

Universidade Federal de Minas Gerais  
Departamento de Engenharia Mecânica

Monografia de Especialização em Soldagem

IMPORTÂNCIA DO ENSAIO POR ULTRASSOM PARA GARANTIA DA  
QUALIDADE DA SOLDA

Autores: Gilberto de Figueiredo Schitine Bastos  
Lycia Paiva Noronha da Silva  
Junho/2018

Gilberto de Figueiredo Schitine Bastos  
Lycia Paiva Noronha da Silva

IMPORTÂNCIA DO ENSAIO POR ULTRASSOM PARA GARANTIA DA  
QUALIDADE DA SOLDA

Monografia apresentada ao curso de pós-graduação da Universidade Federal de Minas Gerais, como requisito parcial para obtenção do título de Especialista em Engenharia de Soldagem.

Orientador: Paulo Villani Marques

Belo Horizonte  
Escola de Engenharia da UFMG  
2018

B327i Bastos, Gilberto de Figueiredo Schitine.  
Importância do ensaio por ultrassom para garantia da qualidade da solda [manuscrito] / Gilberto de Figueiredo Schitine Bastos, Lycia Paiva Noronha da Silva. – 2018.  
39 f., enc. : il.

Orientador: Paulo Villani Marques.

“Monografia apresentada ao Curso de Especialização em Engenharia de Soldagem da UFMG, como requisito à obtenção do título de Especialista em Engenharia da Soldagem.”

Bibliografia: f. 38-39.

1. Soldagem. 2. Ultrassom. I. Silva, Lycia Paiva Noronha da. II. Marques, Paulo Villani. III. Universidade Federal de Minas Gerais. Escola de Engenharia. IV. Título.

CDU: 621.791

## **AGRADECIMENTOS**

Agradecemos primeiramente a Deus pelo dom da vida, e por ter nos proporcionado chegar até aqui.

Agradecemos aos nossos familiares pela dedicação, amor e paciência durante esse período.

Aos colegas do curso, pela amizade e companheirismo nessa longa jornada de estudo e dedicação.

Aos queridos professores, que sempre estiveram dispostos a ajudar e a contribuir para nosso aprendizado. Vocês foram chave fundamental na nossa formação, obrigada pela maestria e amor ao transmitirem conhecimento.

Agradecemos em especial ao Doutor Paulo Villani, pela orientação, apoio e atenção que nos foi dada nessa caminhada, seus ensinamentos foram fundamentais para realização desse trabalho.

## RESUMO

A soldagem é o processo de união de materiais, e do ponto de vista industrial é o mais importante. A soldagem apresenta grande versatilidade, em relação aos diferentes tipos de processos, tipos de ligas metálicas e da variação das espessuras que podem ser unidas. Praticamente em todos os processos de soldagem, são aplicados na região da junta, energia térmica e mecânica, o que tende a causar uma série de efeitos mecânicos (aparecimento de distorções e de tensões residuais) e metalúrgicos (mudanças de microestrutura e alteração de propriedades). Esses efeitos juntamente com as descontinuidades nas soldas, podem prejudicar o desempenho dos componentes soldados, e conseqüentemente causar falhas prematuras. O ensaio por Ultrassom tem sido uma aliada ferramenta para detecção e análise dessas possíveis descontinuidades, garantindo assim a confiabilidade da junta soldada.

Palavras chaves: Soldagem, Descontinuidades, END, Ultrassom.

## **ABSTRACT**

Welding is a joining materials process and is the most important from the industrial point of view. Welding presents great versatility, related to the different processes, types of metal alloys and the variation of the thicknesses that can be joined. In, practically all welding processes thermal and mechanical energy are applied in the joint region, which tends to cause a series of mechanical effects (appearance of distortions and residual stresses) and metallurgical (changes in microstructure and properties). These effects, allied with the discontinuities in the welds, can impair the performance of welded components, and consequently cause their premature failure. Ultrasound testing has been an allied tool for detecting and analyzing these possible discontinuities, thus ensuring the reliability of the welded joint.

Keywords: Welding, Discontinuities, Non-Destructiv Test, Ultrasound

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Soldagem com eletrodos revestidos .....	7
Figura 2 - Soldagem GMAW .....	8
Figura 3 - Soldagem SAW .....	10
Figura 4 - Princípio Básico da inspeção de materiais por ultrassom .....	13
Figura 5 - Campo de audibilidade das vibrações mecânica .....	14
Figura 6 - Ondas longitudinais .....	15
Figura 7 - Ondas transversais .....	15
Figura 8 - Cabeçote normal .....	17
Figura 9 - Cabeçote angular .....	17
Figura 10 - Cabeçote duplo-cristal .....	18
Figura 11 – Tipos de juntas.....	19
Figura 12 – Tipos de juntas e chanfros .....	20
Figura 13 – Esquema dos tipos de porosidade (a) distribuída, (b) agrupada e (c) alinhada .	22
Figura 14 – Inclusão de escória .....	23
Figura 15 – Falta de fusão .....	24
Figura 16 – Falta de penetração .....	24
Figura 17 – Mordedura .....	25
Figura 18 – Trinca no centro do cordão de solda .....	25
Figura 19 – (a) Formação de ondas características do ToFD (b) Exemplo de um sinal tipo A-Scan característico do ToFD.....	33

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Processos de soldagem por fusão .....	6
Tabela 2 - Vantagens, limitações e aplicações da soldagem com eletrodo revestidos.....	7
Tabela 3 - Vantagens, limitações e aplicações da soldagem com arames tubulares .....	9
Tabela 4 - Vantagens, limitações e aplicações da soldagem GTAW.....	10
Tabela 5 - Vantagens, limitações e aplicações da soldagem SAW.....	11

## LISTA DE ABREVEATURAS E SÍMBOLOS

ASME	– American Society of Mechanical Engineers
ABNT	– Associação Brasileira de Normas Técnicas
SMAW	– Shielded Metal Arc Welding
SAW	– Submerged Arc Welding
GTAW	– Gas Tungsten Arc Welding
GMAW	– Gas Metal Arc Welding
FCAW	– Flux-Cored Arc Welding
END	– Ensaios Não Destrutivos

## SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	1
1.1. Justificativa .....	2
2. OBJETIVO.....	3
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	4
3.1. Definição de Soldagem .....	4
3.2. Importância da Soldagem na Fabricação de Estruturas e Equipamentos.....	4
3.3. Principais Processos de Soldagem por Fusão .....	5
3.3.1. Soldagem por Eletrodo Revestido (Shielded Metal Arc Welding - SMAW).....	6
3.3.2. Soldagem GMAW (Gas Metal Arc Welding - GMAW) .....	8
3.3.3. Soldagem com arame Tubular (Flux Cored Arc Welding - FCAW).....	9
3.3.4. Soldagem GTAW (Gas Tungsten Arc Welding - GTAW).....	9
3.3.5. Soldagem SAW (Submerged Arc Welding - SAW).....	10
3.4. Breve histórico dos métodos acústicos.....	11
3.5. Princípios do ensaio ultrassônico .....	12
3.5.1. Princípios Básicos .....	13
3.5.2. Modos de propagação .....	14
3.5.2.1. Ondas longitudinais.....	15
3.5.2.2. Ondas transversais .....	15
3.5.2.3. Ondas superficiais.....	16
3.6. Tipos de Cabeçotes .....	16
3.6.1. Cabeçote Normal.....	16
3.6.2. Cabeçote Angular.....	17
3.6.3. Cabeçote duplo-cristal .....	18
3.6.4. Transdutor Phased Array.....	18
4. DESENVOLVIMENTO .....	19
4.1. Fabricação de Juntas Soldadas .....	19
4.1.1. Chanfros.....	19
4.1.2. Influência da escolha do chanfro .....	20
4.1.3. Soldagem em chanfros estreitos – Narrow gap Welding.....	21
4.2. Descontinuidades.....	21
4.2.1. Porosidades.....	22
4.2.2. Inclusões de Escória.....	23
4.2.3. Inclusão de Tungstênio.....	23
4.2.4. Falta de fusão.....	23
4.2.5. Falta de penetração.....	24

4.2.6.	Mordeduras .....	24
4.2.7.	Trincas.....	25
4.3.	Inspeção de juntas soldadas .....	26
4.4.	Inspeção por ultrassom .....	27
4.4.1.	Aparelhos e cabeçotes .....	27
4.4.2.	Preparação da superfície.....	28
4.4.3.	Acoplante .....	28
4.4.4.	Técnica de varredura.....	28
4.4.5.	Procedimento de ensaio .....	29
4.4.6.	Qualificação do pessoal.....	29
4.4.7.	Critério de aceitação de juntas soldadas, co conforme Código ASME Sec. VIII Div.1 , Div. 2 e Sec. I. (Tradução livre).....	29
4.5.	Vantagens do ultrassom em relação a outros ensaios não destrutivos.....	30
4.5.1.	Ensaio por Líquido Penetrante.....	30
4.5.2.	Ensaio por Partículas Magnéticas.....	30
4.5.3.	Ensaio por Radiografia .....	31
5.	NOVAS TÉCNICAS DE ULTRASSOM .....	32
5.1.	Técnica TOFD.....	32
5.1.1.	Aplicação Técnica TOFD.....	33
5.1.2.	Vantagens da técnica TOFD.....	34
5.2.	Técnica PHASED ARRAY.....	34
5.2.1.	Aplicação Técnica Phased Array .....	35
5.2.2.	Vantagens da Técnica Phased Array.....	35
6.	CONCLUSÃO .....	36
7.	BIBLIOGRAFIA.....	37

## 1. INTRODUÇÃO

Nos últimos anos as empresas têm intensificado suas buscas por alternativas para garantir a integridade e confiabilidade de seus produtos e equipamentos. Durante a fabricação, especificamente nos processos que envolvam soldagem, uma maior atenção deve ser dada, visto que essa operação envolve muitos fenômenos físicos e metalúrgicos como, fusão, solidificação, deformações que podem resultar em grandes problemas.

Os ensaios não destrutivos (END) são uma dessas alternativas e são de fundamental importância nos mais diversos setores, como naval, petroquímico, siderúrgico, espacial, dentre outros, na avaliação da integridade de produtos e equipamentos, pois não interferem nem prejudicam o uso ou processamento posterior desses após sua realização. As principais razões para o uso dos END são garantir a qualidade dos produtos, prevenir acidentes e perdas de vidas humanas, além de aumentar os lucros dos fabricantes. Os principais ensaios não destrutivos são ultrassom, líquido penetrante, correntes parasitas, radiografia, partículas magnéticas, ensaio visual dentre outros. A confiabilidade dos END depende da correlação entre a propriedade de interesse e a propriedade realmente medida, e para isso devem ser considerados o material inspecionado, o método de fabricação e aplicação do equipamento ou material inspecionado.

O ensaio por ultrassom consiste na introdução de um feixe sônico de alta frequência no material inspecionado, com objetivo de detectar, localizar e dimensionar descontinuidades internas e superficiais. É um dos ensaios mais importantes, se comparado a outros métodos não destrutivos, pois apresenta diversas vantagens tais como: elevado poder de penetração, alta precisão na determinação da localização, além de alta portabilidade.

O objetivo desse trabalho é discutir a confiabilidade do ensaio por ultrassom na avaliação de juntas soldadas, e evidenciar quais as principais vantagens e limitações desse em relação a outros ensaios não destrutivos.

## **1.1. Justificativa**

A inspeção por ultrassom é de grande importância na verificação industrial de materiais, é um método indispensável para o controle da qualidade do produto final. Defeitos como trincas, laminações, rechupes, poros, falta de fusão, podem ser facilmente detectados por ultrassom.

Com a necessidade de detectar discontinuidades 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 de soldagem ter conhecimentos sobre os efeitos do processo de soldagem, e como o ensaio por ultrassom pode ser um forte aliado na detecção de discontinuidades, garantindo assim uma maior confiabilidade dos componentes soldados.

## **2. OBJETIVO**

O presente trabalho tem como objetivo discutir a confiabilidade do ensaio por ultrassom 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 por exemplo, a radiografia.

### **3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

#### **3.1. Definição de Soldagem**

Classicamente, pode-se definir soldagem como um processo de união, porém, esses processos, também são usados para a deposição de material sobre uma superfície, com intuito de recuperar peças desgastadas, e também podem ser usados para revestimentos em operações que necessitem de características especiais. Abaixo, algumas definições citadas no livro de Soldagem – Fundamentos e Tecnologia, (Villani, Modenesi, Bracarense, 2016)

"Operação que visa obter a união de duas ou mais peças, assegurando, na junta soldada, a continuidade de propriedades físicas, químicas e metalúrgicas".

"Operação que visa obter a coalescência localizada, produzida pelo aquecimento até uma temperatura adequada, com ou sem a aplicação de pressão e de metal de adição." (American Welding Society - AWS)

"Processo de junção de materiais no qual as forças de união estabelecidas entre as partes sendo unidas são de natureza similar àquelas existentes no interior das partes e responsáveis pela própria existência destas como materiais sólidos (isto é, as forças de ligação química)"

#### **3.2. Importância da Soldagem na Fabricação de Estruturas e Equipamentos**

Na atualidade, a soldagem é o principal processo usado na união permanente de peças metálicas. A soldagem permite versatilidade, segurança, rapidez e economia de material. Comparado com outros processos de ligação, a soldagem tem apresentado diversas vantagens. Em ligação de chapas metálicas com parafusos ou rebites, é exigido que a chapa seja furada, logo, há uma perda de seção de até 10%, que deve ser compensada por uma espessura maior das peças. Quando comparado soldagem a fundição, percebe-se que a soldagem é mais viável, pois permite uma

grande variação de espessura na mesma peça, flexibilidade em relação a alterações nos projetos, e custos muito menores, se comparado aos custos da fundição.

Em relação aos tipos de uniões de partes metálicas, a soldagem apresenta grande versatilidade, permitindo a união na maioria das ligas, além da soldagem em materiais dissimilares.

Quanto a espessura, pode-se unir, através dos diferentes tipos de processos uma imensa variedade de espessuras.

Por fim, em relação aos ambientes, a soldagem pode ser utilizada desde o chão da fábrica até altas estruturas ou debaixo d'água.

### **3.3.Principais Processos de Soldagem por Fusão**

A soldagem por fusão se baseia na aplicação em pontos específicos de calor na região da junta a ser soldada, até a sua fusão e do metal de adição (quando houver). Existe muitos processos por fusão, e eles podem ser separados por subgrupos. A tabela 1 mostra os principais processos de soldagem por fusão e suas características principais.

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 $\geq 50$ 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 $\geq 10$ 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. Vareta metálica recoberta 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 $\geq 1$ 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 $\geq 1$ 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 ( $>10^{-4}$ 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 oxiacetilênica		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

TABELA 1 - PROCESSOS DE SOLDAGEM POR FUSÃO

Fonte: (Marques, Modenesi, Bracarense, 2016)

Os processos que utilizam o arco elétrico são os mais utilizados na indústria, por isso serão rapidamente apresentados a seguir.

### 3.3.1. Soldagem por Eletrodo Revestido (Shielded Metal Arc Welding - SMAW)

Processo no qual a junção dos metais se dá pelo calor de um arco elétrico, mantido entre um eletrodo metálico revestido e a peça de trabalho.

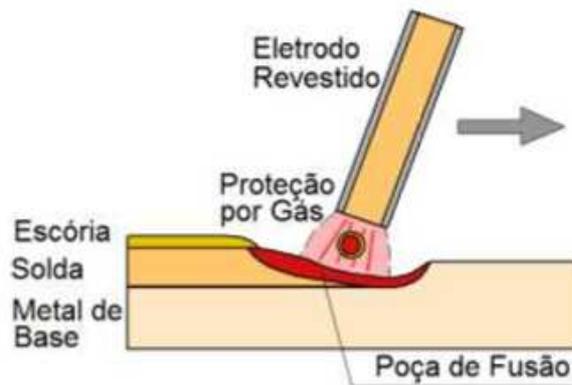


FIGURA 1 - SOLDAGEM COM ELETRODOS REVESTIDOS

Fonte: (Marques, Modenesi e Santos, 2012)

O eletrodo revestido consiste em uma vareta metálica, chamada “alma”, essa conduz corrente elétrica e fornece metal de adição para enchimento da junta. A alma é recoberta por camada de minerais chamada de “Revestimento”, que tem a função de estabilizar o arco elétrico, ajustar a composição química do cordão, pela adição de elementos de liga, proteger a poça de fusão.

A tabela 2 mostra as vantagens, limitações e aplicações do uso do eletrodo revestido.

Vantagens e limitações	Aplicações
Equipamento simples, portátil e barato.	Soldagem de produção, manutenção e em montagens no campo.
Não necessita fluxos ou gases externos.	Soldagem de aços carbono, baixa e alta liga.
Pouco sensível à presença de correntes de ar.	Soldagem de ferro fundido.
Processo extremamente versátil em termos de materiais soldáveis.	Soldagem de alumínio, níquel e suas ligas.
Facilidade para atingir áreas de acesso restrito.	
Aplicação difícil para materiais reativos.	
Produtividade relativamente baixa.	
Exige limpeza após cada passe de soldagem.	

TABELA 2 - VANTAGENS, LIMITAÇÕES E APLICAÇÕES DA SOLDAGEM COM ELETRODO REVESTIDOS

Fonte: (Marques, Modenesi e Santos, 2012)

### 3.3.2. Soldagem GMAW (Gas Metal Arc Welding - GMAW)

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), já quando se usa misturas ricas em gases ativos, o processo é conhecido como MAG (Metal Active Gas). A figura 2 ilustra esquematicamente o processo.

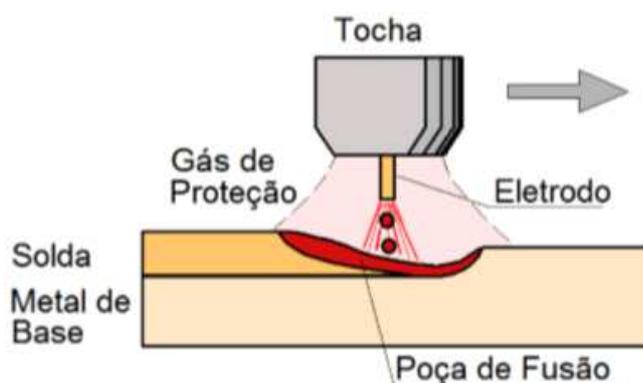


FIGURA 2 - SOLDAGEM GMAW

Fonte: (Marques, Modenesi e Santos, 2012)

A soldagem MIG/MAG tem sido intensamente utilizada na fabricação e manutenção de equipamentos e peças metálicas, e na recuperação de peças desgastadas, e nos revestimentos de superfícies metálicas.

Esse processo apresenta diversas vantagens de soldagem se comparado ao eletrodo revestido, dentre elas pode-se destacar:

- Elevadas taxas de deposição;
- Grande versatilidade em relação ao tipo de material, posição de soldagem e espessuras aplicáveis;
- Não necessita operações para remoção de escória, devido a não existência de fluxos.
- Exige menos habilidade do soldador.

Por outro lado, o processo GMAW apresenta algumas limitações como:

- Alta sensibilidade a variação dos parâmetros elétricos de operação do arco de soldagem;
- Maior custo de equipamentos e manutenção;
- Pode gerar elevada quantidade de respingo

### 3.3.3. Soldagem com arame Tubular (Flux Cored Arc Welding - FCAW)

Processo no qual a junção dos metais se dá pelo aquecimento através de um arco elétrico estabelecido entre um eletrodo tubular contínuo e a peça de trabalho. Esse processo é bem semelhante com GMAW, em relação a equipamentos e princípios de funcionamento.

Existem duas variações principais: soldagem auto protegida, na qual toda a proteção é feita pelo fluxo interno, e soldagem com proteção gasosa, nessa a proteção é complementada por um gás, geralmente CO<sub>2</sub>. A tabela 3 mostra as vantagens, limitações e principais aplicações do processo.

Vantagens e limitações	Aplicações
Elevada produtividade e eficiência.	Soldagem de aços carbono, baixa e alta liga.
Soldagem em todas as posições.	Soldagem de fabricação e de manutenção.
Custo relativamente baixo.	Soldagem de partes de veículos.
Produz soldas de boa qualidade e aparência.	Soldagem de montagem no campo.
Equipamento relativamente caro.	
Pode gerar elevada quantidade de fumos.	
Necessita limpeza após soldagem.	

TABELA 3 - VANTAGENS, LIMITAÇÕES E APLICAÇÕES DA SOLDAGEM COM ARAMES TUBULARES

Fonte: (Marques, Modenesi e Santos, 2012)

### 3.3.4. Soldagem GTAW (Gas Tungsten Arc Welding - GTAW)

Processo no qual a junção dos metais se dá pelo aquecimento através de um arco elétrico estabelecido entre um eletrodo de tungstênio, não consumível e as peças a unir. A poça de fusão e o arco são protegidos por uma coluna de gás inerte ou mistura de gases inertes. Esse processo, também conhecido como TIG (Tungsten Inert Gas), tem como característica o excelente controle da energia transferida, isso

se dá, pelo controle independente da fonte de calor e da adição de metal de enchimento. A tabela 4 mostra as vantagens, limitações e principais aplicações do processo.

Vantagens e limitações	Aplicações
Excelente controle da poça de fusão.	Soldagem de precisão ou de elevada qualidade.
Permite soldagem sem o uso de metal de adição.	Soldagem de peças de pequena espessura e tubulações de pequeno diâmetro.
Pode ser usado para soldar a maioria dos metais.	Execução do passe de raiz em tubulações.
Produz soldas de alta qualidade e excelente acabamento.	Soldagem de ligas especiais, não ferrosas e materiais exóticos.
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.	

TABELA 4 - VANTAGENS, LIMITAÇÕES E APLICAÇÕES DA SOLDAGEM GTAW.  
 Fonte: (Marques, Modenesi e Santos, 2012)

### 3.3.5. Soldagem SAW (Submerged Arc Welding - SAW)

Processo no qual a junção dos metais se dá pelo aquecimento através de um arco elétrico estabelecido entre um eletrodo metálico nu, e a peça de trabalho.

O arco e a peça são protegidos por uma camada de material mineral granulado, conhecido por fluxo, enquanto o eletrodo é alimentado continuamente.

A figura 3 ilustra esquematicamente o processo.

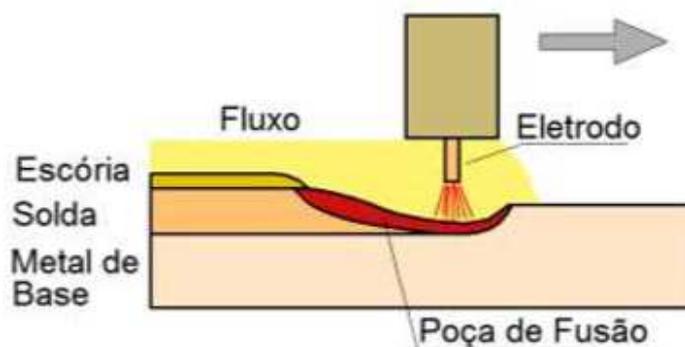


FIGURA 3 - SOLDAGEM SAW  
 Fonte: (Marques, Modenesi e Santos, 2012)

O calor que é gerado pelo arco funde o eletrodo e parte da camada do fluxo e metal base, formando assim a poça de fusão.

O fluxo na região próxima ao arco é fundido e forma a escória sobre o cordão de solda. A parte que não foi fundida do fluxo, pode ser utilizada em novas operações. A tabela 5 mostra as vantagens, limitações e principais aplicações do processo.

Vantagens e limitações	Aplicações
Alta velocidade de soldagem e elevada taxa de deposição.	Soldagem de aços carbono, baixa e alta liga.
Produz soldas uniformes e de bom acabamento superficial.	Soldagem de níquel e suas ligas.
Ausência de respingos e fumos.	Soldagem de membros estruturais e tubos de grande diâmetro.
Dispensa proteção contra radiação uma vez que o arco não é visível.	Soldagem em fabricação de peças pesadas de aço.
Facilmente mecanizado.	Soldagem de recobrimentos, manutenção e reparo.
Elevada produtividade.	
Soldagem limitada às posições plana e filete horizontal.	
Aporte térmico elevado pode prejudicar propriedades da junta em alguns casos.	
Necessidade de retirada de escória entre passes.	

TABELA 5 - VANTAGENS, LIMITAÇÕES E APLICAÇÕES DA SOLDAGEM SAW.

Fonte: (Marques, Modenesi e Santos, 2012)

### 3.4. Breve histórico dos métodos acústicos

Desde a antiguidade o ser humano utiliza o som para determinar o estado dos materiais. A diferença de som emitido por peças ao serem marteladas, auxiliava na inspeção de materiais como vidro, cerâmica e metal. No entanto, com a necessidade de detectar discontinuidades cada vez menores, foi preciso uma mudança dos testes audíveis para testes mais sofisticados, utilizando-se assim o ultrassom.

A geração e detecção de ondas ultrassônicas só foi possível com a descoberta do efeito piezométrico, feita pelos irmãos Pierre e Jaques Curie em 1880. Eles verificaram que amostras retiradas de uma maneira determinada de alguns cristais produziam diferença de potencial elétrico quando submetidas à pressão. Um ano após, Lippman apresentou a teoria do efeito piezoelétrico inverso, que consiste na

mudança da forma do cristal pela aplicação de uma diferença de potencial elétrico e a sugestão de que estes materiais (cristais) poderiam produzir vibrações pela aplicação de um sinal elétrico alternado adequado. (SANTIN,2003)

O primeiro aparelho para ensaio por ultrassom foi desenvolvido em 1942 por D. O. Sproule, um físico que trabalhava para Kelvin & Hugues. Entretanto, foi Sokolov na Rússia, em 1929, que primeiro registrou experiências usando cristais de quartzo para introduzir vibrações ultrassônicas em materiais. Sokolov demonstrou que ondas ultrassônicas poderiam ser utilizadas no lugar de raios X para detectar discontinuidades em materiais. Estes estudos, além dos desenvolvidos por um grupo de alemães (Mulauser, Pohlman e outros) eram baseados no método de transmissão sônica e teve grande sucesso na inspeção de fundidos. Porém, até o desenvolvimento do método pulso-eco por Sproule, os resultados não foram satisfatórios em forjados e outros materiais com grande atenuação sônica (GÓMES, 1982).

Na Alemanha depois da segunda Guerra Trost e Gots, e Firestone nos EUA, haviam desenvolvidos independentemente, sistemas similares.

Já no Brasil, foi somente em 1979 que essa técnica teve reconhecimento para utilização industrial, com a construção das primeiras plataformas de produção de Petróleo na Bacia de Campos.

### **3.5. Princípios do ensaio ultrassônico**

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 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., 1999).

A figura 4 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.

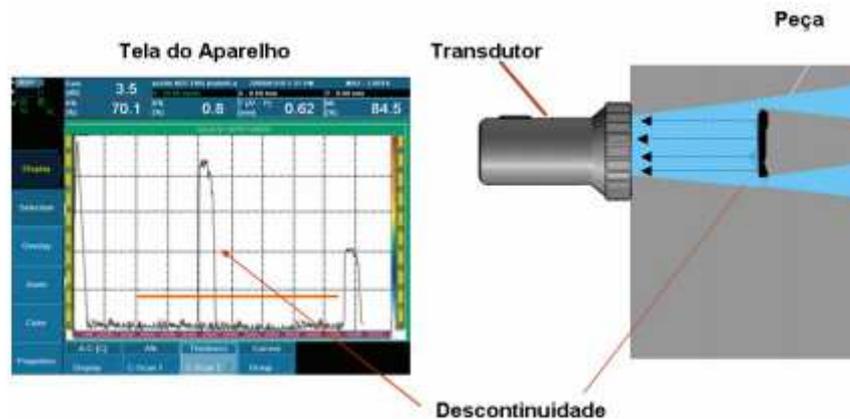


FIGURA 4 - PRINCÍPIO BÁSICO DA INSPEÇÃO DE MATERIAIS POR ULTRASSOM

Fonte: (Andreucci, 2014)

### 3.5.1. Princípios Básicos

Quando ocorre a deformação de um cristal do material que apresenta o efeito piezoelétrico, uma diferença de potencial elétrico se desenvolve entre as faces opostas desse cristal. Inversamente, quando uma diferença de potencial elétrico é aplicada em um elemento piezoelétrico, ele se deforma mecanicamente (efeito piezoelétrico inverso). A geração das ondas ultrassônicas é baseada no efeito piezoelétrico inverso e a sua detecção no efeito piezoelétrico propriamente dito. Uma diferença de potencial elétrico alternada gera vibrações mecânicas na mesma frequência. Estes elementos piezoelétricos montados em dispositivos apropriados ao ensaio são chamados de transdutores.

As ondas ultrassônicas comportam-se da mesma forma que as ondas sônicas audíveis, essas ondas se propagam em meios sólidos, líquidos ou gasosos, mas nunca no vácuo.

A velocidade com que se movem nestes meios materiais e a taxa com que a amplitude e a energia decrescem durante a propagação são propriedades características do meio em que a onda está se movendo.

As ondas podem ser classificadas em infrassom, som audível e ultrassom quanto aos valores de frequência. Considera-se 20 kHz o limite superior audível e denomina-se a partir desta, a denominada frequência ultrassônica. A figura 5 mostra o campo de audibilidade das vibrações mecânica.

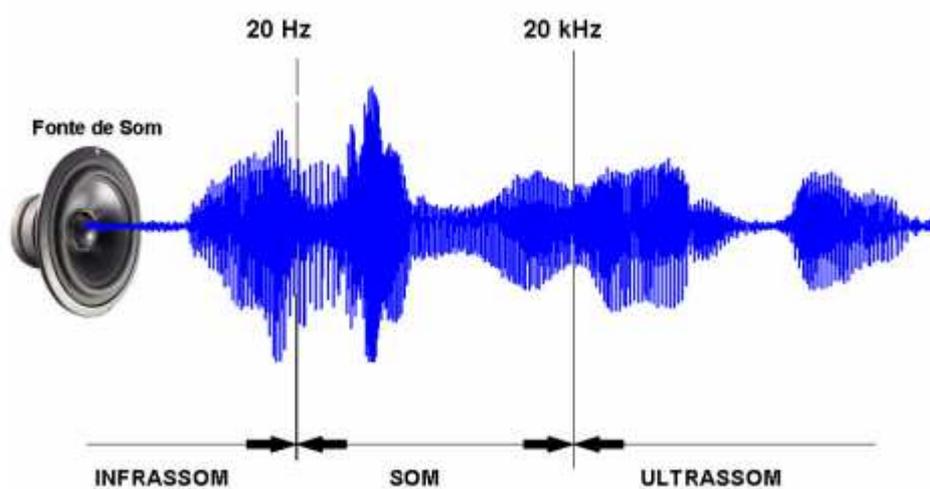


FIGURA 5 - CAMPO DE AUDIBILIDADE DAS VIBRAÇÕES MECÂNICAS

Fonte: (Andreucci, 2014)

### 3.5.2. Modos de propagação

As ondas mecânicas ou acústicas se propagam nos meios elásticos. Quando partículas atômicas ou moleculares são removidas de sua posição de equilíbrio por qualquer força externa, tensões internas agem para recolocar as partículas em suas posições originais. As forças interatômicas fazem com que o deslocamento de uma partícula induza a deslocamentos de partículas vizinhas, e assim por diante, propagando desta maneira uma onda elástica. As ondas são classificadas em longitudinal, transversal e superficial.

### 3.5.2.1. Ondas longitudinais

“Movimento ondulatório no qual o deslocamento das partículas é paralelo à direção de propagação da perturbação, também chamada de onda de compressão.” (ABNT NBR 8050, 2004).

Essas ondas também são chamadas de ondas de compressão, pois durante sua propagação são produzidas regiões de compressão e rarefação conforme mostrado na figura 6.

Sua principal característica é que as partículas do meio vibram na mesma direção da propagação da onda. Esse tipo de onda propaga-se facilmente em líquidos e gases tanto quanto em sólidos elásticos.

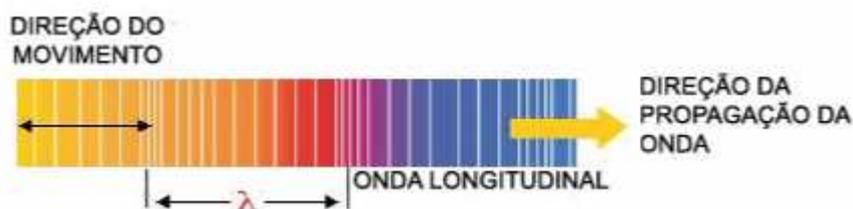


FIGURA 6 - ONDAS LONGITUDINAIS

Fonte: (Olympus, 2006)

### 3.5.2.2. Ondas transversais

As ondas transversais, também conhecidas como ondas de cisalhamento, mostradas na figura 7, tem como característica básica a movimentação das partículas perpendicularmente a direção de propagação do som.

As ondas transversais são incapazes de se propagarem nos líquidos e gases pelas características das ligações entre partículas destes meios e, mostram amplitudes e períodos maiores e velocidades mais baixas (CATUNDA, 2004).



FIGURA 7 - ONDAS TRANSVERSAIS

Fonte: (Olympus, 2006)

### **3.5.2.3. Ondas superficiais**

“Perturbação que se propaga em uma superfície na forma de movimento ondulatório” (ABNT NBR 8050, 2004).

Essas ondas podem ser classificadas como: ondas de Rayleigh, de Creeping e de Lamb.

- Onda de Rayleigh

“Onda superficial caracterizada pelo movimento elíptico das partículas em torno do eixo de propagação, apresentando penetração inferior a um comprimento de onda” (ABNT NBR 8050, 2004).

- Onda de Creeping

São ondas longitudinais que se propagam na superfície do material. São utilizadas para detecção de descontinuidades superficiais e subsuperficiais.

- Ondas de Lamb

Conhecida também como onda de chapa, ocorrem em chapas com espessura de cerca de um comprimento de onda e são utilizadas na inspeção de chapas finas.

### **3.6. Tipos de Cabeçotes**

Os cabeçotes são os dispositivos responsáveis pela transmissão e recepção das ondas sônicas ao material em exame.

Basicamente os cabeçotes podem ser divididos em duas categorias:

- Cabeçotes de incidência normal;
- Cabeçotes de incidência angular.

#### **3.6.1. Cabeçote Normal**

O cabeçote normal emite ondas longitudinais que penetram na peça de maneira perpendicular à superfície. Somente um elemento piezelétrico funciona como

emissor e receptor, e é montado de modo que permaneça paralelo a superfície do material a ser examinado, conforme mostrado na figura 8.

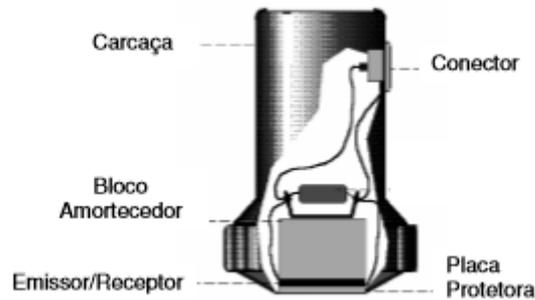


FIGURA 8 - CABEÇOTE NORMAL

Fonte: (Ferreira, Villani, 2010)

### 3.6.2. Cabeçote Angular

Nesse tipo de cabeçote, a onda sônica gerada pelo cristal piezelétrico é do tipo longitudinal, entretanto ao penetrarem o material, essas ondas sofrem conversão de modo e refração, passando então a ser do tipo transversal. Os ângulos mais usuais de incidência usados para inspeção são de 45°, 60° e 70°.

É importante observar que o ângulo nominal do cabeçote é sempre o ângulo formado pela onda refratada e a normal à superfície de incidência, e não pelo ângulo de incidência. O elemento piezelétrico é montado inclinado, conforme figura 9.

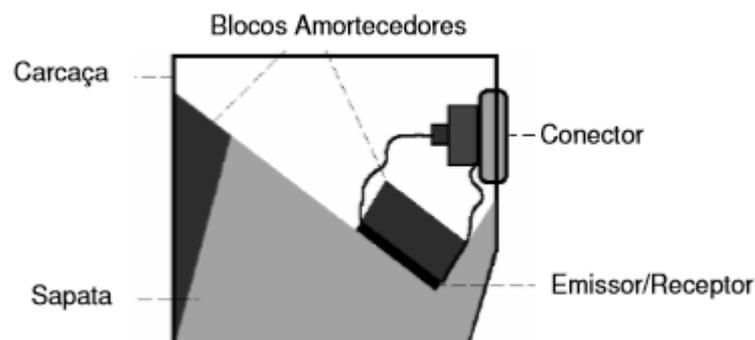


FIGURA 9 - CABEÇOTE ANGULAR

Fonte: (Ferreira, Villani, 2010)

Tanto os cabeçotes normais quanto os angulares, apresentam problemas de detectabilidade de descontinuidades próximas à superfícies, devido a zona morta.

A zona morta é a região do material adjacente à superfície de aplicação do transdutor, onde eco algum produzido por descontinuidade pode ser detectado, dadas as características combinadas do cabeçote e da peça em ensaio. (ABNT NBR 8050, 2004).

A zona morta é consequência de se usar o mesmo cristal para gerar e captar as ondas sonoras, e pode ser eliminada com a utilização do cabeçote de duplo cristal.

### 3.6.3. Cabeçote duplo-cristal

A dificuldade para detecção de descontinuidades próximas a superfície foi superada com o cabeçote duplo cristal. Esse tipo de cabeçote é constituído por dois elementos piezoelétricos, atuando de forma independente, um como emissor e um como receptor. Em razão disso, as vibrações do cristal na emissão do pulso sônico não são captadas pelo cristal de recepção, que está isolado elétrica e acusticamente. A figura 10 mostra um típico cabeçote duplo cristal.

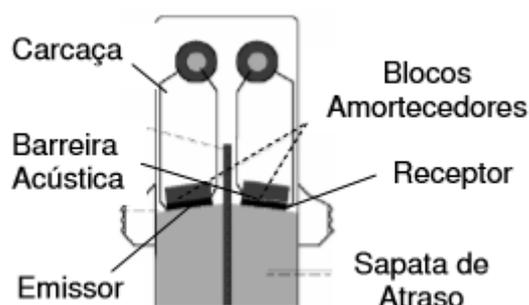


FIGURA 10 - CABEÇOTE DUPLO-CRISTAL

Fonte: (Ferreira, Villani, 2010)

### 3.6.4. Transdutor Phased Array

Em inspeções por ultrassom convencional, seja ela usando transdutores com um único cristal, ou duplo cristal, o campo sônico se propaga por um eixo acústico com um único ângulo de refração.

O sistema de varredura convencional utilizando ângulo único tem suas limitações em relação a detecção e dimensionamento em descontinuidades, pois o feixe sônico

não incide totalmente perpendicular e em todas as orientações das descontinuidades existentes.

A técnica Phased Array utiliza cabeçotes com vários cristais e pode simular cabeçotes com diferentes ângulos de incidência. Um sistema de inspeção phased array é sempre controlado por microprocessador, que automatiza tanto a excitação quanto a análise das vibrações captadas.

## 4. DESENVOLVIMENTO

### 4.1. Fabricação de Juntas Soldadas

Antes do início do processo de fabricação é preciso projetos e estudos para melhor definir e dimensionar o tipo da junta a ser utilizada. O posicionamento das peças que vão ser unidas determina os vários tipos de juntas. A figura 11 mostra os tipos de junta:

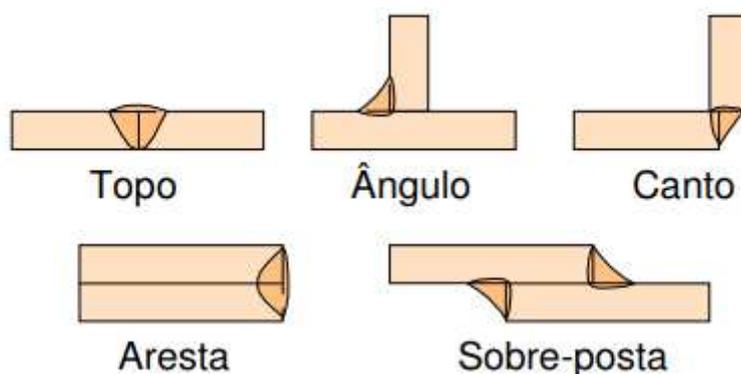


FIGURA 11 – TIPOS DE JUNTAS

Fonte: (Modenesi, 2008)

#### 4.1.1. Chanfros

Para execução das soldas, muitas vezes é preciso preparar aberturas ou sulcos na superfície das peças a serem unidas, chamadas de “chanfro”.

O tipo de chanfro é escolhido em função do processo de soldagem, espessura das peças, dimensões, facilidade de movê-las, facilidades de acesso à região da junta, custo de preparação, tipos de juntas, dentre outros.

A figura 12 mostra os chanfros usados usualmente com os diferentes tipos de juntas.

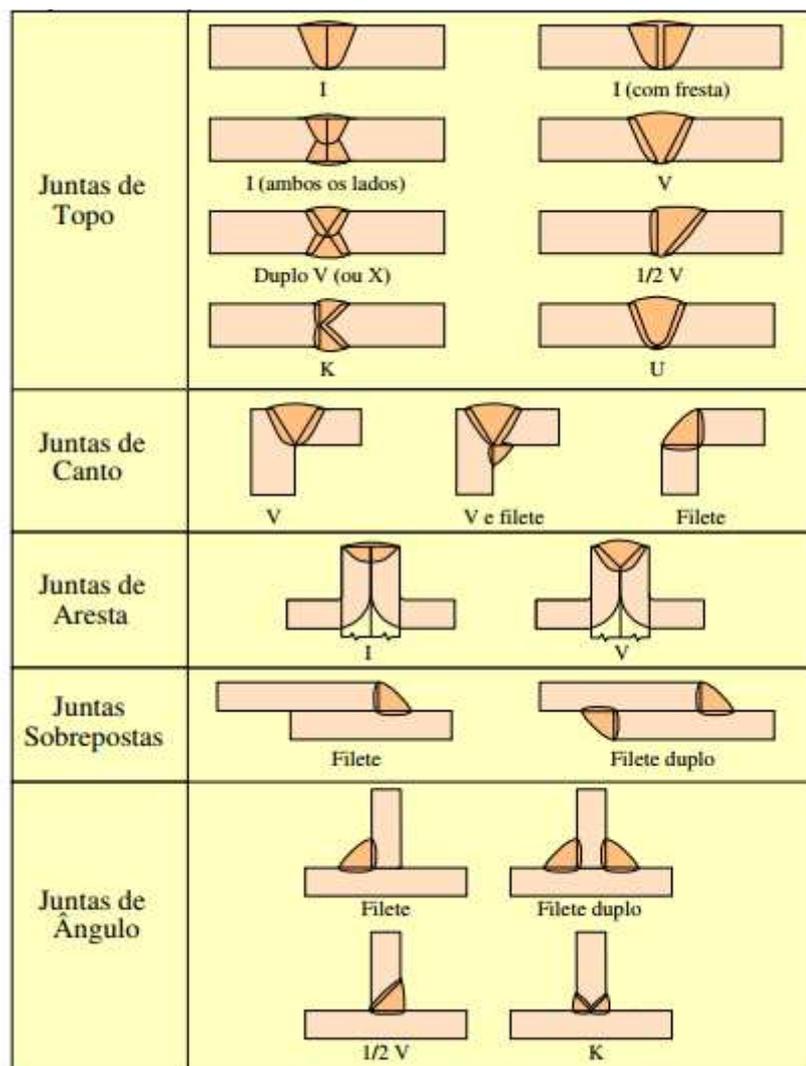


FIGURA 12 – TIPOS DE JUNTAS E CHANFROS

Fonte: (Modenesi, 2008)

#### 4.1.2. Influência da escolha do chanfro

Chanfros em U são mais utilizados em juntas de pequenas espessuras. Nesse tipo de chanfro as condições de soldagem permitem obter a penetração desejada sem abertura de outro tipo de chanfro.

Os chanfros mais comuns são os em V ou meio V, porém eles ficam menos interessantes quando a espessura da junta soldada se torna muito grande, pois aumenta a quantidade de material que deve ser depositado, consequentemente aumentando o tempo da soldagem e os custos.

Quando a espessura a ser soldada se torna muito grande, os chanfros em U ou J se tornam interessantes, porém eles têm um maior custo de preparação.

Os chanfros X,K, duplo U ou duplo J, são utilizados quando é possível a soldagem dos dois lados da junta, esses tipos de configurações tem como vantagem equilibrar as tensões térmicas que são geradas durante a soldagem, diminuindo assim as distorções.

#### **4.1.3. Soldagem em chanfros estreitos – Narrow gap Welding.**

Com a necessidade de aumentar a produtividade e diminuir as distorções, a técnica de soldagem com chanfro estreito vem sendo empregada consideravelmente no processo de fabricação de peças e equipamentos. Hoje em dia, essa técnica permite a união de chapas com até 300 mm de espessura.

Para soldagem com chanfros estreitos e isentas de defeitos, é necessário considerar alguns fatores como: preparação adequada do chanfro, controle dos parâmetros de soldagem e o deslocamento da tocha.

Os principais problemas encontrados nessa técnica são falta de fusão das paredes do chanfro, inclusões de escória, e trincas de solidificação no centro do cordão, consequência do elevado grau de restrição da junta, e da pequena razão entre largura e a penetração de solda.

É importante que todos os parâmetros sejam bem controlados para evitar os aparecimentos de descontinuidades, e conseqüentemente ter que realizar reparos. Por se tratar de chanfros estreitos, há uma grande dificuldade de encontrar ferramentas disponíveis capazes de remover imperfeições em locais de difícil acesso.

Por essas razões, muito se tem estudado para aperfeiçoar os dispositivos e os equipamentos utilizados para realizar essa técnica.

#### **4.2. Descontinuidades**

Defeito ou descontinuidade é qualquer interrupção da estrutura típica de uma junta soldada, ou seja, pode-se considerar como descontinuidade a falta de homogeneidade de características físicas, mecânicas ou metalúrgicas do material ou da solda. Isto não significa necessariamente que a mesma seja defeituosa. Esta condição depende de aplicação a que se destina o componente e é em geral

caracterizado pela comparação das discontinuidades observadas ou propriedade medida com níveis estabelecidos em um código, projeto ou contato pertinente (MODENESI, 2001).

O livro *Welding Inspection*, da American Welding Society, considera três categorias básicas de discontinuidades: Descontinuidades dimensionais, descontinuidade estruturais e propriedades inadequadas.

Nesse trabalho serão discutidas brevemente somente as descontinuidades estruturais, pois são essas descontinuidades, que o ensaio por ultrassom consegue detectar.

#### 4.2.1. Porosidades

Porosidade é um defeito volumétrico, causado pela presença de gases na poça de fusão. A medida que a poça de fusão é deslocada, as bolhas de gás podem ser aprisionadas pelo metal solidificado. Os poros podem aparecer uniformemente distribuídos, agrupados ou alinhados, conforme mostrado na figura 13.

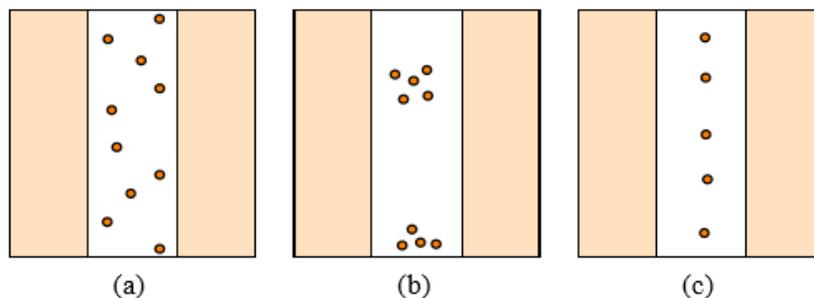


FIGURA 13 – ESQUEMA DOS TIPOS DE POROSIDADE (A) DISTRIBUÍDA, (B) AGRUPADA E (C) ALINHADA

Fonte: (Modenesi, 2001)

Em geral pequenas quantidades de poros não são prejudiciais, normas estipulam quando esses poros são considerados defeitos, podendo vir a afetar as propriedades mecânicas.

#### 4.2.2. Inclusões de Escória

São partículas de óxido e outros sólidos não metálicos que ficam aprisionados entre os passes de solda, ou entre a solda e o de metal base, conforme mostrado na figura 14.

Os fluxos que formam a escória tendem-se a se separar do metal líquido na poça de fusão. As inclusões com formatos alongados são concentradores de tensão e podem facilitar a formação de trincas.



FIGURA 14 – INCLUSÃO DE ESCÓRIA

Fonte: (Modenesi, 2001)

#### 4.2.3. Inclusão de Tungstênio

Esse tipo de inclusão pode ocorrer no processo GTAW, caso a ponta do eletrodo toque o metal de base ou a poça de fusão. Assim como a inclusão de escória, as inclusões de tungstênio são concentradores de tensão, podendo facilitar a formação de trincas.

#### 4.2.4. Falta de fusão

A falta de fusão pode ser entendida como falta de continuidade metalúrgica entre o metal depositado e o metal de base, ou entre os passes adjacentes de solda. É causada pela falta de aquecimento adequado no material, ou pela falta de limpeza da junta, deixando uma camada de óxido espessa, a ponto de dificultar a fusão do metal de base. A figura 15 mostra a falta de fusão em uma junta soldada.

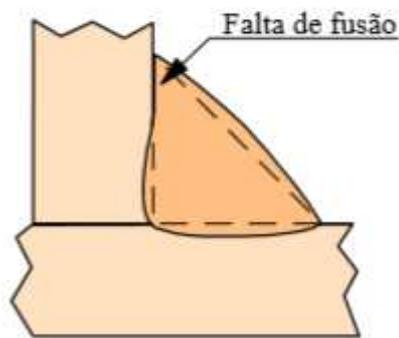


FIGURA 15 – FALTA DE FUSÃO

Fonte: (Modenesi, 2001)

A falta de fusão é um forte concentrador de tensão, podendo favorecer o aparecimento e a propagação de trincas. Além disso, a presença dessa descontinuidade pode reduzir a seção efetiva da solda.

#### 4.2.5. Falta de penetração

A falta de penetração ocorre quando não se funde ou enche completamente a raiz da junta; essa descontinuidade pode ocorrer pela manipulação incorreta do eletrodo, juntas mal projetadas e parâmetros de soldagem incorretos.

A falta de penetração reduz a seção útil da solda e concentra tensões. A figura 16 mostra a falta de penetração em uma junta soldada.

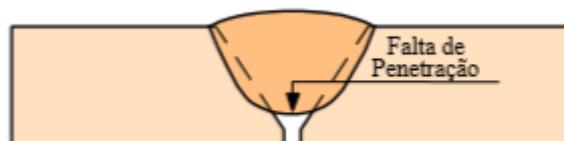


FIGURA 16 – FALTA DE PENETRAÇÃO

Fonte: (Modenesi, 2001)

#### 4.2.6. Mordeduras

Este termo é usado para descrever uma descontinuidade que aparece como entalhe no metal de base na margem do cordão de solda, formando reentrância nesta região, conforme mostrado na figura 17.

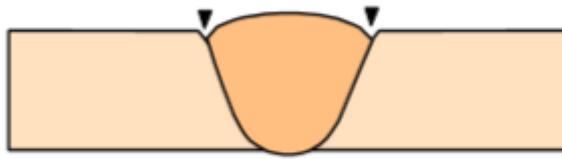


FIGURA 17 – MORDEDURA

Fonte: (Modenesi, 2001)

A mordedura implica em redução da área útil e concentração de tensões, além de ter a resistência a fadiga reduzida.

#### 4.2.7. Trincas

As trincas podem ser consideradas as descontinuidades mais graves em soldagem. Elas são fortes concentradores de tensão, podendo facilitar o início da fratura frágil. As trincas são resultadas da atuação de tensões de tração, sobre um material incapaz de responder as sollicitações impostas. Essas tensões, juntamente com a fragilização associada a mudanças microestruturais durante a soldagem e a presença de certos elementos, podem resultar na formação das trincas. A figura 18 mostra uma trinca formada na solidificação do cordão de solda.

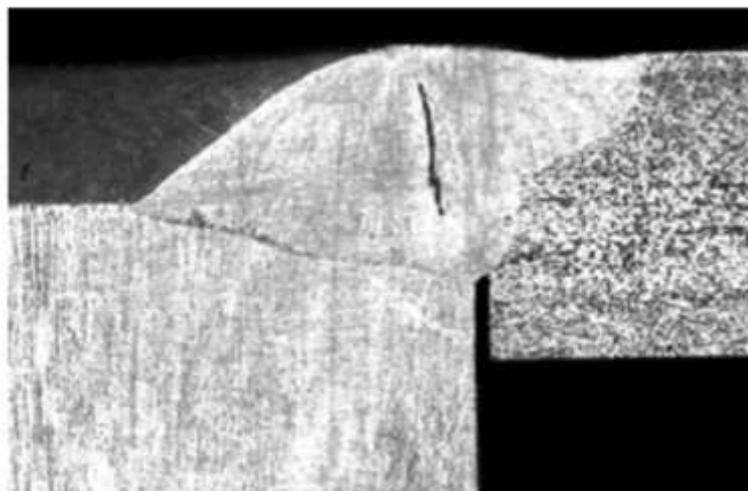


FIGURA 18 – TRINCA NO CENTRO DO CORDÃO DE SOLDA

Fonte: (Modenesi, 2001)

### **4.3. Inspeção de juntas soldadas**

A atividade de inspeção é a mais importante do sistema de avaliação da qualidade de um processo industrial.

De acordo com Modenesi (2005), as qualificações de procedimento de soldagem e de soldador (ou operador) fazem parte do sistema de garantia da qualidade em soldagem. Este controle engloba diversas outras atividades apresentando uma maior ou menor complexidade em função de cada empresa, seus objetivos e clientes, e do serviço em particular. Todos os processos de soldagem, sendo manual, semi ou totalmente automático, pode sofrer certas influências do soldador ou do operador, ou até do ambiente em que a solda foi realizada, e um julgamento dessas influências é de extrema importância nas tomadas de decisões preventivas e corretivas durante a execução da solda (MARTUCCI, 1991).

Em geral, três etapas podem ser consideradas importantes na garantia da qualidade do processo de inspeção de soldagem:

1. Controle antes da soldagem: nessa etapa envolve a análise do projeto, procedimentos de fabricação, planos de fabricação e testes, preparação das juntas, qualificação de procedimentos e operadores de soldagem, calibração e manutenção dos equipamentos de soldagem, e especificação dos metais de base e consumíveis.
2. Controle durante a soldagem: abrange o controle da montagem e ajuste das peças, controle e armazenamento dos consumíveis utilizados, preparação e limpeza da peça a ser soldada, conformidade com os procedimentos e normas estabelecidas, controle da distorção e da temperatura de pré-aquecimento e entre os passes, limpeza entre os passes e ensaio visual ou outros ensaios, caso seja necessário.
3. Controle após a soldagem: por fim, essa etapa inclui as inspeções destrutivas e não destrutiva, ensaios de operação, controle de reparos, controle do tratamento térmicos, e controle da documentação das atividades de fabricação.

As medidas de controle citadas acima são o passo a passo para minimizar os riscos durante a fabricação, recuperação de uma peça ou junta soldada, e garantir a qualidade da mesma.

Devido ao alto custo da primeira etapa (análise do projeto, elaboração de procedimentos, escolha do consumível e qualificação dos soldadores e do procedimento), a maioria das empresas abrem mão desta etapa de controle, aumentando a probabilidade de insucesso do reparo ou fabricação da peça a ser soldada.

Empresas que fabricam equipamentos que devem atender normas regulamentadoras como a NR13 (Vasos de pressão, tubulação e caldeiras) costumam seguir todas as medidas de controle, pois todos os documentos deverão ser entregues ao cliente através do data book de fabricação do equipamento.

#### **4.4. Inspeção por ultrassom**

Como já visto anteriormente, a inspeção por ultrassom é um dos ensaios não destrutivos mais utilizados após a soldagem. Através do ultrassom é possível detectar todas as descontinuidades que foram descritas na seção 4.2, garantindo assim a qualidade, reduzindo o risco de perda e contribuindo para atestar a confiabilidade do produto.

Os procedimentos para inspeção de soldas descritos pelas Normas ou Códigos de fabricação, tais como ASME Sec. V Art.4 ou EN-1714, variam em função dos ajustes de sensibilidade do ensaio, dimensionamento das indicações, critérios de aceitação das descontinuidades encontradas, e outras particularidades técnicas.

Para realizar um ensaio de qualidade, os fatores abaixo devem ser observados e estarem de acordo com as normas estabelecidas.

##### **4.4.1. Aparelhos e cabeçotes**

Os aparelhos e cabeçotes devem estar calibrados e isentos de defeitos, para não haver interferências durante a inspeção.

O aparelho deve ser ajustado para a faixa de espessura a ser medida, usando blocos padrões graduados construídos com material de mesma velocidade e atenuação sônica do material a ser medido.

#### **4.4.2. Preparação da superfície**

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.

#### **4.4.3. Acoplante**

O 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.

#### **4.4.4. Técnica de varredura**

Em inspeção manual a varredura deve ser realizada com velocidade de no máximo 150 mm/s, para garantir uma boa produtividade no ensaio e ao mesmo tempo garantir que os sinais de descontinuidade serão percebidos pelo inspetor.

Devem ser realizadas varreduras no metal de base, primeiramente utilizando o cabeçote normal, com objetivo de detectar duplas-laminações, segregações que venham a interferir no feixe sônico do cabeçote angular.

A varredura transversal em geral visa detectar descontinuidades longitudinais e a varredura longitudinal visa detectar descontinuidades transversais.

#### **4.4.5. Procedimento de ensaio**

A inspeção deve ser executada, baseada em um procedimento qualificado, seguindo os requisitos de normas aplicáveis.

A norma da Petrobrás N-159c, determina que o procedimento de ensaio deve ter no mínimo os seguintes itens:

- Objetivo;
- Normas de referência;
- Material e espessura;
- Desenho com detalhes dimensionais da solda;
- Tipo do aparelho, fabricante e modelo;
- Tipo do cabeçote, dimensões, ângulo, frequência, campo próximo, faixa de espessura de utilização;
- Método de calibração;
- Ajuste de sensibilidade do aparelho;
- Condição superficial e técnica de preparação;
- Acoplante;
- Técnica de varredura;
- Critério de registro e aceitação de descontinuidades;
- Método de dimensionamento das descontinuidades;
- Sistemática de registros de resultados;
- Formulário para relatório de registros dos resultados.

#### **4.4.6. Qualificação do pessoal**

Para execução do ensaio, o inspetor deve estar qualificado e certificado por órgãos competentes.

#### **4.4.7. Critério de aceitação de juntas soldadas, co conforme Código ASME Sec. VIII Div.1 , Div. 2 e Sec. I. (Tradução livre)**

Imperfeições que produzirem uma resposta maior que 20% do nível de referência deve ser investigada a extensão para que o operador possa determinar a forma,

identificar, e localizar tais indicações e avaliar as mesmas em termos do padrão de aceitação dado em (a) e (b) abaixo.

(a) Indicações caracterizadas como trincas, falta de fusão ou penetração incompleta são inaceitáveis independente do comprimento;

(b) Outras imperfeições são inaceitáveis se indicações excedem em amplitude o nível de referência e tenha um comprimento que exceda:

$\frac{1}{4}$  pol. (6,0 mm) para t até  $\frac{3}{4}$  pol. (19 mm);

$\frac{1}{3}.t$  para t de  $\frac{3}{4}$  (19 mm) até 2.1/4 (57,0 mm);

$\frac{3}{4}$  pol. para t acima de 2.1/4 pol. (57,0).

onde t é a espessura da solda excluindo qualquer reforço permitido.

Para juntas soldadas de topo onde dois membros, tendo diferentes espessuras, t é a mais fina dessas duas espessuras. Se uma solda de penetração total inclui uma solda de filete, a espessura da garganta do filete deve ser incluída em t.

## **4.5. Vantagens do ultrassom em relação a outros ensaios não destrutivos**

### **4.5.1. Ensaio por Líquido Penetrante**

O ensaio por líquido penetrante foi desenvolvido para detectar descontinuidades superficiais, tais como trincas, poros, dentre outros. Apesar da simplicidade do método e da análise dos resultados, este só detecta descontinuidades superficiais, podendo assim, ser utilizado, como um complemento ao ensaio por ultrassom.

### **4.5.2. Ensaio por Partículas Magnéticas**

O método de ensaio se dá pela geração de um campo magnético que se propaga pelo volume e/ou superfície do material. As descontinuidades irão causar um campo de fuga do fluxo magnético, quando se aplica as partículas magnéticas, ocorrerá a aglomeração destas nos campos de fuga. Essa aglomeração indicará o contorno do campo de fuga, formando assim uma clara indicação do defeito.

O ensaio por partícula é usado para detectar discontinuidades superficiais e subsuperficiais, a desvantagem desse método em relação ao ultrassom, é que este, também não detecta discontinuidades internas, além de que, esse ensaio só é possível em materiais ferromagnéticos.

#### **4.5.3. Ensaio por Radiografia**

A radiografia, assim como o ultrassom, detecta descontinuidade interna, no entanto esse método requer alguns cuidados para realização. Devido à alta radiação, a radiografia normalmente é feita em áreas isoladas, e por não ser um aparelho totalmente portátil, dificulta a execução em lugares de difícil acesso. Outras desvantagens desse método são:

- Não detecta defeitos de pequena espessura em planos perpendiculares ao feixe, como trincas, dupla laminação e falta de fusão. Os defeitos planares só são detectados quando estão com orientação paralela a direção de propagação da radiação.
- Necessário acesso as superfícies de ambos os lados da peça para radiografá-la;
- Dependendo da geometria da peça, não é possível obter radiografias com qualidade aceitável que permitam uma interpretação confiável;
- Os custos do equipamento e material de consumo são relativamente altos;
- É um ensaio relativamente demorado;
- Pode afetar a saúde dos operadores, inspetores e do público e deve ser criteriosamente utilizada;
- É um ensaio demorado e necessita da interrupção dos trabalhos próximos para a exposição da fonte;
- A interpretação requer experiência e conhecimento dos processos de soldagem para identificação correta das descontinuidades.

## **5. NOVAS TÉCNICAS DE ULTRASSOM**

O ensaio por ultrassom tem se mostrado eficaz e razoavelmente econômico como método de comprovação de qualidade, garantindo a detecção e avaliação de descontinuidades internas principalmente nas indústrias petrolíferas, nuclear e naval. Os métodos tradicionais de inspeção ultrassônica usam o tempo de percurso e a amplitude do som para localizar e dimensionar uma suposta falha interna nos materiais. Entretanto, para uma avaliação mais precisa dos defeitos, a amplitude nem sempre é suficiente, já que pode ser influenciada não apenas pelo tamanho do refletor, mas também por vários fatores como rugosidade, transparência e orientação do defeito (Chen et. al., 2005).

Com intuito de superar essas limitações, novas técnicas vêm sendo desenvolvidas entre os métodos do ultrassom.

Além dos aparelhos convencionais (A-Scan), existem aparelhos mais sofisticados como o Phased Array e Ultrassom TOFD.

As principais aplicações do ensaio por Ultrassom são:

- Detecção e caracterização de descontinuidades internas e superficiais em diversos materiais e juntas soldadas;
- Medição de espessura de paredes
- Controle de corrosão e desgaste.

### **5.1. Técnica TOFD**

A técnica TOFD (Time of Flight Diffraction ou Tempo de Percurso Difrato), é baseada na interação das ondas ultrassônicas com as extremidades das descontinuidades.

Essa técnica faz uso de dois cabeçotes angulares colocados paralelamente na mesma superfície, como mostrado na figura 19, com um pulso sendo gerado por um cabeçote emissor e recebido por um transdutor receptor.

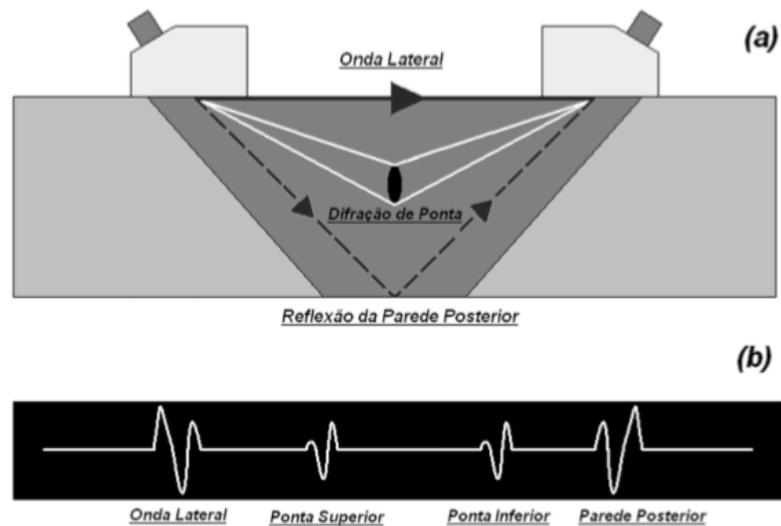


FIGURA 19 – (A) FORMAÇÃO DE ONDAS CARACTERÍSTICAS DO TOFD (B) EXEMPLO DE UM SINAL TIPO A-SCAN CARACTERÍSTICO DO TOFD.

Fonte: (Mayworm, Félix, Alvarenga, 2016)

Os sinais que são recebidos pelo cabeçote receptor formam duas ondas, uma percorrendo toda a superfície, e a outra que é refletida na parede posterior. Além da reflexão e transmissão que ocorre quando um feixe ultrassônico incide sob uma descontinuidade, acontece também o fenômeno da difração, que consiste na geração de uma onda circular propagando-se em todas as direções.

O tempo do percurso dos sinais que incidem nas extremidades das descontinuidades permite que sejam medidos a sua altura e conseqüentemente o seu dimensionamento.

Quando comparado o ultrassom convencional com a técnica TOFD, percebe-se que nesta técnica os defeitos podem ser facilmente detectados independente da amplitude do sinal, enquanto que no ultrassom convencional depende totalmente da amplitude do sinal, necessitando assim de ótimos ângulos de reflexão, de tal forma a garantir que o sinal atinja o defeito de forma perpendicular.

### 5.1.1. Aplicação Técnica TOFD

Essa técnica tem mostrado boa aplicabilidade em chapas com espessura a partir de 10,00 mm. A utilização de técnicas baseadas na difração de ondas ultrassônicas tem despertado o interesse nas pesquisas principalmente pela real possibilidade de que

tal técnica permite uma simplificação das inspeções ultrassônicas (Bossuat et.al, 2006).

Tem sido largamente utilizada na indústria nuclear, visto que esse ramo tem buscado alternativas para dimensionamentos mais precisos de defeitos internos, principalmente em vasos de reatores nucleares soldados, sendo empregado como alternativa a radiografia, que além de não dimensionar e caracterizar uma descontinuidade, pode afetar a saúde do profissional, bem como o meio ambiente.

### **5.1.2. Vantagens da técnica TOFD**

- Grande probabilidade de detecção de falhas de forma mais simples e rápida sem a necessidade de avaliação da amplitude do sinal (Quirk, 1999), baixa taxa de "chamada falsa" portabilidade, baixo custo e a elevada precisão intrínseca no dimensionamento de descontinuidades, especialmente na profundidade, revelou Goujon (2006);
- Boa precisão para dimensionar e localizar falhas internas, principalmente trincas muito pequenas;
- Pode ser automatizada;
- Eficiente para inspeção nas paredes espessas de vasos de pressão;

### **5.2. Técnica PHASED ARRAY**

A constante busca por melhorias para atender as exigências da indústria atrai significativos investimentos em pesquisas na tecnologia em equipamentos de inspeção. Dentre as tecnologias de equipamentos de inspeções por ultrassom, a mais recente é Phased Array, que apresenta disponibilidade tanto em equipamentos portáteis como automatizados (TROMBINI, 2015).

Assim como no Ultrassom convencional, as ondas ultrassônicas são geradas e recebidas pelo transdutor, no entanto, na técnica Phased Array, o transdutor possui múltiplos elementos cristais, e que podem ser excitados isoladamente em diferentes pulsos. Enquanto que no sistema convencional a varredura é feita com vários transdutores, para garantir a probabilidade de detecção, a técnica Phased Array, supera essa limitação usando um único transdutor no sentido longitudinal, e varrendo todo o volume da solda, sem a necessidade do movimento no sentido transversal.

A técnica Phased Array apresenta como característica principal o controle computadorizado da excitação de elementos individuais em um transdutor de múltiplos elementos, além de permitir um aumento na velocidade de inspeção, e a detecção de descontinuidades localizadas na superfície e sub superfície de um material.

### **5.2.1. Aplicação Técnica Phased Array**

Nos anos de 1985 a 1992, essa técnica era voltada para inspeção de vasos de pressão de usinas nucleares (bocais), grandes eixos forjados e componentes de baixa pressão para turbinas.

A indústria aeroespacial, petroquímica e de fabricação vem utilizando largamente essa técnica, pois precisaram se ajustar e atender os requisitos gerais que vem sendo cada vez mais requerido, tais como:

- Diminuição do tempo de preparo e de inspeção;
- Aumento da confiabilidade do ensaio;
- Detecção de trincas de orientação aleatória em diferentes profundidades, usando a mesma sonda em uma posição fixa;
- Melhoria na relação sinal/ruído e capacidade de dimensionamento em juntas dissimilares aço carbono – inoxidáveis e soldas em tubos fundidos de aço inoxidáveis austeníticos centrifugados de aço inoxidável austenítico;
- Detecção e dimensionamento de pequenas trincas de corrosão sob tensão em componentes de turbinas de geometria complexa;
- Aumento de precisão na detecção, dimensionamento, localização e orientação de defeitos críticos, independentemente de sua orientação.

### **5.2.2. Vantagens da Técnica Phased Array**

- Alta sensibilidade na detecção de pequenas descontinuidades internas, e descontinuidades críticas e de difícil detecção por ensaios de radiação penetrantes.
- Permite a localização, avaliação do tamanho e interpretação das descontinuidades encontradas.
- Inspeção rápida e sem prejudicar a saúde do operador;

## 6. CONCLUSÃO

A soldagem pode ser considerada como o mais importante processo industrial de recuperação e fabricação de peças metálicas, é um processo muito versátil, permite a união de várias ligas metálicas nas mais diversas espessuras. O processo de soldagem se aplica tanto em ambientes fabris, quanto em ambientes diferenciados, como é o caso da soldagem subaquática, por fim, a soldagem pode atender a um custo competitivo, e se tornar bastante viável para as empresas.

Por se tratar de um processo que envolve aquecimento intenso e localizado na região a se unir, tensões residuais e distorções se desenvolvem ao longo da junta. Esses efeitos, juntamente com a formação de descontinuidades podem prejudicar a qualidade dos componentes soldados, e até mesmo causar a sua falha prematura.

Para atender os altos requisitos de qualidade e confiança das juntas soldadas, os ensaios não destrutivos vêm sendo largamente utilizados no processo industrial.

As descontinuidades formadas do processo de soldagem podem ser do tipo superficial, subsuperficiais e internas, e podem aparecer com diferentes dimensões e orientações.

O ensaio de líquido penetrante permite detectar somente descontinuidades superficiais, o de partículas magnéticas por sua vez, detecta descontinuidades superficiais e subsuperficiais, no entanto, só pode ser aplicado em materiais ferro magnéticos.

O ensaio de Ultrassom tem superado essas limitações apresentadas pelos outros ensaios, pois essa técnica se bem adaptada, pode detectar descontinuidades nas mais diversas posições e orientações, de forma muito mais fácil que os demais ensaios.

## 7. BIBLIOGRAFIA

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8050**. ABNT, 2004.

ANDREUCCI, R.; **Ensaio por Ultra-Som**, ABENDI, 2011

ANDREUCCI, R.; **Radiologia Industrial**, ABENDI, 2014

ANDREUCCI, R.; **Partículas Magnéticas**, ABENDE, 2016

GÓMES, F.R., “**Introducción a los Métodos de Ensayos no Destructivos de Control de la Calidad de los Materiales**”, 3 ed., Madrid, Instituto Nacional de Técnica Aeroespacial. 1982.

THE AMERICAN SOCIETY OF MECHANICAL ENGINEERS. **IX Qualification Standard for Welding, Brazing, and Fusing Procedures, Welders, Brazers, and Welding, Brazing, and Fusing Operators**. ASME, 2017.

MARQUES, Paulo Villani; MODENESI, Paulo J.; BRACARENSE, Alexandre Queiroz. **Soldagem fundamentos e tecnologia**. 4. ed. atual. Belo Horizonte: Ed. UFMG, 2016. 370 p.

MARTUCCI JÚNIOR, M. **Considerações sobre a implantação de automação. Automação e Controle**. v.1, n.10. São Paulo, 1991

MARQUES, Paulo Villani; Silvério Ferreira, SILVA. **Ensaio não destrutivo**. Belo Horizonte, 2010.

MODENESI, 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>

MODENESI, Paulo J. **Terminologia Usual de Soldagem e Símbolos de Soldagem**. Belo Horizonte, abr. 2012. Disponível em: <http://demet.eng.ufmg.br/wp-content/uploads/2012/10/terminologia.pdf>

MODENESI, Paulo J. **Descontinuidades Inspeção de Juntas soldadas Soldagem**. Belo Horizonte, nov. 2001. Disponível em: <http://demet.eng.ufmg.br/laboratorios/laboratorio-de-soldagem/textos/inspecao.pdf>

NEPOMUCENO, L. X. **Tecnologia ultra-sônica**. São Paulo: Edgard Blücher , 1980. 300 p.

OLYMPUS®, **Technical notes**. Pág. 41 - 48. catálogo 2006.

SANTIN, Jorge Luiz. **Ultrassom – Técnica e Aplicação** 2.ed. atual. Curitiba: Pró End,2003. 276 p.

SILVA, I. C. **Avaliação da técnica ultra-sônica do tempo de percurso da onda difratada no dimensionamento de descontinuidades**. Rio de Janeiro, 1999. 56 f. Tese (mestrado em Ciências em Engenharia Metalúrgica e de Materiais) - Engenharia Metalúrgica e de Materiais, Universidade Federal do Rio de Janeiro.

THE AMERICAN SOCIETY OF MECHANICAL ENGINEERS. **IX Qualification Standard for Welding, Brazing, and Fusing Procedures, Welders, Brazers, and Welding, Brazing, and Fusing Operators**. ASME, 2017.