



FACULDADES INTEGRADAS DE ARACRUZ

ODILON MATEUS DE SOUZA GASPARINI

**A IMPORTÂNCIA DO ENSAIO NÃO DESTRUTIVO DE
ULTRASSOM NA ANÁLISE E GARANTIA DA QUALIDADE
DA SOLDA**

ARACRUZ/ES

2022

ODILON MATEUS DE SOUZA GASPARINI

**A IMPORTÂNCIA DO ENSAIO NÃO DESTRUTIVO DE
ULTRASSOM NA ANÁLISE E GARANTIA DA QUALIDADE
DA SOLDA**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado
às Faculdades Integradas de Aracruz (FAACZ),
como requisito parcial para a obtenção do título
de bacharel em Engenharia Mecânica.

ARACRUZ/ES

2022

ODILON MATEUS DE SOUZA GASPARINI

**A IMPORTÂNCIA DO ENSAIO NÃO DESTRUTIVO ULTRASSOM NA ANÁLISE
E GARANTIA DA QUALIDADE DA SOLDA**

Trabalho de conclusão de curso apresentado à coordenadoria do curso de Engenharia Mecânica das Faculdades Integradas de Aracruz, como requisito parcial para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica.

Aprovado em 21 de dezembro de 2022

COMISSÃO EXAMINADORA



Prof. Dr. Herton Oliveira Dourado

FAACZ

(Orientador)



Prof. Esp. Patrık Borges do Nascimento Leal

FAACZ

Dedico este trabalho ao meu filho Anthony Gasparini, que é a razão maior da minha alegria e motivo das minhas lutas diárias.

AGRADECIMENTOS

Agradeço ao meu coordenador, o professor Harerton Dourado por ter aceitado acompanhar-me nesta pesquisa.

Expresso minha gratidão a todos os profissionais e professores do curso de Engenharia mecânica que me forneceram todas as bases necessárias para a realização deste trabalho, agradeço com profunda admiração pelo vosso profissionalismo.

“O amor me faz feliz e a fé me guia no rumo certo.”
(Imetame)

RESUMO

Cada vez mais as indústrias vêm adotando os métodos de ensaios não destrutivos como ferramenta na garantia de qualidade e confiabilidade em seus processos e ou produtos. Nesse sentido, essa pesquisa trata de discutir sobre a relevância do ensaio não destrutivo por ultrassom convencional (pulso eco) na análise e garantia da qualidade da solda buscando conhecer seus fundamentos, importância, as vantagens e fragilidades dos métodos não destrutivos, em especial o ultrassom. Para tanto, é necessário apresentar os principais métodos de processos de soldagem utilizados em indústrias, descrever os ensaios não destrutivos e seus métodos de aplicação e apresentar a relevância dos ensaios não destrutivos, com foco no método ultrassônico pulso eco. Realiza-se, pois, uma pesquisa bibliográfica, utilizando-se de referencial teórico atual, numa abordagem descritiva e qualitativa. Os resultados da pesquisa apontam as contribuições e vantagem da utilização dos ensaios não destrutivos na análise e garantia da qualidade da solda, e conseqüentemente, nos processos de produção industrial.

Palavras-chave: Soldagem. Inspeção de qualidade. Descontinuidades. Ensaio não-destrutivo Ultrassom. Ultrassom pulso eco.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Soldagem por pressão ou deformação.....	16
Figura 2 – Soldagem por fusão.....	16
Figura 3 – Região do arco na soldagem com eletrodos revestidos.....	18
Figura 4 – Soldagem TIG.....	20
Figura 5 – Soldagem MIG/MAG.....	22
Figura 6 – Distorção de soldagem.....	27
Figura 7 – Desalinhamento de junta de topo.....	28
Figura 8 – Perfis incorretos da solda em ângulo.....	28
Figura 9 – Tipos de porosidade: a) distribuída, b) agrupada e c) alinhada.....	29
Figura 10 – Inclusão de escória.....	29
Figura 11 – Demonstração de como é a falta de penetração.....	30
Figura 12 – Falta de fusão em uma junta em ângulo.....	30
Figura 13 – Identificação de mordedura.....	31
Figura 14 – Após líquido penetrante e aplicação de revelador, duas trincas transversais do cordão.....	32
Figura 15 – Identificação das descontinuidades por líquido penetrante.....	35
Figura 16 – Imagem radiográfica da falta de penetração da solda abaixo.....	36
Figura 17 – Indicação típica de ultrassom na tela do aparelho resultante da falta de penetração por solda.....	38
Figura 18 – Modo de propagação de uma onda longitudinal.....	39
Figura 19 – Técnica Pulso Eco aplicada a cordões de solda.....	42
Figura 20 – Inspeção de materiais por ultrassom: transmissão da onda.....	43
Figura 21 – Inspeção de materiais por ultrassom: recepção da onda.....	44
Figura 22 – Transdutores mais utilizados.....	46
Figura 23 – Medidor de espessura digital ultrassônico GE modelo DM4E.....	46
Figura 24 – Ultrassom convencional.....	48
Figura 25 – Princípio básico da Inspeção de materiais por ultrassom.....	49
Figura 25 – Pulso ultrassônico.....	49

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Processos de soldagem por fusão.....	17
Quadro 2 – Vantagens, limitações e aplicações do processo SMAW	19
Quadro 3 – Vantagens, limitações e aplicações do processo GTAW	21
Quadro 4 – Vantagens, limitações e aplicações do processo GMAW	23
Quadro 5 – Transdutores mais utilizados	45

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AWS	American Welding Society
END	Ensaio não destrutivo
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
IBICT	Instituto Brasileiro de Informação em Ciência e Tecnologia
GMAW	Gas Metal Arc Welding
GTAW	Gas Tungsten Arc Welding
NBR	Norma Brasileira
MAG	Metal Active Gas
MIG	Metal Inert Gas
SMAW	Shielded Metal Arc Welding
TIG	Tungsten Inert Gas

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	12
1.1 OBJETIVOS GERAL E ESPECÍFICOS	12
1.2 METODOLOGIA.....	13
2. FUNDAMENTOS DA SOLDAGEM	14
2.1 PROCESSOS DE SOLDAGEM.....	14
2.1.1 Soldagem por pressão	15
2.1.2 Soldagem por fusão	16
2.2 PRINCIPAIS PROCESSOS DE SOLDAGEM POR FUSÃO.....	17
2.2.1 Soldagem por eletrodo	18
2.2.2 Soldagem TIG	19
2.2.3 Soldagem por MIG/MAG	21
3. INSPEÇÃO DA QUALIDADE E INTEGRIDADE ESTRUTURAL DE EQUIPAMENTOS SOLDADOS	24
3.1 DESCONTINUIDADES E DEFEITOS DOS PROCESSOS DE SOLDAGEM POR FUSÃO	26
3.1.1 Descontinuidades dimensionais.....	26
3.1.2 Descontinuidades estruturais.....	28
3.2 ENSAIOS NÃO DESTRUTIVOS E SUAS APLICAÇÕES	32
3.2.1 Ensaio líquido penetrante.....	34
3.2.2 Ensaio radiográfico.....	35
3.2.3 Ensaio por ultrassom.....	36
4. O ENSAIO NÃO DESTRUTIVO ULTRASSOM NA SOLDAGEM	38
4.1 VANTAGENS E LIMITAÇÕES DO ENSAIO POR ULTRASSOM.....	39
4.2 TÉCNICA ULTRASSÔNICA CONVENCIONAL (PULSO ECO)	41
4.3 APARELHAGEM E PROCEDIMENTOS ESPECÍFICOS DE ULTRASSOM NA SOLDAGEM.....	44
5. CONSIDERAÇÕES FINAIS	51
REFERÊNCIAS	52

1. INTRODUÇÃO

Segundo Andreucci (2014), a inspeção por ensaio não-destrutivo ultrassom é de grande importância na inspeção industrial de materiais, é um método indispensável para o controle da qualidade do produto final, como na análise e garantia da qualidade da solda. Com a necessidade de detectar descontinuidades cada vez menores, a inspeção por ultrassom ganhou confiabilidade na indústria moderna, por ser um ensaio com grande poder de penetração, alta sensibilidade, e grande precisão para detecção e análise dos resultados.

Por se tratar de uma técnica largamente empregada em todo mundo, e abranger as diversas áreas da engenharia, é de grande importância para um engenheiro mecânico ter conhecimentos sobre os efeitos do processo de soldagem, e como o ensaio por ultrassom pode ser um forte aliado na detecção de descontinuidades, garantindo assim uma maior confiabilidade dos componentes soldados.

1.1 OBJETIVOS GERAL E ESPECÍFICOS

O presente trabalho tem como objetivo discutir a importância do ensaio por não destrutivo ultrassom na análise e garantia da qualidade da solda e evidenciar, o por que esse ensaio é particularmente indicado para a inspeção de juntas soldadas, devido a sua facilidade em detectar descontinuidade do tipo planar, nas mais diversas posições e orientações, superando assim as limitações de alguns outros ensaios.

Como objetivos específicos pretende-se: conhecer os fundamentos e processos da soldagem; compreender os elementos da inspeção da qualidade e integridade estrutural de equipamentos soldados, como as descontinuidades e as técnicas de ensaio não destrutivo; e analisar os procedimentos específicos de ultrassom na soldagem evidenciando as vantagens e limitações do ensaio por ultrassom convencional (pulso eco).

1.2 METODOLOGIA

O estudo se justifica pela necessidade de evidenciar a importância do ensaio não destrutivo ultrassom na análise e garantia da qualidade da solda, realizando uma pesquisa bibliográfica que evidencia a contribuição dessa ferramenta na perspectiva de diminuir o grau de incerteza na utilização de materiais ou peças de garantindo sua integridade, uma vez que detecta as reflexões provenientes do interior da peça examinada, localizando e interpretando suas possíveis descontinuidades.

Para realização deste estudo, usou-se como metodologia a pesquisa de revisão bibliográfica, que conta com fontes como: livros, revistas, jornais, teses, artigos científicos, entre outros, deram base para elaboração do referencial teórico.

O texto está organizado da seguinte forma: o primeiro capítulo trata dos fundamentos, do processo e tipos de soldagem. O segundo capítulo aborda a inspeção da qualidade e integridade estrutural de equipamentos soldados, as descontinuidades e defeitos dos processos de soldagem, bem como os tipos de ensaios não destrutivos que os identifica. E por último e não menos importante, o terceiro capítulo destaca o ensaio não destrutivo ultrassom na soldagem, em específico a técnica ultrassônica convencional (pulso eco).

2. FUNDAMENTOS DA SOLDAGEM

De acordo com Marques, Modenesi e Bracarense (2012), a soldagem vem ao longo do tempo consolidando seu espaço e sua importância no processo produtivo da indústria mundial. Ela tem um papel muito importante nos processos industriais, abrangendo tanto a fabricação quanto a recuperação de peças e equipamentos. A soldagem é hoje o principal processo usado na união permanente de peças metálicas, permitindo a montagem de conjuntos com rapidez, segurança e economia de material.

Ainda de acordo com os autores, a soldagem é largamente utilizada nas indústrias como método de união de duas ou mais peças e em alguns casos é utilizada especificamente para recuperar peças desgastadas. Atualmente, há na indústria, mais de 50 diferentes tipos de soldagem. Segundo a AWS (American Welding Society), solda pode ser definida como a união de metais ou não-metais através da aplicação de calor e pressão, ou somente pressão, podendo ainda ser usado ou não um metal de adição. A história da soldagem nos processos como conhecemos inicia-se, no ano de 1800, porém existem relatos de que esses tipos de processos eram utilizados há muitos anos, por volta de 4000 a.C, por brasagem e forjamento.

Mesmo com a expansão das técnicas de soldagem por forjamento no aço, na Idade Média, e com a tecnologia da redução dos óxidos, o processo o processo de soldagem permaneceu como um processo secundário de fabricação até o século XIX, quando a sua tecnologia começou mudar radicalmente, sobretudo a partir das experiências de Sir Humphrey Davy (1801-1806) com o arco elétrico, da descoberta do acetileno por Edmund Davy e do desenvolvimento de fontes produtoras de energia elétrica que possibilitaram o aparecimento dos processos de soldagem por fusão (MODENESI; MARQUES, 2005).

2.1 PROCESSOS DE SOLDAGEM

Segundo Marques, Modenesi e Bracarense (2012, p. 18), a soldagem é um “processo de união de materiais baseado nas forças de ligação química de natureza

similar às atuantes no interior dos próprios materiais, na região de ligação entre os materiais que estão sendo unidos”.

Para Santos (2015), soldagem é o termo utilizado para informar a operação de um processo de soldagem, independentemente do tipo, que tem a função de unir peças, e solda é o termo utilizado quando a operação é finalizada e o resultado gera um cordão de solda fundido com diluição parcial entre as peças. Para tal conceito, entende-se como metal base a peça que será soldada, e metal de adição, o material que será depositado no momento da soldagem, para ser diluído e compor a solda.

O processo conhecido como soldagem consiste em uma das formas de unir ou agregar materiais a partir de forças microscópicas, isso se dá quando existe uma aproximação de moléculas e ou átomos do material a ser unido podendo ainda ser adicionado um material entre os materiais a serem unidos (MODENESI, MARQUES, BRACARENSE, 2012). Os autores apontam que os processos de soldagem podem ocorrer de duas maneiras, ou seja, por pressão e ou fusão.

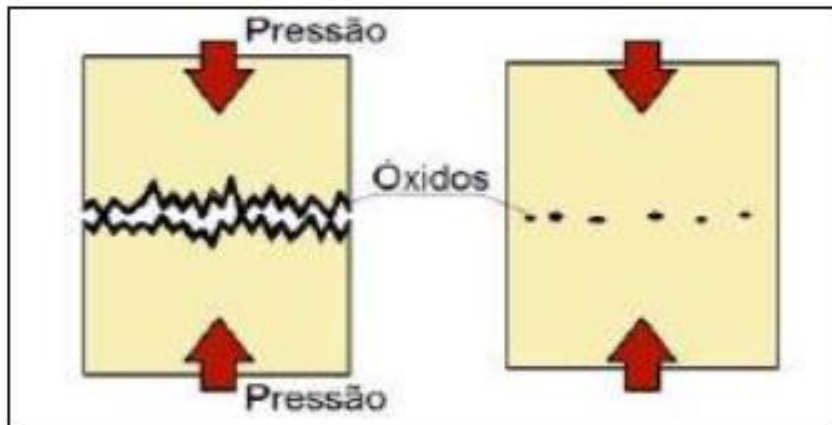
2.1.1. Soldagem por pressão

O processo de soldagem por pressão, ou deformação, de acordo com Modenesi, Marques e Bracarense (2012), é quando a união das peças acontece devido a uma alta pressão exercida sobre as superfícies dos materiais gerando deformações das mesmas aproximando as moléculas devido ao atrito. Esse tipo de soldagem consiste em deformar as superfícies de contato permitindo a aproximação dos átomos da ordem de r_0 .

Esse primeiro grupo inclui os processos de soldagem por ultrassom, fricção, por forjamento, por resistência elétrica, difusão, por explosão, entre outros. Diversos destes processos, como por exemplo, os processos de soldagem por resistência, apresentam características intermediárias entre os processos por fusão e por deformação. Por fins de classificação, estes processos serão incluídos neste grupo (MODENESI, MARQUES, 2005, p.10).

Ou seja, é praticamente um processo de colagem, onde duas peças se transformam em uma única através de uma pressão intensa sem o auxílio de energia térmica e sob condições normais do ambiente.

Figura 1. Soldagem por pressão ou deformação



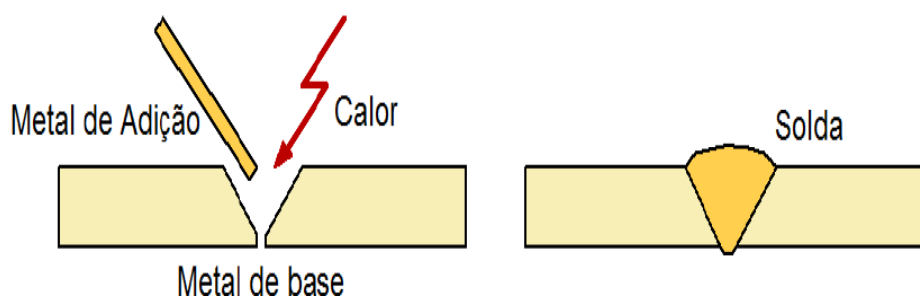
Fonte: Modenesi, Marques, Santos (2012, p.7)

2.1.2. Soldagem por fusão

Segundo Marques, Modenesi e Bracarense (2012) existe um grande número de processos por fusão que podem ser separados em subgrupos. Dentre estes, os processos de soldagem a arco elétrico são os de maior importância industrial na atualidade. Devido à tendência de reação do material fundido com os gases da atmosfera, a maioria dos processos de soldagem por fusão utiliza algum meio de proteção para minimizar estas reações.

A Figura 2 ilustra o processo de soldagem por fusão, em que ocorre uma ligação intra-atômica, ou seja, os átomos dos materiais em questão se unem por agitação intermolecular gerada por energia térmica, ocorrendo assim a solda.

Figura 2. Soldagem por fusão



Fonte: Modenesi, Marques, Santos (2012, p.7)

2.2. PRINCIPAIS PROCESSOS DE SOLDAGEM POR FUSÃO

De acordo com Modenesi e Marques (2005), o processo de soldagem por fusão inclui os processos de soldagem por eletro-escória, ao arco submerso, com eletrodos revestidos, com arame tubular, Metal Inert Gas (MIG)/Metal Active Gas (MAG), a plasma, Tungsten Inert Gas (TIG)/Gas Tungsten Arc Welding (GTAW), por feixe eletrônico, a laser e a gás.

Nesse tipo de soldagem, apenas as partes a serem unidas são aquecidas e o restante permanece em temperaturas muito inferiores. Isso se dá através da aplicação de energia térmica na área a ser unida até que haja a fusão do metal base e metal de adição. Há uma tendência às regiões aquecidas se dilatarem, mas este processo é dificultado pelas partes adjacentes estarem submetidas a temperaturas menores. O calor gerado através da energia aplicada, produz uma agitação intermolecular que faz com que as moléculas se excitam superficialmente formando poça de fusão e se liguem.

Quadro 1. Processos de soldagem por fusão

PROCESSO	FONTES DE CALOR	TIPO DE CORRENTE E POLARIDADE	AGENTE PROTETOR OU DE CORTE	OUTRAS CARACTERÍSTICAS	APLICAÇÕES
Soldagem por eletro-escória	Aquecimento por resistência da escória líquida	Contínua ou alternada	Escória	Automática/Mecanizada. Junta na vertical. Arame alimentado mecanicamente na poça de fusão. Não existe arco	Soldagem de aços carbono, baixa e alta liga, espessura ≥ 50 mm. Soldagem de peças de grande espessura, eixos, etc.
Soldagem ao Arco Submerso	Arco elétrico	Contínua ou alternada. Eletrodo +	Escória e gases gerados	Automática/mecaniz. ou semi-automática. O arco arde sob uma camada de fluxo granular	Soldagem de aços carbono, baixa e alta liga. Espessura ≥ 10 mm. Posição plana ou horizontal de peças estruturais, tanques, vasos de pressão, etc.
Soldagem com Eletrodos Revestidos	Arco elétrico	Contínua ou alternada. Eletrodo + ou -	Escória e gases gerados	Manual. Varetas metálicas recobertas por camada de fluxo	Soldagem de quase todos os metais, exceto cobre puro, metais preciosos, reativos e de baixo ponto de fusão. Usado na soldagem em geral.
Soldagem com Arame Tubular	Arco elétrico	Contínua. Eletrodo +	Escória e gases gerados ou fornecidos por fonte externa. Em geral o CO_2	O fluxo está contido dentro de um arame tubular de pequeno diâmetro. Automático ou semi-automático	Soldagem de aços carbono com espessura ≥ 1 mm. Soldagem de chapas
Soldagem MIG/MAG	Arco elétrico	Contínua. Eletrodo +	Argônio ou Hélio, Argônio + O_2 , Argônio + CO_2 , CO_2	Automática/mecaniz. ou semi-automática. O arame é sólido	Soldagem de aços carbono, baixa e alta liga, não ferrosos, com espessura ≥ 1 mm. Soldagem de tubos, chapas, etc. Qualquer posição
Soldagem a Plasma	Arco elétrico	Contínua. Eletrodo -	Argônio, Hélio ou Argônio + Hidrogênio	Manual ou automática. O arame é adicionado separadamente. Eletrodo não consumível de tungstênio. O arco é constrito por um bocal	Todos os metais importantes em engenharia, exceto Zn, Be e suas ligas, com espessura de até 1,5 mm. Passes de raiz
Soldagem TIG	Arco elétrico	Contínua ou alternada. Eletrodo -	Argônio, Hélio ou misturas destes	Manual ou automática. Eletrodo não consumível de tungstênio. O arame é adicionado separadamente.	Soldagem de todos os metais, exceto Zn, Be e suas ligas, espessura entre 1 e 6 mm. Soldagem de não ferrosos e aços inox. Passe de raiz de soldas em tubulações
Soldagem por Feixe Eletrônico	Feixe eletrônico	Contínua. Alta Tensão. Peça +	Vácuo ($\approx 10^{-4}$ mm Hg)	Soldagem automática. Não há transferência de metal. Feixe de elétrons focalizado em um pequeno ponto.	Soldagem de todos os metais, exceto nos casos de evolução de gases ou vaporização excessiva, a partir de 25 mm de espessura. Indústria nuclear e aeroespacial.
Soldagem a Laser	Feixe de luz		Argônio ou Hélio	Como acima	Como acima. Corte de materiais não metálicos
Soldagem a Gás	Chama oxi-acetilênica		Gás (CO , H_2 , CO_2 , H_2O)	Manual. Arame adicionado separadamente	Soldagem manual de aço carbono, Cu, Al, Zn, Pb e bronze. Soldagem de chapas finas e tubos de pequeno diâmetro

Fonte: Modenesi, Marques (2005, p.9)

2.2.1. Soldagem por eletrodo

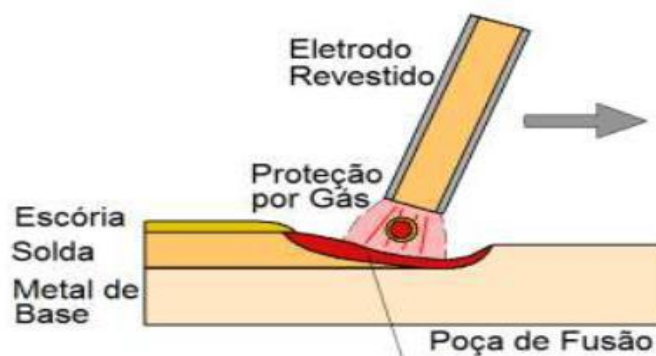
De acordo com Modenesi (2012), o processo de soldagem a arco elétrico com eletrodo revestido, em inglês, Shielded Metal Arc Welding (SMAW) é um método de soldagem no qual a união se dá por um arco elétrico estabelecido entre um eletrodo metálico revestido e as partes a serem soldadas. Ou seja, é um processo manual de soldagem que realizado com o calor de um arco elétrico mantido entre a extremidade de um eletrodo metálico revestido e a peça de trabalho.

O eletrodo revestido é constituído por uma vareta metálica chamada alma, recoberto por uma camada constituída de diferentes materiais, formando assim o revestimento do eletrodo. As funções principais do revestimento são: ionizar e estabilizar o arco elétrico, proteger a poça de fusão da contaminação atmosférica através da geração de gases, purificar a poça de fusão e criar uma escória para proteger o cordão de solda fundido (MODENESI; MARQUES; SANTOS, 2012).

Os gases produzidos durante a decomposição do revestimento e a escória líquida protegem o metal de solda da contaminação atmosférica durante a solidificação. Devido à sua versatilidade de processo e da simplicidade de seu equipamento e operação, a soldagem com eletrodo revestido é um dos mais populares processos de soldagem.

Esse processo de soldagem é amplamente utilizado na construção de estruturas de aço e na fabricação industrial. O processo é principalmente utilizado para soldar ferro e aço (incluindo o aço inoxidável), mas também podem ser soldadas com esse método ligas de níquel, alumínio e cobre. A figura a seguir, ilustra o processo de soldagem por eletrodo revestido.

Figura 3. Região do arco na soldagem com eletrodos revestidos.



Fonte: Modenesi, Marques (2000, p.11)

Nesse método de soldagem, as discontinuidades estruturais mais comuns no cordão são: porosidade, inclusão de escória, falta de fusão, falta de penetração, mordeduras e trincas (MODENESI, 2012). A tabela 2 apresenta as principais vantagens, limitações e aplicações da soldagem SMAW.

Quadro 2. Vantagens, limitações e aplicações do processo SMAW

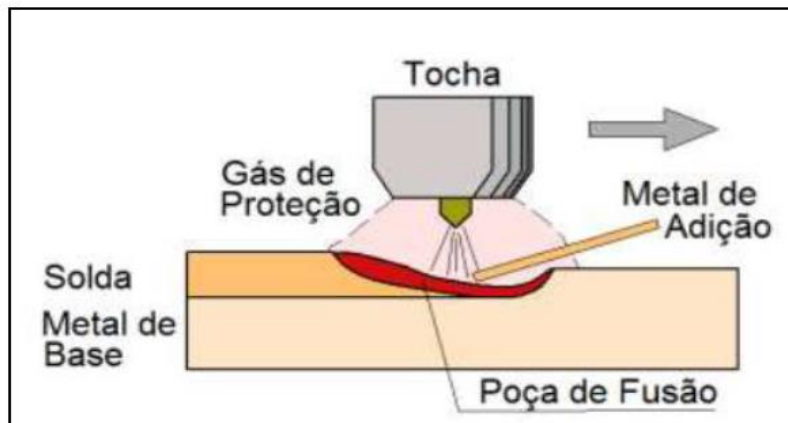
Vantagens e limitações	Aplicações
<ul style="list-style-type: none"> • Equipamento simples, portátil e barato. • Não necessita fluxos ou gases externos. • Pouco sensível à presença de correntes de ar (trabalho no campo). • Processo muito versátil em termos de materiais soldáveis. • Facilidade para atingir áreas de acesso restrito. • Aplicação difícil para materiais reativos. • Produtividade relativamente baixa. • Exige limpeza após cada passe. 	<ul style="list-style-type: none"> • Soldagem de produção, manutenção e em montagens no campo. • Soldagem de aços carbono e ligado. • Soldagem de ferro fundido. • Soldagem de alumínio, níquel e suas ligas.

Fonte: Modenesi, Marques (2000, p.12)

2.2.2. Soldagem TIG

O processo de soldagem Tungsten Inert Gas (TIG) ou Gas Tungsten Arc Welding (GTAW) é um método de soldagem no qual a união se dá por um arco elétrico estabelecido entre um eletrodo de tungstênio, não consumível, sendo a região de soldagem protegida por um gás inerte, como por exemplo, o argônio. Sua aplicação pode ser realizada de forma manual ou mecanizada, podendo ainda fazer a utilização de metal de adição ou não. Esse processo é considerado o mais controlável dos processos de soldagem a arco (MODENEZI; MARQUES; SANTOS, 2012). A Figura abaixo ilustra o processo de soldagem TIG.

Figura 4. Soldagem TIG



Fonte: Modenesi, Marques (2000, p.15)

Santos (2015) considera que o processo de soldagem TIG diferencia-se dos outros por ter um arco elétrico (plasma) que é pequeno e concentrado, dando a TIG. Esse plasma utiliza um eletrodo de tungstênio que é o condutor, uma proteção gasosa feita por gases inertes, que não reagem com a poça de fusão e a protegem das impurezas da atmosfera. Em termos básicos, os componentes do GTAW são: tocha, eletrodo, fonte de potência, gás de proteção.

É possível aplicar o processo TIG na união de numerosos metais e ligas e obter um ótimo resultado. Além de ser apropriado para aplicações a soldagem de chapas, tubos e peças fundidas para uso na indústria nuclear, aeroespacial, geração de energia, construção naval e outras indústrias, o processo garante qualidade na soldagem superior e quase livre de defeitos uma vez que o eletrodo, arco e metal fundido são protegidos por um envelope inerte de argônio ou gás hélio (TSENG, 2013).

Para Teixeira (2011), uma das principais características do processo é o controle da energia transferida para a peça enquanto ocorre a soldagem, esse controle independentemente da forma que o operador tem da fonte de calor e do metal de adição, os quais agem diretamente no processo, tornando-o adequado para soldas em peças de pequenas espessuras. Um ponto positivo é que um bom controle dessa variável gera pouca escoria e outro é o arco elétrico estável, concentrado e suave, facilitando a produção de soldas com boa qualidade e bom acabamento, além disso, o arco elétrico não gera salpicos, pois não há transferência de metal.

Esse tipo de soldagem é mais utilizado para aços ligados, aços inoxidáveis e ligas não ferrosas. A tabela 3 apresenta as principais vantagens, limitações e aplicações da soldagem GTAW.

Quadro 3. Vantagens, limitações e aplicações do processo GTAW

Vantagens e limitações	Aplicações
<ul style="list-style-type: none"> • Excelente controle da poça de fusão. • Permite soldagem sem o uso de metal de adição. • Permite mecanização e automação do processo. • Usado para soldar a maioria dos metais. • Produz soldas de alta qualidade e excelente acabamento. • Gera pouco ou nenhum respingo. • Exige pouca ou nenhuma limpeza após a soldagem. • Permite a soldagem em qualquer posição. • Produtividade relativamente baixa. • Custo de consumíveis e equipamento é relativamente elevado. 	<ul style="list-style-type: none"> • Soldagem de precisão ou de elevada qualidade. • Soldagem de peças de pequena espessura e tubulações de pequeno diâmetro. • Execução do passe de raiz em tubulações. • Soldagem de ligas especiais, não ferrosas e materiais exóticos.

Fonte: Modenesi, Marques (2000, p.16)

2.2.3. Soldagem MIG/MAG

Segundo Modenesi e Marques (2005), a soldagem a arco gás-metal (Gás Metal Arc Welding – GMAW) é um processo de soldagem a arco que produz a união dos metais pelo seu aquecimento com um arco elétrico estabelecido entre um eletrodo metálico contínuo e a peça.

Santos (2015) por sua vez, afirma que a soldagem MIG/MAG é o processo no qual a junção dos metais se dá pelo aquecimento através de um arco elétrico estabelecido entre um eletrodo de arame sólido contínuo e a peça de trabalho. A proteção se dá por uma corrente de gás inerte ou ativo. Quando são usados gases inertes, o processo é conhecido como MIG (Metal Inert Gas). A sigla M (metal) I (inerte) G (gás) informa que sua proteção é executada pela utilização de uma

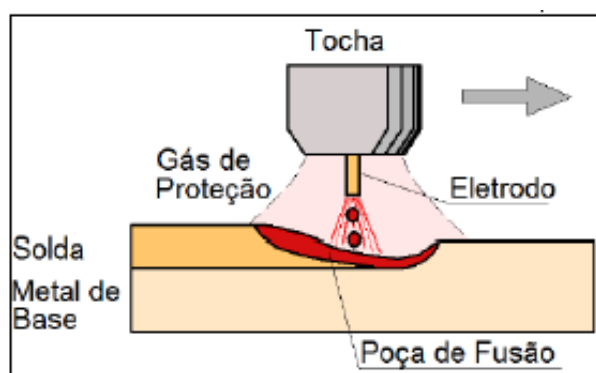
proteção gasosa de gás inerte, podendo ser usado o gás hélio, argônio ou a mistura dos dois.

Já quando se usa misturas ricas em gases ativos, o processo é conhecido como MAG (Metal Active Gas). A sigla M (metal) A (ativo) G (gás) utiliza a mesma fonte de energia do processo MIG, porém sua proteção gasosa é feita com gases ativos, que reagem com a poça de fusão, como é o caso do dióxido de carbono CO₂ puro ou a mistura argônio x CO₂. O metal de adição é diferente no processo, pois o eletrodo deve ser escolhido de acordo com o metal de base e a aplicação da solda (SANTOS, 2015).

A soldagem MIG/MAG usa a energia do arco elétrico como fonte de calor, conduzida pelo próprio eletrodo sem revestimento, alimentado de uma maneira contínua até o metal de base. Esse calor funde a extremidade do eletrodo e se deposita em uma poça, que é gerada na superfície da peça (metal base) para formar a solda (metal fundido).

Além disso, cada tipo de gás poderá facilitar um tipo de transferência metálica, assim depositando metal fundido de maneira mais rápida e de melhor aplicação, e em várias posições. Quando a utilização do processo da informação se dá MAG C, diz que se trabalha com CO₂ puro (100%). A figura abaixo ilustra esquematicamente o processo.

Figura 5. Soldagem MIG/MAG



Fonte: Modenesi, Marques (2000, p.18)

O processo é normalmente operado de forma semiautomática, quando o deslocamento da tocha é feito pelo soldador. Esse processo pode ser definido como automático, quando o deslocamento da tocha é executado mecanicamente por um

equipamento, ou robôs industriais. A tabela 4 apresenta as principais vantagens, limitações e aplicações da soldagem GMAW.

Quadro 4. Vantagens, limitações e aplicações do processo GMAW

Vantagens e limitações	Aplicações
<ul style="list-style-type: none"> • Processo com eletrodo contínuo. • Permite soldagem em qualquer posição. • Elevada taxa de deposição de metal. • Elevada penetração. • Pode soldar diferentes ligas metálicas. • Exige pouca limpeza após soldagem. • Equipamento relativamente caro e complexo. • Pode apresentar dificuldade para soldar juntas de acesso restrito. • Proteção do arco é sensível a correntes de ar. • Pode gerar elevada quantidade de respingos. 	<ul style="list-style-type: none"> • Soldagem de ligas ferrosas e não ferrosas. • Soldagem de carrocerias e estruturas de veículos. • Soldagem de tubulações, etc.

Fonte: Modenesi, Marques (2000, p.19)

3. INSPEÇÃO DA QUALIDADE E INTEGRIDADE ESTRUTURAL DE EQUIPAMENTOS SOLDADOS

A inspeção periódica dos equipamentos em serviço é uma importante metodologia de manutenção preventiva para muitas instalações industriais. De acordo com Modenesi (2012), a inspeção de juntas soldadas inclui um conjunto de atividades que devem ocorrer antes, durante e após o processo produtivo e que visam garantir a qualidade e a segurança do conjunto soldado.

O controle da qualidade é um processo abrangente, sendo que a inspeção da qualidade é uma atividade que o integra. Para a atividade de inspeção é a mais importante do sistema de avaliação da qualidade de um processo industrial. Na prática, a qualidade do processo de soldagem pode ser controlada por meio de três etapas de inspeção: antes, durante e após a realização da soldagem.

Segundo Ditchbrun et. al. (1996), o controle antes da soldagem, abrange, por exemplo, a análise e confecção do projeto de solda, qualidade do material utilizado (metal de base e consumíveis), certificação e qualificação dos profissionais soldadores e do procedimento utilizado, e equipamentos de soldagem. Controle durante a soldagem, que inclui o controle da armazenagem e utilização de eletrodos básicos, da preparação, montagem das juntas e da execução da soldagem. Enquanto o controle de qualidade após soldagem, consiste no monitoramento de produtos e equipamentos soldadas realizado através de inspeções não destrutivas e de ensaios destrutivos de componentes selecionados por amostragem ou de corpos de prova soldados juntamente com a peça. Nesse sentido, os Ensaios Não Destrutivos (END) têm sido muito utilizados na avaliação da integridade estrutural de elementos soldados e no acompanhamento on-line do processo produtivo.

O surgimento de novos materiais e inovações nos processos de soldagem, associado à evolução do processo produtivo e às novas exigências de mercado, geraram mudanças significativas na inspeção e certificação de peças e equipamentos soldados.

Segundo Modenesi (2000), a realização de soldas inadequadas durante a fabricação de certos tipos de estruturas ou equipamentos, tais como navios, pontes, oleodutos, componentes automotivos e vasos de pressão, pode resultar em sérios acidentes com grandes perdas materiais e, eventualmente, humanas e danos ao

meio ambiente. Por isso, esses tipos de operações devem prever a especificação de material (metal de base e consumíveis), projeto e preparação da junta, qualificações de procedimento e de operador e procedimento de inspeção.

Para Santos (2015), a qualidade do processo de soldagem está associada a parâmetros que devem ser controlados e têm influência direta na fusão dos materiais. Os três principais parâmetros são: tempo de solda, intensidade de corrente e força entre eletrodos. Na especificação do processo de soldagem, devem ser considerados a espessura da chapa, o material a ser soldado e o acabamento superficial desejado.

O processo de inspeção de qualidade visa demonstrar que, através do procedimento proposto, soldas adequadas, de acordo com os requisitos colocados pela norma ou estabelecidos em contrato, possam ser obtidas. Além disto, ele permite uniformizar e manter registro das condições especificadas de soldagem para controle do processo e eventual determinação de causas de falha.

Nesse sentido, existe um documento chamado de Especificação de Procedimento de Soldagem (EPS), no qual os valores permitidos de diversas variáveis do processo estão registrados para serem adotados, pelo soldador ou operador de soldagem, durante a fabricação de uma dada junta soldada.

De acordo com Modenesi (2012), nesse documento, variáveis importantes de um procedimento de soldagem e que, portanto, podem fazer parte de uma EPS incluem, por exemplo, a composição, classe e espessura do(s) metal(is) de base, processo(s) de soldagem, tipos de consumíveis e suas características, projeto da junta, posição de soldagem, temperatura de pré-aquecimento e entre passes, corrente, tensão e velocidade de soldagem, aporte térmico, número aproximado de passes e técnica operatória.

Para isto, amostras adequadas dos materiais devem ser preparadas e soldadas de acordo com a EPS. Corpos de prova devem ser retirados destas amostras e testados ou examinados, os resultados destes devem avaliados e, com base nos requerimentos estabelecidos pela norma, projeto ou contrato, o procedimento deve ser aprovado ou rejeitado (neste caso podendo ser convenientemente modificado e testado novamente). Para tal, vários e diferentes testes podem ser feitos com o objetivo de identificar descontinuidades e/ou defeitos.

3.1 DESCONTINUIDADES E DEFEITOS DOS PROCESSOS DE SOLDAGEM POR FUSÃO

Modenesi (2000), designa como descontinuidade qualquer interrupção da estrutura típica (ou esperada) de uma junta solda. Neste sentido, pode-se considerar, como descontinuidade, a falta de homogeneidade de características físicas, mecânicas ou metalúrgicas do material ou da solda.

Uma descontinuidade pode ser definida como qualquer interrupção na estrutura típica de uma junta soldada. Logo, caracteriza-se como descontinuidade a falta de homogeneidade das características físicas, mecânicas ou metalúrgicas do material. No entanto, para juntas soldadas, a existência de uma descontinuidade não significa a existência de defeitos. Juntas soldadas são consideradas defeituosas quando não atendem ao exigido em determinadas normas (ASM - Welding Inspection Handbook, 2000).

Para Santos,

Descontinuidades são pequenas deformidades que aparecem no material que podem interromper sua estrutura (separando-a), e sua quantidade poderá causar mudanças em suas propriedades, de acordo com o código, projeto ou contrato. Defeito é um conjunto de descontinuidades que se o número delas for alto em uma determinada região, e no contrato, código ou projeto está informado que essa quantidade está maior que o admitido, o cordão terá que ser refeito, ou a sua região ficará com problema (SANTOS, 2015, p. 133).

É importante destacar que na soldagem é muito raro se conseguir um cordão com zero defeito ou descontinuidade, por esse motivo são utilizadas as normas ASME ou AWS, para se poder verificar as condições permitidas para uma boa condição do cordão. As descontinuidades em juntas soldadas podem ser classificadas em dois tipos: descontinuidades dimensionais e descontinuidades estruturais.

3.1.1. Descontinuidades dimensionais

São descontinuidades dimensionais as provenientes de alterações nas dimensões ou na forma dos cordões de solda. Segundo Santos (2015), o dimensionamento de uma junta vem informado no projeto, nos desenhos e

simbologias, normatizado. Para que seja considerada irregular ela precisa estar fora desses padrões, e, caso isso aconteça, é necessária sua recuperação posterior.

O dimensionamento de uma junta vem informado no projeto, nos desenhos e simbologias, normatizado. Para que seja considerada irregular ela precisa estar fora desses padrões, e, caso isso aconteça, é necessária sua recuperação posterior.

Segundo Santos (2015), as descontinuidades dimensionais que podem ser consideradas são as seguintes:

a) distorção (a mudança da forma da peça depois de ter sofrido um grande aporte térmico);

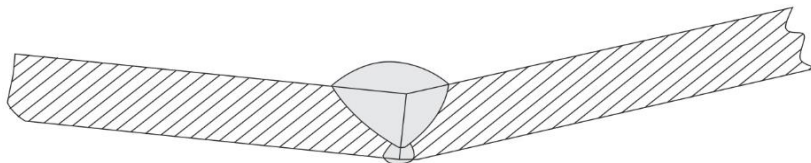
b) preparação incorreta da junta (execução de um chanfro fora das especificações do projeto, com o dimensionamento fora do programado e estudado) e dimensão incorreta da solda (todas as soldas são projetadas para suportar certa carga e se a dimensão não é executada de maneira correta o resultado poderá ser considerado defeituoso. Para que isso não ocorra, são utilizados gabaritos e ferramentas de medição);

c) perfil incorreto da junta: o perfil da solda é muito importante, pois se for executado de maneira errada o controle da solda poderá ter consequência desastrosas em trabalhos. As geometrias incorretas serão concentradoras de tensão, podendo iniciar uma fratura;

d) formato incorreto da junta: quando o posicionamento da peça ou o seu dimensionamento é inadequado, o resultado pode ser o desalinhamento das peças.

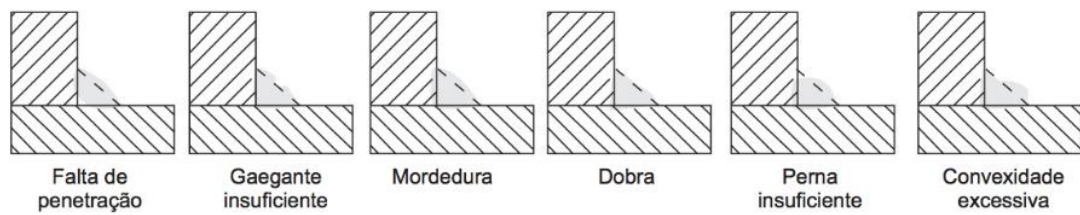
Dentre as descontinuidades dimensionais podem-se destacar a distorção de soldagem (Figura 6), o perfil incorreto da solda (Figura 7) e o desalinhamento das juntas (Figura 8), que está associado com o posicionamento ou dimensionamento inadequado das peças.

Figura 6. Distorção de soldagem



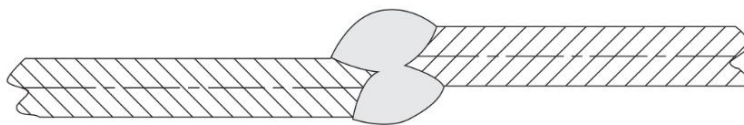
Fonte: Santos (2015, p.136)

Figura 7. Perfis incorretos da solda em ângulo



Fonte: Santos (2015, p.136)

Figura 8. Desalinhamento de junta de topo



Fonte: Santos (2015, p.136)

3.2.2. Descontinuidades estruturais

São descontinuidades estruturais as relacionadas à ausência de material ou a presença de material estranho na região soldada. Sua gravidade depende da extensão e da geometria da solda.

Para Modenesi (2000), as principais descontinuidades encontradas no processo de soldagem TIG são: mordeduras, trincas, porosidade, falta de penetração, inclusão / contaminação de tungstênio e oxidação do cordão. Enquanto que no processo de soldagem MIG/MAG, as principais descontinuidades encontradas são: porosidade, inclusão de escória, falta de fusão, falta de penetração, mordeduras e trincas.

Segundo Modenesi (2000) os gases que estão no fundo da poça de fusão se elevam formando a porosidade, o formato mais comum é o esférico. As principais causas da porosidade estão diretamente associadas a oxidação ou umidade do metal de base ou do arame de solda, pode ocorrer também em perturbações no gás de proteção, elevada vazão de gás e correntes de ar.

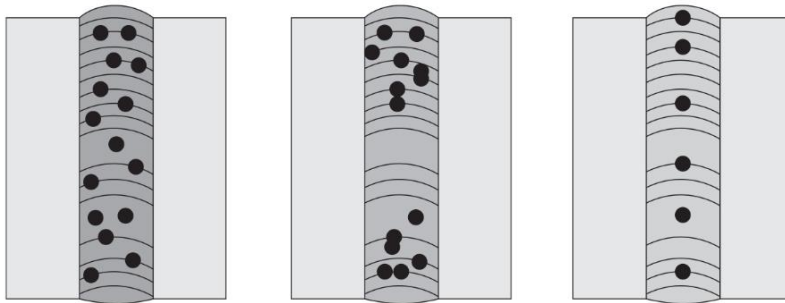
Segundo Santos (2015),

Porosidade é gerada por gases que durante o processo de soldagem se formam e que por algum procedimento ou parâmetro incorreto não

conseguem escapar e ficam presos na estrutura. Podem ser ainda gases contaminantes que da mesma maneira conseguem entrar, vencendo a proteção gasosa, e ambos ficam alojados na crista da solda no momento de sua solidificação. Normalmente, o formato do poro é esférico, porém, em alguns casos, pode ter formato alongado (poro vermiforme), que geralmente é associado ao hidrogênio (SANTOS, 2015, p. 135).

Os poros podem aparecer distribuídos na solda da seguinte forma: uniformemente distribuídos, agrupados, alinhados. A figura 9 apresenta os três tipos de porosidades. Conforme ESAB (2004), as causas mais prováveis da porosidade são a contaminação atmosférica e oxidação.

Figura 9. Tipos de porosidade: a) distribuída, b) agrupada e c) alinhada



Fonte: Santos (2015, p.137)

Wainer, Brandi e Mello (1992), descrevem que a descontinuidade por inclusão de escória acontece sempre que um metal estranho é retido na zona fundida. Para Modenesi (2000), acontece quando partículas de oxido ou outros sólidos ficam presos entre os passes de solda ou entre o cordão e o metal de base. Se entre passes a limpeza não ocorrer de forma correta, a escória gerada pelo cordão de solda pode não fundir e se tornar uma inclusão. As inclusões de escória podem agir como concentradores de tensão e favorecer o aparecimento de trincas, conforme figura 10.

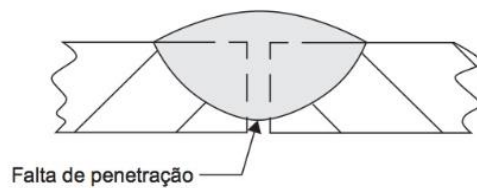
Figura 10. Inclusão de escória



Fonte: Santos (2015, p.138)

Conforme Wainer, Brandi e Mello (1992), a descontinuidade por falta de penetração se apresenta quando há uma falha ao se preencher completamente a raiz da junta. Ou seja, é quando o metal de adição não se funde com o metal de base, não ocorrendo a diluição dos dois materiais. Essa descontinuidade pode ocorrer por alguns fatores como: energia local muito baixa, movimento inadequado do eletrodo, falta de limpeza da junta, baixa energia de soldagem e solda de chanfros muito fechados.

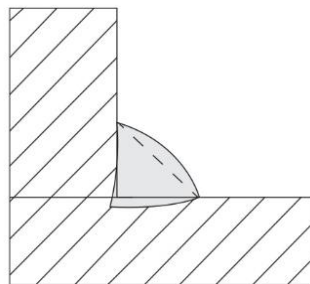
Figura 11. Demonstração de como é a falta de penetração.



Fonte: Santos (2015, p.139)

A descontinuidade de falta de fusão, por sua vez, tende a ser muito severa, podendo iniciar trincas, e também, como a seção do cordão fica menor que o projetado, pode facilitar a fratura, por não aguentar a carga que foi projetada (Figura 8.8). Modenesi (2000) diz que essa descontinuidade é um severo concentrador de tensões de onde trincas podem se originar. Outro fator importante é que a dimensão efetiva da solda se torna reduzida, diminuindo assim a resistência mecânica da junta, podendo facilitar a fratura, por não aguentar a carga que foi projetada

Figura 12. Falta de fusão em uma junta em ângulo.

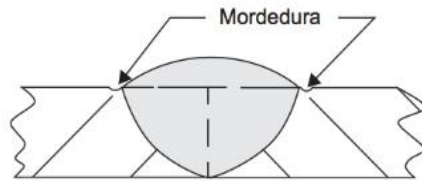


Fonte: Santos (2015, p.138)

Já a descontinuidade por mordedura é uma depressão na margem do cordão de solda, por falta de deposição do cordão de solda. Essa descontinuidade apresenta-se na forma de reentrâncias entre o cordão de solda e o metal de base. A

mordedura causa uma redução na seção da solda assim como é um ponto concentrador de tensão.

Figura 13 – Identificação de mordedura



Fonte: Santos (2015, p.139)

Conforme Modenesi (2000) as principais causas da mordedura são a falta de habilidade do soldador a manipular o eletrodo e parâmetros de soldagem errados, como velocidade elevada ou corrente elevada. A tendência à formação desta descontinuidade depende também do tipo de consumível (eletrodo, fluxo ou gás de proteção) usado.

Em relação às trincas, Modenesi (2000) classifica as trincas como resultado da atuação de tensões de tração (tensões transientes, residuais ou externas) sobre um material incapaz de resistir a elas, em geral, devido a algum problema de fragilização. Elas podem se formar durante, logo após a soldagem, em outras operações de fabricação subsequentes à soldagem ou durante o uso do equipamento ou estrutura soldada.

Sobre isso, Santos afirma que

Trincas são consideradas uma das descontinuidades mais graves, porque sua existência já é uma demonstração de que a fragilidade do material está comprometida, e ocorreu um erro na execução do cordão. Independentemente do tamanho, a trinca já iniciou uma destruição da estrutura do material. Se esse material for colocado em trabalho, os movimentos cíclicos farão com que a trinca se propague, levando o material à fratura. Essas trincas podem ser formadas durante o processo de soldagem, após a soldagem, em outras operações de fabricação subsequentes à soldagem, entre outras (SANTOS, 215, p. 140).

Figura 14. Após líquido penetrante e aplicação de revelador, duas trincas transversais do cordão.



Fonte: Santos (2015, p.140).

Conforme ESAB (2004), as causas prováveis das trincas são a composição incorreta do arame de solda, cordão de solda muito pequeno e má qualidade do metal de base soldado. Grande parte das trincas ocorre durante a fase de resfriamento. As trincas devem ser evitadas a todo custo e a sua identificação sempre deve ser priorizada objetivando garantir a integridade da junta soldada.

A existência de descontinuidades em uma junta não significa necessariamente que a mesma seja defeituosa. Esta condição depende da aplicação a que se destina o componente e é, em geral, caracterizada pela comparação das descontinuidades observadas ou propriedades medidas com níveis estabelecidos em um código, projeto ou contrato pertinente. Assim, considera-se uma junta soldada contém defeitos quando esta apresenta descontinuidades ou propriedades (neste caso, defeitos) que não atendam ao exigido, por exemplo, por um dado código. Juntas defeituosas precisam, em geral, ser reparadas ou, mesmo, substituídas.

3.2 ENSAIOS NÃO DESTRUTIVOS E SUAS APLICAÇÕES

O surgimento de novos materiais, associado ao projeto e desenvolvimento de equipamentos e estruturas soldadas têm motivado constantes transformações visando o aperfeiçoamento e o desenvolvimento dos processos de soldagem. Diante disso, para aumentar a confiabilidade e a integridade de equipamentos soldados, surgiram os Ensaio Não Destrutivos (END) como alternativa na inspeção industrial (WEINER et. al, 2005).

Os ensaios não destrutivos são ferramentas importantes no controle de qualidade, manutenção e avaliação da integridade estrutural dos equipamentos, e reúnem um conjunto amplo de técnicas utilizadas para avaliar determinadas propriedades de um material, garantindo sua integridade.

De acordo com Pereira (2013), os ensaios não destrutivos são cada vez mais essenciais e importantes na avaliação da integridade estrutural dos equipamentos industriais, permitindo de forma eficaz a detecção de descontinuidades internas e externas do material explorado. Os END possuem um elevado grau de confiabilidade porque a integridade estrutural dos materiais tem sua validação submetida por normas técnicas específicas.

Segundo Marques e Silva (2010), os ensaios não destrutivos, portanto, são técnicas utilizadas na inspeção de materiais e equipamentos sem danificá-los, sendo definidos como testes para o controle da qualidade, realizados sobre peças acabadas ou semiacabadas, para a detecção de defeitos ou falta de homogeneidade. Isso implica em uma técnica que é largamente utilizada nas indústrias, pois evita danos e prejuízos.

Já na concepção de Andreucci (2001), os ensaios não destrutivos se comparado com os ensaios destrutivos, se sobressaem de maneira significativa e positiva sobre estes, uma vez que o segundo possui um alto grau de facilidade de falhas e pouca precisão, causando danos também à peça. Ou seja, os ensaios não destrutivos possuem um alto grau de precisão e confiabilidade, e ainda não causam danos à peça inspecionada.

Quando aplicados adequadamente são capazes de proporcionar grandes retornos, por meio da economia de tempo, reduzindo as falhas dos equipamentos, promovendo assertividade nos diagnósticos de defeitos estruturais e aumento da qualidade da confiabilidade dos equipamentos industriais, garantindo uma extensão da vida útil do mesmo, por meio de manutenção preventiva e evitando interrupções desnecessárias.

Assim, mesmo sob o aspecto meramente financeiro, os ensaios não destrutivos são de extrema importância. Além disso, seu papel em segurança, falhas e consequentemente prevenção de acidentes não deixam dúvidas sobre a importância e necessidade desses ensaios nos processos de inspeção da qualidade.

Dessa forma, percebe-se que essas técnicas não destrutivas são empregadas em diversas etapas de produção, na manutenção, inspeção de equipamentos, e

apresentam como objetivo garantir o controle de qualidade e a segurança. Os métodos de END mais comuns são: inspeção visual, líquido penetrante, partículas magnéticas, raio-X, termografia, correntes parasitas, análise de vibração, estanqueidade e ultrassom.

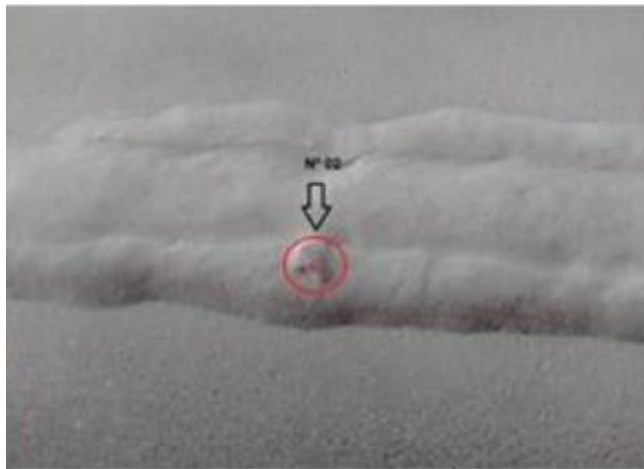
3.2.1. Ensaio líquido penetrante

Segundo Andreucci (2001), a técnica de ensaio por líquido penetrante utiliza de líquidos que tem a capacidade de penetrar em materiais (não porosos) podendo esses serem ferrosos ou não ferrosos para detectar falhas abertas a superfície através da ação da capilaridade. O tipo de líquido penetrante nesse método pode ser: fluorescente ou não fluorescente. Sendo os líquidos penetrantes fluorescentes utilizados em ambientes com pouca luminosidade e líquido penetrante colorido utilizado em ambientes onde há alta luminosidade.

Devido as suas características básicas pode ser aplicado em grande variedade de produtos metálicos e não metálicos, ferrosos e não ferrosos, sejam forjados, fundidos, cerâmicos de alta densidade e etc. desde que não sejam porosos. Podendo ser aplicado também no processo de fabricação, no produto acabado ou durante a manutenção, para detectar o surgimento das discontinuidades em serviço com resultados técnicos e economicamente satisfatórios na revelação de discontinuidades superficiais, por menores que sejam (COPECTEC, 2014).

A superfície a ser examinada e todas as áreas ao redor de pelo menos 25 mm devem ser limpas (eliminar graxa, óleo e outras sujidades). Após a limpeza inicial, aplica-se o líquido penetrante onde, por ação capilar, o penetrante migra para dentro de possíveis defeitos superficiais. Decorrido o tempo de penetração, o excesso de penetrante é removido com água, no caso de penetrantes fluorescentes solúveis em água; ou com um solvente, no caso de penetrantes à base de óleo. Depois que o produto utilizado na remoção do excesso de penetrante estiver seco, aplica-se o revelador na superfície a ser examinada. Por fim, o inspetor realiza a inspeção visual da solda à procura de possíveis defeitos (ALCAM, 2001).

Figura 15. Identificação das descontinuidades por líquido penetrante



Fonte: Farias (2014, p.57)

3.2.2. Ensaio radiográfico

Para Andreucci (2014), ensaio radiográfico é um método de inspeção que se baseia na absorção de radiação penetrante de (raio x e gama) diferenciada no material inspecionado. Nessa técnica, regiões diferentes da peça absorverão quantidades diferentes da radiação, por causa da diferença proporcionada na densidade e na variação de espessura. Essa absorção de radiação que é diferenciada poderá ser facilmente detectada através de um filme radiográfico, indicando assim o defeito interno de uma peça.

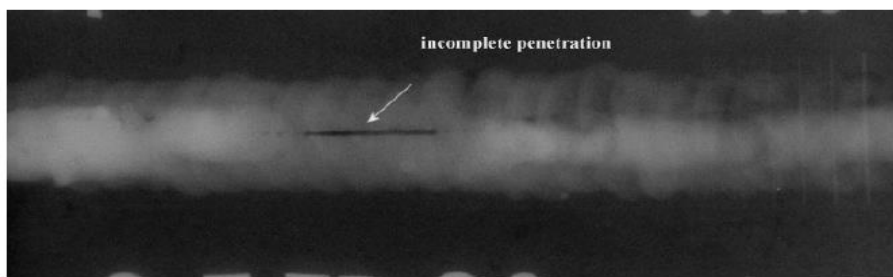
O ensaio radiográfico, juntamente com o ensaio ultrassônico e por partículas magnéticas são os principais métodos utilizados como fontes de informação na certificação e aceitação de soldas. que a radiografia, cujas bases são conhecidas à aproximadamente um século. O exame de soldas por radiografia, seja usando como fonte os raios-x ou raios gama, era considerado até o advento do ensaio ultrassônico, como o único método não destrutivo aceito para validação e certificação de equipamentos soldados (SILVA et. al, 2003).

Ainda de acordo com Silva (2003), o ensaio não destrutivo por radiografia, seja usando como fonte os raios-x ou raios gama, era considerado até o surgimento do ensaio ultrassônico, como o único método não destrutivo aceito para validação e certificação de equipamentos soldados.

Baseado na interação da radiação quando exposta a um meio com densidades diferentes, o ensaio radiográfico tem excelente capacidade de identificação de defeitos volumétricos, por exemplo, porosidade e inclusão de escória. Entretanto, a principal limitação deste ensaio é a baixa sensibilidade a defeitos planares, como trincas. Além disso, as questões de segurança devido aos riscos relacionados ao uso de radiações são desvantagens desta técnica, sobretudo para aplicações in-service (DITCHBRUN et. al, 1996).

Apesar de o ensaio radiográfico ter uma empregabilidade elevada, o ensaio por ultrassom tem se destacado atualmente como o principal método de inspeção e validação de estruturas soldadas (DITCHBRUN et. al, 1996).

Figura 16. Imagem radiográfica da falta de penetração da solda abaixo



Fonte: Andreucci (2014, p.07)

3.2.3. Ensaio por ultrassom

Segundo Andreucci (2014), o ensaio por ultrassom concorre diretamente com o ensaio radiográfico em razão de ambos detectarem descontinuidades internas nos materiais. Entretanto, a imagem radiográfica das descontinuidades apresentadas no material é sempre mais confiável e fácil de ser interpretada quanto comparada à indicação mostrada na tela do aparelho de ultrassom, que nem sempre é possível afirmar com certeza o tipo da descontinuidade detectada.

Andreucci (2014) aponta que as aplicações de ensaios ultrassônicos também vão além da análise de descontinuidades. São muito utilizadas para medição de espessuras, controle da taxa de corrosão, determinação de certas propriedades

físicas (características da micro e macroestrutura), e para a estimativa do tamanho de grão.

Segundo Marques e Silva (2012), o ensaio de ultrassom é um ensaio não destrutivo que consiste em introduzir energia sonora na forma de ondas ultrassônicas para o interior de materiais. Então a onda propaga-se e ao encontrar uma descontinuidade ou interface, parte da energia é refletida, e essa parcela de energia refletida gera sinais na tela do equipamento. A partir desses sinais é possível então obter informações como localização, profundidade, espessura, tamanho, e orientação do objeto que se deseja analisar.

Portanto, o exame ultrassônico, assim como todo END visa diminuir o grau de incerteza na utilização de materiais ou peças de responsabilidades relevantes (ANDREUCCI, 2014).

4. O ENSAIO NÃO DESTRUTIVO ULTRASSOM NA SOLDAGEM

O ensaio não destrutivo ultrassônico, assim como todo exame não destrutivo, visa diminuir o grau de incerteza na utilização de materiais ou peças de responsabilidades. Ele consiste em introduzir um feixe sônico de alta frequência no material que, ao percorrê-lo, é refletido por interfaces; as reflexões são detectadas e é feita uma análise para determinar a presença e a localização dessas interfaces revelando as possíveis discontinuidades.

As ondas sônicas são quase totalmente refletidas em interfaces metal-gás. Podem ocorrer reflexões parciais em interfaces metal-líquido ou entre um metal e outro sólido, sendo o percentual de energia dependente de certas propriedades físicas dos materiais que compõem a interface. Descontinuidades como trinca, poro, falta de fusão e outros tipos, podem ser detectadas por ultrassom, pois geram uma interface sólido-gás de fácil detecção. Outras discontinuidades como inclusões, falta de penetração e outras podem ser também detectadas por reflexão parcial ou espalhamento do feixe sônico, ou até mesmo pela produção de outros efeitos detectáveis (SILVA, I.C., 2003).

Na inspeção por ultrassom, as ondas acústicas interagem tanto com defeitos planares quanto com os defeitos volumétricos, tornando este ensaio capaz de detectar e dimensionar ambos os tipos. Por conta disso e com os recentes desenvolvimentos alcançados, a inspeção ultrassônica se estabeleceu como a principal técnica na avaliação de discontinuidades em juntas soldadas.

Figura 17. Indicação típica de ultrassom na tela do aparelho resultante da falta de penetração por solda

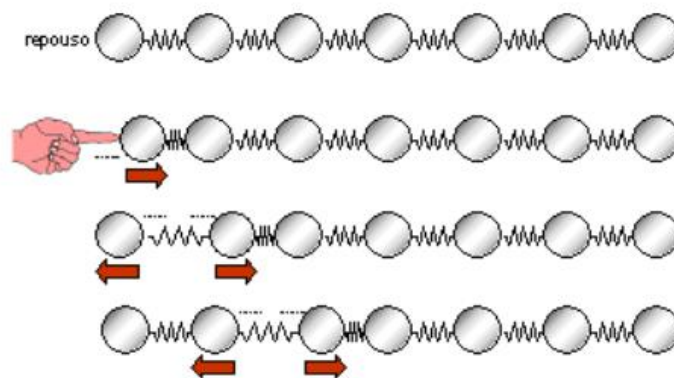


Fonte: Andreucci (2014, p.07)

De acordo com Andreucci (2014), o teste ultrassônico de materiais é feito com o uso de ondas mecânicas ou acústicas propagadas no meio em inspeção. Qualquer onda mecânica é composta de oscilações de partículas discretas no meio em que se propaga. A passagem dessas ondas no meio faz com que as partículas que compõem o mesmo, execute o movimento de oscilação em torno na posição de equilíbrio, cuja amplitude do movimento será diminuído com o tempo em decorrência da perda de energia adquirida pela onda.

Neste trabalho consideraremos as ondas longitudinais, as quais também podem ser chamadas de ondas compressivas e podem se propagar tanto em sólidos, quanto em líquidos e em gases (SANTIN, 2003). Este tipo de onda ultrassônica é o mais amplamente usado na inspeção de materiais (SANTIN, 2003). A Figura 18 ilustra o modo de propagação das ondas longitudinais.

Figura 18. Modo de propagação de uma onda longitudinal



Fonte: Andreucci (2014, p. 08)

4.1 VANTAGENS E LIMITAÇÕES DO ENSAIO POR ULTRASSOM

Segundo Andreucci (2014), o método de ensaio por ultrassom possui alta sensibilidade na detectabilidade de pequenas discontinuidades internas, trincas devido a tratamento térmico, fissuras e outros de difícil detecção por ensaio de radiações penetrantes (radiografia ou gamagrafia): e apresenta algumas vantagens, como por exemplo:

- Identificação de trincas devido a tratamento térmico, fissuras e outros de difícil detecção por ensaio de radiações penetrantes (radiografia ou gamagrafia).
- Aplicação para interpretação das indicações, que dispensa processos intermediários, agilizando a inspeção.
- Rapidez nos resultados, dispensando processos intermediários, pois no caso de radiografia ou gamagrafia, existe a necessidade do processo de revelação do filme, que via de regra demanda tempo do informe de resultados.
- Não requer planos especiais de segurança ou quaisquer acessórios para sua aplicação, ao contrário dos ensaios por radiações penetrantes.
- Garantia da identificação da localização, avaliação do tamanho e interpretação das discontinuidades encontradas são fatores intrínsecos ao ensaio por ultrassom, enquanto que outros exames não definem tais fatores.

Entretanto, anda de acordo com Andreucci (2014), o ensaio por ultrassom também apresenta suas limitações, uma vez que:

- Requer grande conhecimento teórico e experiência por parte do inspetor para realização e interpretação dos resultados do exame.
- Limitação nos registros permanentes dos resultados do ensaio, que não são facilmente obtidos.
- Faixas de espessuras muito finas constituem uma dificuldade para aplicação do método ultrassônico.
- A superfície da peça deve estar devidamente preparada para sua aplicação, sendo necessário, em alguns casos, a remoção total do reforço da solda, o que demanda tempo.
- A identificação da indicação detectada na tela do aparelho pode causar insegurança no inspetor.

4.2 TÉCNICA ULTRASSÔNICA CONVENCIONAL (PULSO ECO)

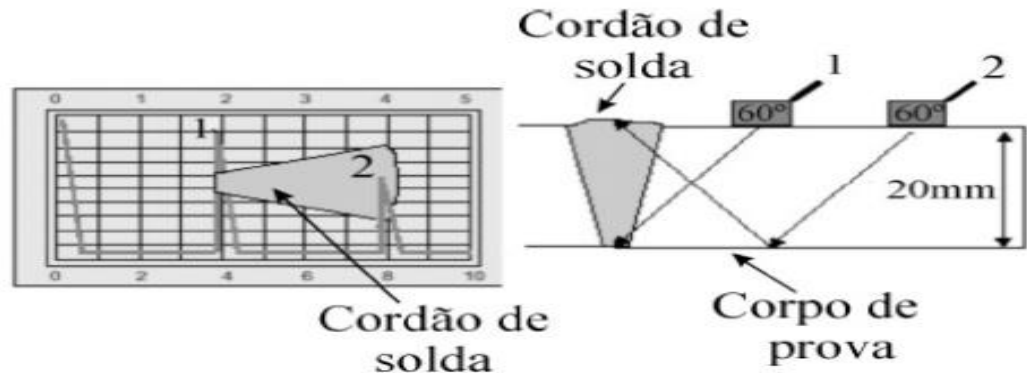
Dentre as técnicas ultrassônicas convencionais, o método pulso eco detecta descontinuidades presentes no material através dos ecos de reflexão provenientes das mesmas. Entretanto, assim como as demais técnicas tradicionais, esse método baseia-se na hipótese de que a descontinuidade possui uma orientação favorável à reflexão.

Segundo Veiga (2003), o pulso eco é a técnica ultrassônica mais largamente utilizada na indústria, devido, principalmente, a sua simplicidade e eficiência. A vantagem desta técnica é a grande sensibilidade para detecção de pequenas descontinuidades e precisão na detecção de descontinuidades no campo próximo do feixe sônico, aumentando assim a região de detecção de falhas internas no material.

Apesar de atingir grande velocidade de inspeção, alta probabilidade de detecção e baixa taxa de falsas indicações, a classificação de defeito através dos sinais ultrassônicos pela técnica pulso eco é uma tarefa muito difícil, mesmo para inspetores experientes e habilidosos, pois não é possível relacionar diretamente a amplitude e/ou posição do sinal refletido com a natureza do defeito (VEIGA et. al, 2003).

Segundo a norma ASTM E 164-03 (2003) a técnica pulso eco, ao utilizar feixes angulares e retos, fornece um meio eficiente de detecção de descontinuidades internas e superficiais, dentro da solda e na zona termicamente afetada. O procedimento de varredura deve ser estabelecido levando em consideração variáveis como espessura da solda, superfície disponível, tamanho de falha máxima permitida, orientação da falha e propriedades acústicas do material. Para aplicação da técnica são utilizados transdutores angulares e normais com a frequência variando de 1,0 a 5 MHz.

Figura 19. Técnica Pulso Eco aplicada a cordões de solda



Fonte: Veiga (2013, p.11)

Ou seja, a técnica ultrassônica pulso eco envolve a detecção de ecos produzidos pela reflexão, do pulso ultrassônico, em uma descontinuidade presente no material ou pela interface do corpo de prova. Quando o pulso emitido encontra uma superfície refletora, parte ou toda a energia é refletida, retornando ao transdutor.

A figura 19 mostra o feixe sônico do transdutor, incidindo na descontinuidade e gerando uma reflexão captada pelo mesmo transdutor, que é enviada como sinal ao aparelho, e mostrado na tela em forma de um pulso ou eco.

O ensaio por ultrassom consiste em introduzir um feixe sônico de alta frequência no material que, ao percorrê-lo, é refletido por interfaces; as reflexões são detectadas e é feita uma análise para determinar a presença e a localização dessas interfaces revelando as possíveis descontinuidades. A frequência sonora de ultrassom usada no teste de materiais é imperceptível à audição humana, localizando-se na faixa de 0,5 a 25 MHz (LEITE, 1977).

Um feixe ultrassônico, com características compatíveis com a estrutura do material a ser ensaiado, é inserido em direção favorável à descontinuidade (interface entre as chapas). Se refletido pela descontinuidade, será mostrado na tela do aparelho com um pico, denominado eco (MORÉ, 2004), exibido na tela do equipamento por gráficos. A identificação de descontinuidades se baseia na interpretação de série de sinais, originados da peça em análise.

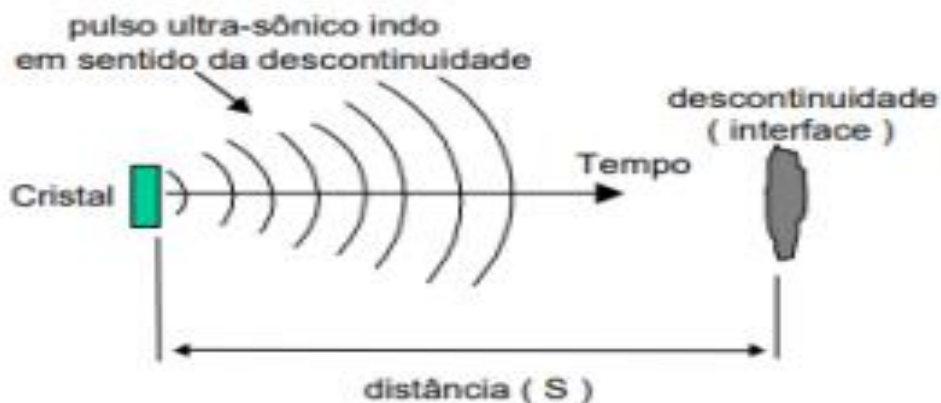
O teste ultrassônico de materiais é feito com o uso de ondas mecânicas ou acústicas propagadas no meio em inspeção, ao contrário da técnica radiográfica,

que usa ondas eletromagnéticas ou radiação ionizante. Qualquer onda mecânica é composta de oscilações de partículas discretas no meio em que se propaga. A passagem de energia acústica no meio faz com que as partículas que compõem o mesmo, execute o movimento de oscilação em torno na posição de equilíbrio, cuja amplitude do movimento será diminuído com o tempo em posição de equilíbrio, cuja amplitude do movimento será diminuído com o tempo em decorrência da perda de energia adquirida pela onda (ANDREUCCI, 2014, p.8).

Devido à simplicidade de aplicação e boa sensibilidade de detecção, diversos trabalhos foram desenvolvidos utilizando a técnica pulso eco. Veiga (2003) utilizou essa técnica em cordões de solda apresentando três condições: sem defeito, falta de penetração e porosidade. Os sinais ultrassônicos provenientes do ensaio pulso eco foram utilizados como entradas para um classificador neural, que foi capaz de classificar os sinais, com eficiência superior a 70%, em três condições: sem defeito, falta de penetração e porosidade.

Na técnica ultrassônica pulso eco, a onda ultrassônica ao incidir num anteparo qualquer ou ao incidir numa descontinuidade ou falha interna do meio elástico refletirá. As ondas refletidas provenientes do interior da peça examinada serão detectadas pelo transdutor, possibilitando a localização das descontinuidades (ANDREUCCI, 2014). Esse efeito pode ser ilustrado por meio da Figura 20.

Figura 20. Inspeção de materiais por ultrassom: transmissão da onda



Fonte: Andreucci (2014, p.21)

Figura 21. Inspeção de materiais por ultrassom: recepção da onda



Fonte: Andreucci (2014, p.21)

4.3 APARELHAGEM E PROCEDIMENTOS ESPECÍFICOS DE ULTRASSOM NA SOLDAGEM

O aparelho de ultrassom é basicamente um osciloscópio projetado para medir o tempo de percurso do som na peça ensaiada através da relação: $S = V \times T$ onde o espaço percorrido (S) é proporcional do tempo (T) e a velocidade de propagação (V), no material.

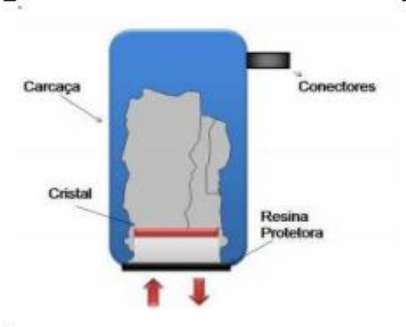
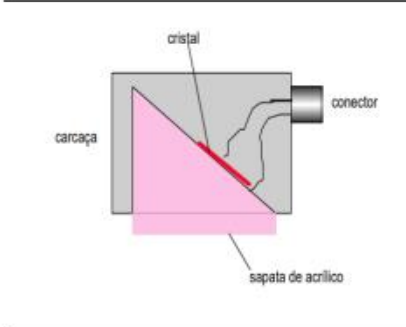
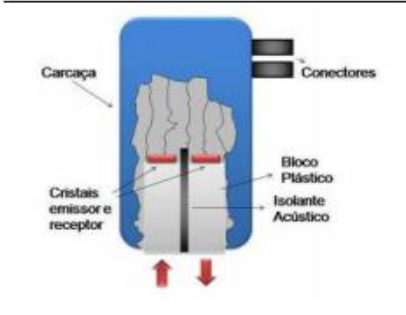
De acordo com Andreucci (2014), o aparelho de ultrassom contém circuitos eletrônicos especiais, que permitem transmitir ao cristal piezelétrico, através do cabo coaxial, uma série de pulsos elétricos controlados, transformados pelo mesmo em ondas ultrassônicas.

A execução de ensaios ultrassônicos se dá por meio de transdutores, que vem a ser um dispositivo que recebe um sinal e o retransmite, independentemente de conversão de energia. O principal elemento de um transdutor ultrassônico é um cristal piezelétrico, que se caracteriza pela propriedade de transformar energia elétrica em mecânica ou vice-versa, ou seja, o cristal quando submetido a uma pressão gera um campo elétrico que pode ser coletado como tensão elétrica. Então, quando aplicado a uma tensão elétrica, o cristal vibra. Materiais Piezelétricos

comuns são o Quartzo, Sulfato de Lítio, o Titanato de Bário, o Metaniobato de Chumbo e o Titanato Zirconato de Chumbo (ANDREUCCI, 2014, p. 20)

Os cristais acima mencionados são montados sobre uma base de suporte (bloco amortecedor) e junto com os eletrodos e a carcaça externa constituem o transdutor ou cabeçote propriamente dito. Existem três tipos usuais de transdutores: Reto ou Normal, o angular e o duplo – cristal. O transdutor normal tem sua maior utilização na inspeção de peças com superfícies paralelas ou quando se deseja detectar descontinuidades na direção perpendicular à superfície da peça, como chapas, fundidos e forjados.

Quadro 5. Transdutores mais utilizados

Transdutor Normal ou Reto	
	<ul style="list-style-type: none"> • Possui um cristal piezelétrico; • Geram ondas longitudinais normais a superfície de acoplamento; • Utilizado na inspeção de peças com superfícies paralelas ou quando se deseja detectar descontinuidades na direção perpendicular à superfície da peça.
Transdutor Angular	
	<ul style="list-style-type: none"> • Possui um cristal piezelétrico; • Cristal piezelétrico forma um determinado ângulo com a superfície do material; • Utilizado na inspeção de soldas quando a descontinuidade está orientada perpendicularmente à superfície da peça.
Transdutor de Duplo-Cristal	
	<ul style="list-style-type: none"> • Possui dois cristais piezelétricos, um funcionando apenas como receptor e o outro apenas como emissor; • Geram ondas longitudinais normais a superfície de acoplamento; • Utilizado na detecção de descontinuidades próximas da superfície e em medição de espessura

Fonte: Andreucci (2014, p.21)

Os sinais captados são representados na tela em forma de pulsos luminosos também chamados de “ecos”. Eles podem ser regulados tanto na amplitude, como posição na tela graduada e se constituem no registro das descontinuidades encontradas no interior do material.

Figura 22. Equipamento de ultrassom industrial



Fonte: Andreucci (2014, p.24)

Os medidores de espessura por ultrassom podem se apresentar com circuitos digitais ou analógicos, e são aparelhos simples que medem o tempo do percurso sônico no interior do material (própria espessura).

Esses aparelhos são bastante úteis para medição de espessuras de chapas, tubos, taxas de corrosão em equipamentos industriais, porém para a obtenção de bons resultados, é necessária sua calibração antes do uso.

Figura 23. Medidor de espessura digital ultrassônico GE modelo DM4E



Fonte: Andreucci (2014, p.24)

A calibração do instrumento para uso, deve ser feita usando no mínimo duas espessuras no bloco, conforme a faixa de espessura a ser medida. O instrumento deve ser ajustado para indicar a espessura correta das duas graduações selecionadas de acordo com padrões específicos e orientações do fabricante.

Depois da calibração é necessário ajustar a sensibilidade do aparelho para detectar as descontinuidades preestabelecidas como defeitos. O sinal de retorno é atenuado em função da distância da descontinuidade à superfície. Para isso, pode-se tomar como referência um corpo de prova conhecido.

A superfície a ser ensaiada deve estar limpa e isenta de tintas, carepas, óxidos e quaisquer outras substâncias que venham a interferir no acoplamento e movimentação do cabeçote. A preparação da superfície pode ser escovada, lixada ou esmerilhada.

Logo em seguida, pode-se acoplar o transdutor sobre a peça. Depois, é só movimentar lentamente o transdutor sobre toda a superfície a ser ensaiada, efetuando uma varredura na peça. Essa varredura deve ser feita pelo menos em duas superfícies da peça, pois dependendo da posição da descontinuidade (topo, transversal ou longitudinal) o sinal será maior ou menor.

Há situações em que o ensaio com transdutores normais não é possível. É o caso de uma chapa de aço soldada. A inspeção do cordão de solda é praticamente impossível com os cabeçotes normais já vistos. Por isso, devemos usar cabeçotes angulares, que enviam pulsos em determinados ângulos com a superfície do material, como por exemplo 35°, 45°, 60°, 70°, 80° etc. Nesse caso usamos transdutores angulares.

De acordo com Andreucci (2014) uso de acoplantes é de fundamental importância na realização do ensaio, visto que o ar é um pobre transmissor de ondas com mega-hertz de frequência, além do que, a diferença de impedância acústica entre o ar e os materiais sólidos é tão grande que uma pequena camada de ar reduzirá significativamente a transmissão das ondas sônicas do transdutor para a peça. O acoplantes mais usuais são: água, óleo, glicerina, graxas e carboxi-metil-celulose.

De acordo com Miranda (2011), nos ensaios ultrassônicos, ondas de tensão são aplicadas no material através de uma perturbação, e então, os feixes que são, ou transmitidos, ou refletidos pelas descontinuidades geométricas, pelos defeitos, danos, pelas não-homogeneidades micro e macroestruturais, pelas interfaces,

dentre outros fatores, devem ser monitorados e interpretados. Segundo Greene (2014), é necessária a utilização de um acoplador em forma de água ou gel para que ocorra a transmissão efetiva do som através da interface com o compósito. END ultrassônicos utilizam em geral pulsos ultrassônicos na faixa dos 2,25 MHz aos 10 MHz (MIRANDA, 2011).

Este método é o mais utilizado, principalmente por ser um método de aplicação simples, exigindo poucos dispositivos ou equipamentos e requer o acesso a apenas uma das superfícies. Ele pode ser realizado em superfícies com altas temperaturas com a utilização de cabeçotes específicos para estas condições.

Figura 24. Ultrassom convencional

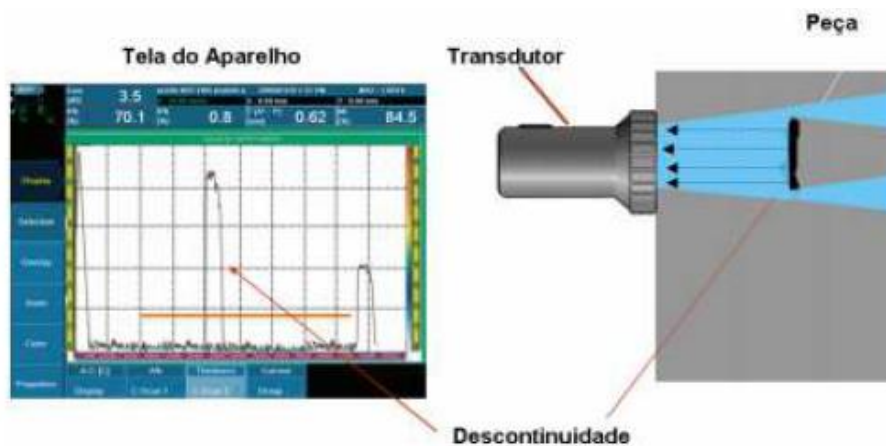


Fonte: <https://www.revistaadnormas.com.br/2019/12/17/o-ensaio-de-ultrassom-em-soldas>

No método não destrutivo ultrassom pulso eco o transdutor em contato com a peça através de um acoplante, emite pulsos de energia sônica que são introduzidos no material em intervalos regulares de tempo. Se os pulsos encontrarem uma superfície refletora, parte ou toda a energia é refletida e retorna ao transdutor, que converte as vibrações em energia elétrica e a transforma em um sinal no aparelho.

A figura 25 representa bem a detecção de descontinuidades, pois mostra o feixe sônico do transdutor, incidindo na descontinuidade e gerando uma reflexão captada pelo mesmo transdutor, que é enviada como sinal ao aparelho, e mostrado na tela em forma de um pulso ou eco

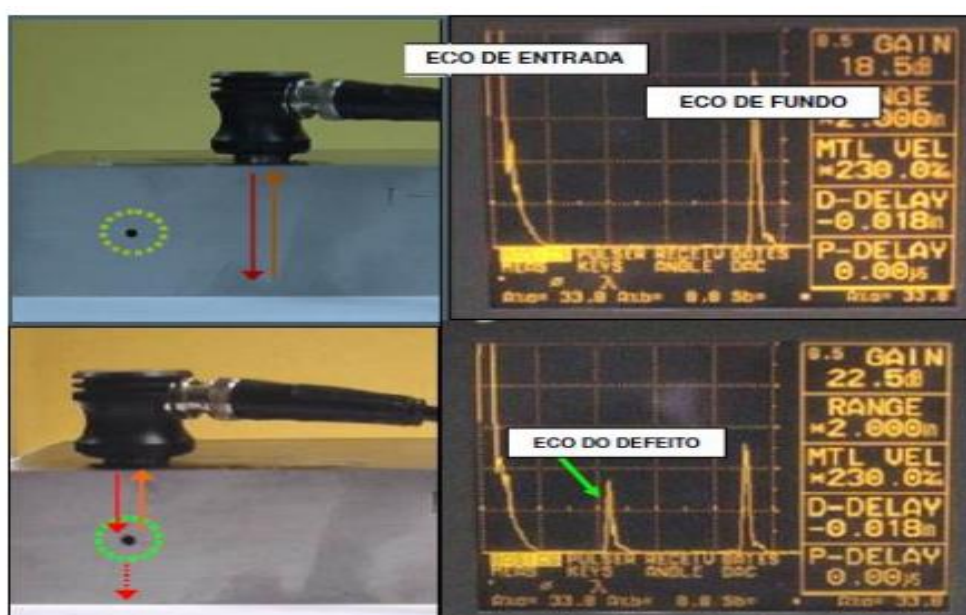
Figura 25. Princípio básico da Inspeção de materiais por ultrassom



Fonte: Andreucci (2014, p.04)

Assim, tanto a quantidade de energia refletida como o tempo percorrido entre a transmissão do pulso inicial e a recepção são medidos pelo equipamento. Este processo de emissão e recepção de pulsos de energia ultrassônica é repetido para cada pulso sucessivo. A figura 26 apresenta um ensaio não destrutivo de ultrassom pulso eco onde se percebe a representação gráfica na tela quando o cristal localiza uma descontinuidade.

Figura 26. Pulso ultrassônico



Fonte: Miranda (2011, p.48)

Em consequência, percebe-se as características, fundamentos e contribuições do método não destrutivo ultrassom pulso eco na identificação de descontinuidades e defeitos nos processos de soldagem. Além disso, vale destacar que toda tecnologia aplicada no desenvolvimento e melhoria dos ensaios não destrutivos e atribuído a importância que essa ferramenta se destina, influem diretamente na garantia e proteção da vida das pessoas que dependem diretamente ou indiretamente, do bom funcionamento de componentes, equipamentos e serviços, seja esse em qualquer segmento industrial.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente trabalho de conclusão de curso evidenciou a importância da inspeção por ultrassom como um método não destrutivo que se reveste de grande relevância na indústria de materiais, sendo uma ferramenta indispensável para o controle da qualidade do produto final acabado, diminuindo o grau de incerteza na utilização de materiais ou peças de responsabilidade e o desperdício de partes utilizadas em ensaios destrutivos.

Para tal, foi apresentado os fundamentos e principais tipos de processos de soldagem utilizado nas indústrias com suas características e as possíveis descontinuidades pertinentes dos processos. Na garantia de identificação e eliminação de possíveis erros e descontinuidades (oriundas dos processos), e da qualidade em produtos e/ou serviços foi apresentado os métodos de ensaios não destrutivos comumente usadas nas indústrias, suas técnicas de aplicabilidade bem como seu poder de detecção, em especial, o ensaio não destrutivo ultrassom.

Nesse contexto em que a temática se desenvolveu, foi possível destacar com sua relevância e complexidade, evidenciando-se a importância da utilização do ensaio não destrutivo ultrassom na análise e garantia da qualidade da solda, por meio da obtenção informações sobre a integridade dos materiais, peças e equipamentos garantindo qualidade na produção sem alterar suas propriedades físicas e químicas.

Este trabalho se propunha a apresentar uma revisão bibliográfica sobre a inspeção de produtos e equipamentos soldados utilizando ensaios não destrutivos, com destaque para ensaio ultrassônico, evidenciando-se a sua relevância e aspectos práticos. O estudo mostrou, portanto, que o ensaio ultrassônico se reveste de grande importância na indústria de materiais, sendo uma ferramenta indispensável para o controle da qualidade do produto final acabado, diminuindo o grau de incerteza na utilização de materiais ou peças de responsabilidade e o desperdício de partes utilizadas em ensaios destrutivos. Desta forma, fica evidente a importância do desenvolvimento contínuo de pesquisas sobre o assunto.

REFERÊNCIAS

- ALCAN, Soldagem do alumínio e ligas, Livro, 1ª edição, São Paulo, Alcan S/A, 2001.
- ANDREUCCI, R. **Ensaio por ultrassom**. Associação Brasileira de Ensaio Não Destrutivos E Inspeção. São Paulo: 2014.
- _____, R. **Líquidos Penetrantes**. Abende, 2001.
- _____, R. **Radiologia Industrial**, 2003.
- ASM - **Welding Inspection Handbook**, 3ª ED, AMERICAN SOCIETY OF WELDING, 2000. ASTM – NORMA E164-03, Standard Practice For Ultrasonic Contact Examination Of Weldments, 2003.
- BASTOS, G. F. Importância do ensaio por ultrassom para garantia da qualidade da solda. Belo Horizonte, 2018.
- COPERTEC, 2014 – *Ensaio por Líquido Penetrante*. Disponível em: <<http://www.copertec.com/servicos/index.php?a=2&insp=3>>, acesso em 29/10/14.
- DITCHBURN, R. J., et al, NDT of Welds: State of The Art, NDT&E International, 1996.
- FARIAS. E. L. **Ensaio não destrutivo por líquido penetrante: aplicado em chapas soldadas por arame tubular, eletrodo revestido e processo mig**. Rio de Janeiro, 2014.
- MARQUES, P. V.; SILVA, S. F. **Ensaio não destrutivos**. Belo Horizonte, 2010.
- MIRANDA, Marcos. **Comparação entre métodos de inspeção não-destrutiva aplicados a peças compostas laminadas sólidas estruturais aeronáuticas**. 2011. 194 f. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação Interunidades em Ciência e Engenharia de Materiais, Escola de Engenharia e Institutos de Física e Química de São Carlos, Universidade de São Paulo. São Carlos, 2011.
- MODENESI, P. J. **Terminologia Usual de Soldagem e Símbolos de Soldagem**. Belo Horizonte, abr. 2012. Disponível em: <http://demet.eng.ufmg.br/wpcontent/uploads/2012/10/terminologia.pdf>
- _____, P. J. **Descontinuidades e Inspeção em Juntas Soldadas. Apostila Soldagem I**. Belo horizonte: UFMG, 2000.
- MODENESI, P. J., MARQUES P. V., **Introdução aos Processos de Soldagem. Apostila Soldagem I**, Belo Horizonte: UFMG, 2005.
- _____, Paulo J.; MARQUES, Paulo Villani; BRACARENSE, Alexandre Queiroz. **Introdução a Metalurgia da Soldagem**, Belo Horizonte, janeiro 2012. Disponível em: <http://demet.eng.ufmg.br/wp-content/uploads/2012/10/metalurgia.pdf>

NASCIMENTO, R. A., SANTOS, S. W. A., SILVA JUNIOR, M. E. **Importância do ensaio de ultrassom para a construção de uma linha de tubulação em aço carbono API 5L GR.B, destinada ao transporte de hidrocarboneto em alta temperatura.** Edição Especial de Engenharias. Vol. 5 – N° 2 - Dezembro, 2019.

PEREIRA, J. A. V. **Estudo e Aplicação de Ensaio Não Destrutivos Líquidos Penetrantes, Ultra Sons, Radiografia Digital, Técnica Tangencial, Medições de Espessuras.** 2013.

SANTIN, J., **Ultrassom, Técnica e aplicação,** pg 5-7, 93, 2003.

SANTOS, C. E. F. **Processos de soldagem: conceitos, equipamentos e normas de segurança.** São Paulo: Érica/Saraiva, 2015.

SILVA, S. G., SILVA, I. C., REBELLO, J. M. A., **Avaliação do Erro entre a Técnica do Tempo de Percurso da Onda Difrata – TOFD (Time of Flight Diffraction) e as Técnicas Convencionais na Inspeção de Cordões de Aço,** In: 6ª COTEQ, 2002.

SOLDAGEM MIG MAG - ESAB, 2004. Disponível na Internet <http://www.esab.com.br>, acessado em novembro de 2022.

TSENG, K.-H. Development and application of oxide-based flux powder for tungsten inert gas welding of austenitic stainless steels, Powder Technology 233 pp. 7279. (2013)

VEIGA, J. L. B. C., ALVES, A. C., SILVA, I. C., REBELLO, J. M. A., **Automação da Análise do Ensaio Ultra-Sônico Pulso-Eco Utilizando Redes Neurais Artificiais,** In: PANDT, Rio de Janeiro, 2003.

WAINER, E.; BRANDI, S. D.; MELLO, F. D. H. **Soldagem: Processos e Metalurgia.** São Paulo, Editora Bluncher, 2012.

TEIXEIRA, G.S. Análise da influência dos parâmetros de soldagem sobre a geometria do cordão de solda depositado pelo processo de soldagem TIG-MAG em tandem. Dissertação de mestrado. Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), Porto Alegre, 2011.