse campo encontra uma descontinuidade, como trincas, inclusões ou falta de fusão, ocorre uma distorção nas linhas de fluxo magnético, gerando o chamado campo de fuga. Essa interrupção no fluxo magnético é mais evidente quando o defeito está orientado transversalmente ao campo aplicado (Costa, 2020).

Este é um método amplamente utilizado para a detecção de descontinuidades superficiais e subsuperficiais em materiais ferromagnéticos. Essa técnica permite identificar defeitos ligeiramente abaixo da superfície, mesmo quando não são visíveis a olho nu. Sua aplicação, no entanto, é limitada a materiais que apresentam propriedades magnéticas, como o aço carbono e algumas ligas ferrosas (Trombini, 2020).

Para esta técnica, o campo de fuga é gerado por uma descontinuidade interna. Para torná-lo visível, aplica-se sobre a superfície um pó ferromagnético, em forma seca ou disperso em líquido, que se aglomera precisamente sobre a região defeituosa, revelando a localização, o formato e a extensão da falha (Andreucci, 2020).

Essas partículas magnéticas são formuladas com características específicas de granulometria, densidade e coloração, de modo a maximizar a sensibilidade da detecção. Elas podem ser aplicadas em diferentes meios, como pó seco, pasta ou em suspensão líquida, e o método de aplicação divide-se em dois principais modos: via seca e via úmida (Andreucci, 2020).

No método de aplicação por via seca, o pó magnético é aplicado diretamente sobre a superfície do material, geralmente com o auxílio de bombas aspersoras ou aplicadores manuais que utilizam o ar como meio condutor. A conservação adequada do pó exige armazenamento em locais secos, e sua granulometria deve ser controlada para garantir distribuição uniforme. Na aplicação por via úmida as partículas ferromagnéticas são dispersas em líquidos como água, óleo ou querosene. A suspensão apresenta alta capacidade de cobertura e maior sensibilidade para detecção de pequenas trincas, como as geradas por fadiga. Essa forma de aplicação utiliza borrifadores manuais ou dispositivos tipo chuveiro, especialmente em sistemas automatizados e máquinas estacionárias (Costa, 2020).

Segundo o código ASME (2021), diferentes técnicas de magnetização podem ser aplicadas de acordo com a geometria da peça e a localização dos possíveis defeitos. Entre

as principais, destacam-se a magnetização por eletrodos, a magnetização circular e a magnetização por yoke, cada uma com características operacionais distintas que devem ser escolhidas conforme as condições do ensaio.

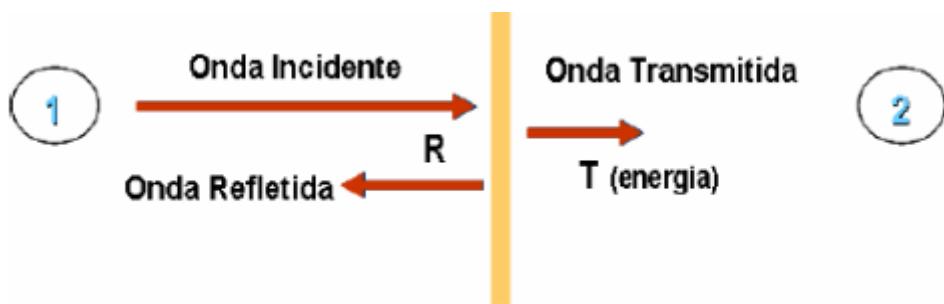
Por fim, o ensaio por ultrassom é amplamente empregado na inspeção de materiais e componentes estruturais que exigem altos níveis de confiabilidade. Assim como os demais métodos de ensaio não destrutivo (END), seu objetivo central é reduzir o grau de incerteza na utilização de peças críticas, possibilitando a identificação de descontinuidades internas sem comprometer a integridade do material. O método baseia-se na introdução de ondas sonoras de alta frequência no corpo de prova; essas ondas, ao atravessarem o material, interagem com interfaces internas, naturais ou provocadas por defeitos, e são parcialmente ou totalmente refletidas (Sales, 2022).

As ondas sônicas apresentam comportamento distinto conforme a natureza da interface com a qual interagem. Em interfaces do tipo metal-gás, há uma reflexão praticamente total da onda, o que favorece a detecção de defeitos como poros, trincas ou falta de fusão, que produzem descontinuidades abruptas. Já nas interfaces metal-líquido ou metal-metal, a reflexão é parcial, e a quantidade de energia refletida depende de propriedades físicas como a densidade e a impedância acústica dos materiais envolvidos. Além disso, defeitos como inclusões sólidas e falta de penetração podem ser identificados tanto por reflexões parciais quanto por efeitos secundários, como espalhamento ou atenuação do feixe (Silva, 2021).

Um dos principais diferenciais da técnica ultrassônica é sua capacidade de detectar, com precisão, tanto defeitos volumétricos quanto defeitos planares, o que a torna extremamente eficaz na avaliação de juntas soldadas. Com os avanços tecnológicos recentes, incluindo cabeçotes multielemento (phased array) e processamento digital de sinais, o ensaio ultrassônico consolidou-se como uma das principais ferramentas de controle de qualidade na indústria, substituindo, em diversas aplicações, métodos mais tradicionais como a radiografia (Andreucci, 2024).

A metodologia envolve a emissão de ondas acústicas por meio de um transdutor (também chamado cabeçote), que vibra a uma determinada frequência. Essas ondas penetram o material e são refletidas de volta ao transdutor ao encontrar uma interface ou descontinuidade. O aparelho de ultrassom converte o sinal recebido em um gráfico, permitindo ao operador interpretar o tempo de trânsito da onda e, com base na velocidade de propagação do som no material, calcular a profundidade da reflexão (Reis, 2021) (Figura 5).

Figura 5 – Representação da interação de uma onda ultrassônica em uma interface entre dois meios.



Fonte: Andreucci (2024).

Os sinais captados pelos cristais piezelétricos do transdutor durante o ensaio ultrassônico são convertidos em impulsos elétricos, exibidos na tela do equipamento sob a forma de pulsos luminosos denominados “ecos”. Esses ecos correspondem às reflexões das ondas sonoras nas interfaces internas do material inspecionado, revelando a presença e a localização de descontinuidades. Para facilitar a interpretação dos dados, o equipamento pode apresentar a seção da peça inspecionada de três maneiras principais A-scan, B-scan e C-scan (Reis, 2021).

A A-scan é a forma mais tradicional de apresentação, onde os ecos são exibidos como picos em um gráfico bidimensional. O eixo horizontal representa o tempo de percurso da onda (relacionado à profundidade), enquanto o eixo vertical mostra a amplitude do sinal. Essa visualização permite identificar a profundidade e a intensidade de uma descontinuidade, sendo amplamente utilizada em ensaios convencionais para medição de espessura ou detecção de trincas (Camargo; Ferrari, 2021).

No B-scan a imagem gerada representa uma seção transversal da peça inspecionada, proporcionando uma visão em corte do material. Essa visualização oferece informações espaciais mais completas que o A-scan, facilitando a interpretação estrutural do defeito. No C-scan a imagem gerada neste formato corresponde a uma visão superior da peça, como se fosse uma planta baixa. Nessa representação, as variações de sinal são convertidas em escalas de cor, formando um mapeamento bidimensional da área inspecionada. Esse tipo de varredura é amplamente utilizado em ensaios de adesão, laminações e avaliação de compósitos (Camargo; Ferrari, 2021).

Durante a inspeção, é essencial garantir o acoplamento eficaz do transdutor à superfície da peça. Para isso, utiliza-se um gel ou outro meio de acoplamento que elimine a camada de ar entre o transdutor e o material. Essa camada, caso não seja tratada, impede

a transmissão das ondas mecânicas devido à grande diferença de impedância acústica entre o ar e o metal (Sales, 2022).

Embora todas as técnicas apresentem relevância e aplicabilidade em diferentes contextos, quando o foco é a análise eficaz de juntas soldadas, o ensaio por ultrassom se destaca significativamente, sobretudo pela sua superior capacidade de detecção de descontinuidades internas, como trincas volumétricas, falta de penetração e inclusões. Sua elevada profundidade de penetração e a possibilidade de dimensionar com precisão os defeitos conferem ao método uma vantagem clara sobre técnicas como inspeção visual, líquido penetrante e partículas magnéticas, que são limitadas principalmente à detecção superficial (Sales, 2022).

De acordo com Pereira (2020), a inspeção radiográfica foi durante muito tempo o principal recurso para detecção volumétrica em soldas. Entretanto, com o avanço do ultrassom industrial, este passou a ser preferido por apresentar maior sensibilidade a trincas planas, menor custo operacional a longo prazo, ausência de riscos radiológicos e melhor desempenho em materiais espessos. Além disso, o ultrassom oferece ampla versatilidade de aplicação, sendo eficaz tanto em materiais ferrosos quanto não ferrosos. Já o líquido penetrante é restrito a falhas abertas à superfície, e o uso de partículas magnéticas depende da propriedade ferromagnética do material, o que limita seu uso em diversas situações.

Ensaios comparativos realizados por Andreucci (2024) demonstraram que o ensaio por ultrassom (IU) foi mais eficaz na detecção de trincas internas em aço carbono soldado, superando o desempenho do IPM, cuja sensibilidade decai à medida que a profundidade do defeito aumenta. O ultrassom também mostrou maior adaptabilidade em campo, exigindo menor preparação superficial e oferecendo registros mais confiáveis.

Essa superioridade técnica, contudo, requer operação mais complexa, demandando profissionais com alto nível de qualificação e calibração precisa dos equipamentos. Por outro lado, técnicas como IV, ILP e IPM continuam sendo mais acessíveis e mais fáceis de aplicar, o que as torna úteis como ferramentas de triagem ou inspeções preliminares (Andreucci, 2024). O Quadro 2 reflete essas diferenças ao comparar custo, profundidade de detecção, aplicabilidade e facilidade de uso entre as técnicas.

Quadro 2 – Comparativo entre métodos de ensaio não destrutivo (END).

MÉTODO	PROFUNDIDADE DE DETECÇÃO	TIPO DE DEFEITO DETECTADO	CUSTO	APLICABILIDADE	FACILIDADE DE USO
Inspeção Visual	Superficial	Trincas abertas, descontinuidades visíveis	Muito baixo	Alta	Alta
Líquido Penetrante	Superficial (até 0,1 mm)	Trincas superficiais e porosidade	Baixo	Alta	Alta
Partículas magnéticas	Superficial e subsuperficial (até ~2 mm)	Trincas, inclusões	Médio	Média (limitado a ferrosos)	Média
Ultrassom	Alta (vários cm)	Trincas, falta de fusão, inclusões	Médio a alto	Alta	Requer treinamento técnico

Fonte: Autor (2025).

Estudos mais recentes confirmam essa tendência. Segundo Chouikh e Bouraoui (2023), o UT apresentou desempenho superior na detecção de descontinuidades profundas e internas em componentes soldados, enquanto o ILP e o IPM mostraram eficácia apenas para defeitos abertos ou próximos à superfície (Mohandas et al., 2024). O UT foi capaz de identificar mais de 90% das falhas internas, contra menos de 60% detectadas pelos métodos convencionais. Essa eficácia se deve à sua capacidade de penetração elevada e à sensibilidade a descontinuidades volumétricas, tornando-o o método preferencial para inspeções estruturais de alta confiabilidade.

Ulbrich et al. (2023) reforçam essa conclusão ao mostrar que soldas de alta qualidade apresentaram respostas ultrassônicas com até 90% da amplitude máxima do pulso refletido, enquanto soldas com falhas internas apresentaram cerca de 25% dessa resposta. Métodos como IPM e ILP não foram capazes de identificar com a mesma precisão as falhas internas mais profundas. A eficácia do ultrassom foi atribuída à sua sensibilidade a variações de impedância acústica, o que permite o mapeamento detalhado de defeitos volumétricos mesmo em juntas de geometria complexa.

Além disso, o ILP é fortemente condicionado pela presença de trincas abertas e visíveis, com desempenho dependente da limpeza da superfície e da ação capilar. Já o IPM, ainda que sensível a trincas próximas à superfície, é limitado a materiais ferromagnéticos e requer orientação específica dos defeitos em relação ao campo magnético (Ulbrich et al., 2023).

Dessa forma, os resultados analisados demonstram que o ensaio por ultrassom é o mais eficaz entre as técnicas comparadas quando se trata de inspeção de juntas soldadas. Essa superioridade deve-se à combinação de três fatores técnicos essenciais: (1)

profundidade de penetração das ondas ultrassônicas; (2) sensibilidade a descontinuidades planas e internas; e (3) possibilidade de inspeção volumétrica em tempo real por meio de modos A-scan, B-scan e C-scan (Mohandas et al., 2024; Ulbrich et al., 2023). Portanto, ainda que cada técnica possua seu campo de aplicação específico, os dados da literatura sustentam que o ultrassom é o método mais completo e confiável para a avaliação de falhas internas em soldas, especialmente em estruturas críticas, onde a segurança e a confiabilidade não podem ser comprometidas.

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Com base em literatura técnica e estudos comparativos, o presente estudo avaliou as potencialidades e limitações dos principais métodos de ensaio não destrutivo aplicados na inspeção de juntas soldadas. Embora todas as técnicas possuam relevância e aplicabilidade em contextos específicos, os dados reunidos ao longo deste estudo reforçam a superioridade técnica do ensaio por ultrassom.

A análise comparativa demonstrou que o ultrassom se destaca por combinar profundidade de penetração, sensibilidade a falhas planas e capacidade de quantificação dimensional, características não observadas de forma simultânea nos demais métodos. Estudos mostraram taxas de detecção significativamente mais altas do ultrassom em relação a métodos superficiais, reforçando empiricamente sua eficiência. Além disso, a aplicabilidade do IU em materiais ferrosos e não ferrosos, sua portabilidade em campo e a possibilidade de visualização por A-scan, B-scan e C-scan ampliam sua robustez como ferramenta de inspeção.

Contudo, essa eficiência técnica não o isenta de limitações. O método exige instrumentação de custo elevado, nível técnico especializado para operação e interpretação dos resultados, além de cuidados rigorosos com o acoplamento e a calibração. Tais exigências limitam sua aplicação em ambientes onde recursos humanos ou tecnológicos são restritos o que justifica, em muitos contextos industriais, o uso complementar de métodos mais simples, como o ILP e o IPM.

A crítica central levantada por esta análise reside, portanto, na importância da escolha criteriosa da técnica de END conforme o tipo de defeito esperado, material envolvido, e condição de inspeção. A preferência pelo ensaio ultrassônico deve estar fundamentada na natureza do problema a ser investigado. O uso isolado de métodos como

o ILP ou IPM pode ser ineficaz diante de certos casos, mas extremamente vantajoso em inspeções rápidas, acessíveis e economicamente viáveis, especialmente em superfícies com geometrias simples e materiais ferromagnéticos.

Dessa forma, fica evidente que a eficiência de um método de END não deve ser analisada de forma absoluta, mas sim em função do contexto técnico e operacional da inspeção. O ultrassom se consolida como técnica preferencial para avaliação estrutural aprofundada, mas seu uso deve ser integrado a um plano de inspeção mais amplo, que considere também a complementaridade e a eficiência de métodos convencionais. Essa abordagem integrada é o que, de fato, promove uma prática de inspeção mais segura, econômica e tecnicamente embasada.

REFERÊNCIAS

- AMERICAN SOCIETY OF MECHANICAL ENGINEERS (ASME). **ASME Nondestructive Examination and Quality Control Central Qualification and Certification Program.** Nova Iorque: ASME, 2021.
- ANDREUCCI, R. (Org.). **Ensaio por Ultrassom.** São Paulo: Abendi, 2024. 90p.
- ANDREUCCI, R. (Org.). **Partículas Magnéticas.** São Paulo: Abendi, 2020. 61p.
- ARAÚJO, I.L.S. **A importância das inspeções visuais e dos ensaios não destrutivos em pavimentos aeronáuticos.** 2023. 44f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Ciências Aeronáuticas) – Universidade do Sul de Santa Catarina, Palhoça, 2023.
- BATISTA, M. **Desenvolvimento de um processo de soldagem a ponto por resistência elétrica utilizando manufatura aditiva.** 2020. 303f. Tese (Doutorado em Ciências) – Universidade de São Paulo, São Paulo, 2020.
- CAMARGO, M.V.; FERRARI, V.J. **Resistência à compressão e módulo de elasticidade do concreto por meio de ensaios não destrutivos (END).** Revista Matéria, v. 26, n. 3, 2021.
- COSTA, F.H. **Ensaios não destrutivos para qualificação de soldagem em caldeiras.** 122f. 2022. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Mecânica) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Pato Branco, 2022.
- CHOUIKH, I.; BOURAOUI, C. **A fatigue-reliability approach using ultrasonic non-destructive inspection.** Comptes Rendus Mécanique, v. 351, p. 105-124, 2023.

FIGUEIREDO, Y.S.; VALENÇA, S.L. Análise e melhoria do processo de soldagem com eletrodo revestido na caldeiraria da UTE Iolando Leite – Sergipe – Brasil.
Brazilian Journal of Development, v. 7, n. 8, p. 84058-84078, 2021.

GASPARINI, O.M.S. A importância do ensaio não destrutivo de ultrassom na análise e garantia da qualidade da solda. 2022. 53f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Mecânica) – Faculdades Integradas de Aracruz, Aracruz, 2022.

LABTESTE. Ensaios não destrutivos: o que são e como podem beneficiar sua empresa. 2024. Disponível em:

<<https://www.labteste.com.br/blog/categorias/artigos/ensaios-nao-destrutivos-o-que-sao-e-como-podem-beneficiar-sua-empresa>>. Acesso em 01 abr. 2025.

LOPES, F.E. Estudo sobre a evolução dos processos de união na indústria automobilística. 2020. Monografia (Especialização em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2020.

MIRANDA, M.S.; OLIVEIRA, R.M.; ALVES, E.P.; MINEIRO, S.L.; TOLEDO, R.C. Revisão da literatura: Processo de soldagem por fricção e mecanismo de ligação por difusão atômica. 1º Workshop em Engenharia e Tecnologia Espaciais, São José dos Campos, 18, 19 e 20 de agosto de 2020.

MOHANDAS, R.; MONGAN, P.; HAYES, M. Ultrasonic Weld Quality Inspection Involving Strength Prediction and Defect Detection in Data-Constrained Training Environments. Sensors, v. 24, n. 20, 2024.

OLIVEIRA, S.G. Estudo sobre um caso prático de inspeção de vaso de pressão. 2023. 106f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2023.

PEIXE, H.F. Análise dos defeitos de soldadura na fabricação de tanque metálico para armazenamento de combustível líquido. Relatório de estágio profissional (Licenciatura em Engenharia Mecânica) – Universidade Eduardo Mondlane, Maputo, 2022.

PEREIRA, B.D. Inspeção de Juntas Soldadas. 2020. 76f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Metalúrgica e de Materiais) – Universidade do Porto, Porto, 2020.

SALES, R.R. Mapeamento dos defeitos em processos de soldagem MIG/MAG robotizado com foco em propostas de melhorias na redução de scrap: estudo de caso em uma empresa do segmento automotivo. 2020. 61f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) – Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2020.

SILVA, G.T.G.; HERMENEGILDOS, T.F.C.; TORRES-LÓPEZ, E.A.; SANTOS, T.F.A.; URTIGA FILHO, S.L. Análise da tensão residual em soldagem de revestimento de aço AISI 347L em aço Cr-Mo através do método de medição por coordenadas. Revista Matéria, v. 29, n. 1, 2024.

SILVA, N.D.J. **Estudo da contribuição da gestão da manutenção, com o suporte de sistemas automatizados, para a integridade estrutural de um tripper car.** 2023. 79f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2023.

SILVA, J.W. **Avaliação de métodos ultrassônicos para o monitoramento da degradação em fadiga de tubos de PRFV.** 2021. 90f. Dissertação (Mestrado em Ciência e Tecnologia dos Materiais) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2021.

REIS, H. **Monitoramento de corrosão sob tensão por meio dos métodos de ensaios não destrutivos de emissão acústica e ultrassom Phased Array.** 2021. 146f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2021.

REIS, H. **Tipos de inspeção de soldagem.** Inspesolda. 2020. Disponível em: <https://inspesolda.com/tipos-de-inspecao-de-soldagem/>. Acesso em 05 jun. 2025.

TROMBINI, M. **Aplicação da técnica de ultrassom phased array para controle de qualidade de aços na condição superficial bruta.** 2020. 127f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2020.

ULBRICH, D.; PSUJ, G.; WYPYCH, A.; BARTKOWSKI, D.; BARTKOWSKA, A.; STACHOWIAK, A.; KOWALCZYK, J. **Inspection of Spot Welded Joints with the Use of the Ultrasonic Surface Wave.** Materials, v. 16, n. 21, 2023.