



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
SECRETARIA DE EDUCAÇÃO PROFISSIONAL E TECNOLÓGICA
INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA - AM.
DEPARTAMENTO DE ENSINO SUPERIOR



INSTITUTO FEDERAL DE
EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA
AMAZONAS

LUIZ EDUARDO CALDAS GARCIA

**A IMPORTÂNCIA DA INSPEÇÃO DE DEFEITOS DE SOLDAGEM POR
FUSÃO ATRAVÉS DE ENSAIOS NÃO DESTRUTIVOS E DA METODOLOGIA
*PoD***

MANAUS - AM

2017



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
SECRETARIA DE EDUCAÇÃO PROFISSIONAL E TECNOLÓGICA
INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA - AM.
DEPARTAMENTO DE ENSINO SUPERIOR



INSTITUTO FEDERAL DE
EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA
AMAZONAS

LUIZ EDUARDO CALDAS GARCIA

**A IMPORTÂNCIA DA INSPEÇÃO DE DEFEITOS DE SOLDAGEM POR
FUSÃO ATRAVÉS DE ENSAIOS NÃO DESTRUTIVOS E DA METODOLOGIA
*PoD***

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Amazonas (IFAM), Campus Manaus Centro para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica, sob a orientação do MSc. Alberto de Castro Monteiro.

MANAUS-AM

2017



LUIZ EDUARDO CALDAS GARCIA

**A IMPORTÂNCIA DA INSPEÇÃO DE DEFEITOS DE SOLDAGEM POR
FUSÃO ATRAVÉS DE ENSAIOS NÃO DESTRUTIVOS E DA METODOLOGIA
*PoD***

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Amazonas (IFAM), Campus Manaus Centro para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica, sob a orientação do MSc. Alberto de Castro Monteiro.

Aprovado em / /2017

BANCA EXAMINADORA:

Prof. MSc. Alberto de Castro Monteiro
Instituto Federal do Amazonas - IFAM
Presidente Banca Examinadora

Prof. MSc.
Instituto Federal do Amazonas - IFAM
Membro Examinador

Profª. MSc. Andréa Regina L. Nascimento
Instituto Federal do Amazonas – IFAM
Membro Examinador



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
SECRETARIA DE EDUCAÇÃO PROFISSIONAL E TECNOLÓGICA
INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA - AM.
DEPARTAMENTO DE ENSINO SUPERIOR



INSTITUTO FEDERAL DE
EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA
AMAZONAS

DEDICATÓRIA

Dedico à Helena dos Santos Caldas, minha amada mãe, por todo amor, carinho e esforço que fez por mim, e a José Luiz Garcia, meu pai, e aos meus irmãos Edwin Luiz e Lisianne Caldas



AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, pois Ele nos dá a sabedoria e o conhecimento necessários para tudo em nossas vidas, e por todas as bênçãos que Ele derramou sobre minha vida até hoje.

Agradeço à minha família, que sempre me apoiou e me deu o suporte necessário em meios as dificuldades e percalços encontrados durante a jornada de universitário, especialmente a minha mãe, Helena Caldas. Sem ela não seria nada.

Ao professor Alberto Monteiro, pela orientação deste trabalho.

À professora Andrea Regina pela sua contribuição na realização deste trabalho.

Agradeço aos grandes amigos e colegas de faculdade, que tive o grande prazer de conhecer durante a jornada de faculdade, em especial ao Daniel de Deus, Igor Barros, Joel Barros, Vítor Maia (*in memoriam*) e Getro Felipe. Que, juntos com os demais colegas de turma que não foram citados, fizeram desses 5 anos um palco de grande aprendizado e conquistas.

Aos professores do IFAM que contribuíram na minha formação e no meu aprendizado de maneira substancial.

A todos estes citados acima o meu muito obrigado!



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
SECRETARIA DE EDUCAÇÃO PROFISSIONAL E TECNOLÓGICA
INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA - AM.
DEPARTAMENTO DE ENSINO SUPERIOR



INSTITUTO FEDERAL DE
EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA
AMAZONAS

EPÍGRAFE

*“E tudo o que fizerdes, seja em palavra, seja em ação, fazei-o em nome do
Senhor Jesus, dando por Ele graças a Deus pai”.*

Colossenses 3:17



RESUMO

Este trabalho veio inicialmente da necessidade de se fazer um estudo sobre a confiabilidade de ensaios não destrutivos empregados na detecção de defeitos de soldagem. Sabemos que as inspeções, na maioria dos casos, são executadas de forma manual, e o fator humano, por mais que tenha o conhecimento e treinamento adequados para executar tal atividade, reduz a confiabilidade dos resultados da inspeção visual. Por isso, faz-se necessária a aplicação de ferramentas estatísticas auxiliares na detecção de defeitos, para garantir a confiabilidade da inspeção. Primeiramente foi feito uma revisão da literatura sobre soldagem e aplicações. A seguir foi feito um levantamento dos principais defeitos inerentes aos processos de soldagem por fusão. O estudo permitiu concluir que o emprego das curvas *PoD* nos ensaios é uma metodologia simples, que proporciona uma maior confiabilidade ao ensaio, porque permite ter uma precisão maior de que um defeito identificado de fato esteja presente na peça inspecionada, tendo em vista que a curva é gerada em função das dimensões de um defeito.

Palavras-chave: soldagem; confiabilidade; defeitos; ensaios não destrutivos; curva PoD.



ABSTRACT

This work came initially from the need to make a study on the reliability of non destructive tests in the application of detection of welding defects. We know that inspections, in most cases, are performed manually, and the human factor, however well-trained and knowledgeable for make this activity, reduces the reliability of inspection visual results. Therefore, it is necessary to apply auxiliary statistical tools in the detection of defects, to guarantee the reliability of the inspection. First, a review of the literature on welding and applications was made. The following was a survey of the main defects inherent in fusion welding processes. The study allowed us to conclude that the use of PoD curves in the tests is a simple methodology, which provides a greater reliability to the test because it allows greater certainty that an identified defect is actually present in the inspected part, since the curve is generated according to the dimensions of a defect.

Keywords: welding; reliability; defects; non destructive testing; PoD curve.



SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	13
2. OBJETIVOS	14
2.1. OBJETIVO GERAL	14
2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS	14
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	15
3.1. Soldagem.....	15
3.2. Soldagem a arco elétrico.....	18
3.2.1. Soldagem com eletrodo revestido – SMAW.....	19
3.2.2. Soldagem TIG – GTAW.....	22
3.2.3. Soldagem MIG/MAG – GMAW	25
3.2.4. Soldagem com Arame Tubular – FCAW	27
3.2.5. Soldagem a arco submerso – SAW.....	28
3.3. Defeitos de soldagem	30
3.3.1. Descontinuidades estruturais em solda por fusão	32
3.3.1.1. Falta de penetração	32
3.3.1.2. Falta de fusão.....	32
3.3.1.3. Mordeduras	34
3.3.1.4. Fendas (trincas)	35
3.3.1.5. Porosidades	37
3.3.1.6. Inclusões.....	39
4. MATERIAIS E MÉTODOS.....	40
4.1. Metodologia de pesquisa	40
5. RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	41
5.1. Ensaios não destrutivos para detecção de defeitos de soldagem	41
5.1.1. Inspeção visual.....	42
5.1.2. Inspeção com líquidos penetrantes	43
5.1.3. Inspeção com partículas magnéticas	44
5.1.4. Inspeção por ultrassom	46
5.1.5. Radiografia	48



5.2. Medição da confiabilidade dos ensaios não destrutivos: a curva <i>POD</i>.....	49
5.2.1. <i>Curvas Pod</i>	50
5.2.2. <i>Parâmetros da curva PoD</i>	51
5.2.3. <i>Modelagem de curvas PoD</i>	51
5.2.3.1. Análise Hit/miss	51
5.2.3.2. Análise \hat{A} vs A	54
CONCLUSÃO	56
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	57



LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Principais processos de soldagem convencionais	15
Figura 2: arco elétrico observado entre um eletrodo de tungstênio e um bloco de cobre em uma atmosfera de argônio.	18
Figura 3: modos de transferência de metal de acordo com a tensão de corrente	19
Figura 4: Princípio de funcionamento da soldagem a arco elétrico com eletrodo revestido	20
Figura 5: Equipamentos básicos para soldagem manual com eletrodo revestido	21
Figura 6: Esquema do processo TIG	22
Figura 7: tocha de soldagem TIG	23
Figura 8: Equipamento básico para soldagem TIG	24
Figura 9: Soldagem GMAW	25
Figura 10: Equipamento para soldagem GMAW	26
Figura 11: Esquema do processo FCAW	27
Figura 12: Soldagem a arco submerso	28
Figura 13: equipamento de soldagem SAW	29
Figura 14: zonas de possíveis defeitos de soldagem	31
Figura 15: falta de penetração	32
Figura 16: falta de fusão	33
Figura 17: mordeduras	35
Figura 18: junta soldada apresentando trincas nos cordões de solda	37
Figura 19: formação de poros na junta soldada	38
Figura 20: inclusão de escória	39
Figura 21: etapas do processo de ensaio por líquidos penetrantes	43
Figura 22: princípio do ensaio por partículas magnéticas	45
Figura 23: ensaio ultrassônico detectando a descontinuidade na peça	46
Figura 24: técnica do pulso eco aplicada em cordões de solda	47
Figura 25: ensaios de raios X com o filme radiográfico após revelação	49
Figura 26: curva <i>PoD</i> para situações real e ideal	51
Figura 28: Análise <i>hit/miss</i>	53
Figura 29: Patamares de detecção	54
Figura 30: distribuição dos sinais de ultrassom	55



LISTA DE QUADROS

Quadro 1: Principais técnicas de soldagem empregados na indústria.....	16
Quadro 2: vantagens, limitações e aplicações do processo GMAW	26
Quadro 3: classificação das descontinuidades	30
Quadro 4: falta de penetração/fusão – possíveis causas e soluções	33
Quadro 5: mordeduras: possíveis causas e soluções	34
Quadro 6: trincas – possíveis causas e soluções	35
Quadro 7: porosidades – possíveis causas e soluções	37
Quadro 8: inclusões – possíveis causas e soluções	39
Quadro 9: dados <i>hit/miss</i>	52

1. INTRODUÇÃO

Nos dias atuais, o fator chave competitividade está em plena evidência. Nas indústrias, principalmente do setor secundário da economia, há uma enorme variedade de processos produtivos, e existe a necessidade de se terem meios produtivos flexíveis e eficientes, que atendam às demandas e exigências de mercado que a cada dia cresce, e acima de tudo que alie os baixos custos de produção a processos produtivos de qualidade e confiabilidade.

Dentre esses modos de produção de grande importância dentro da indústria está a soldagem, que é um processo de fabricação de união permanente de materiais, devido a sua grande versatilidade. Esse processo tem evoluído muito nos últimos anos, e várias tecnologias modernas tem se inserido nesse segmento para facilitar a execução da soldagem, tais como o uso de robôs, mas que em contrapartida ainda tem um alto custo. Por outro lado, a inspeção de soldagem também tem muita importância nas indústrias, pois uma soldagem de qualidade depende muito da eliminação ou diminuição dos riscos de formação de defeitos ou descontinuidades provenientes de processos de soldagem. Nesse aspecto, as técnicas de ensaios não destrutivos (END) são uma grande arma a favor dos técnicos e inspetores de solda, pois possibilitam a detecção dos defeitos em uma peça, sejam elas superficiais ou internas. É notável o desenvolvimento dessas técnicas, com o uso de equipamentos modernos, cujos sistemas automatizados proporcionam resultados precisos e diminuindo as chances de erros.

Porém não é possível eliminar totalmente a ação humana em todos os tipos de ensaios. Por isso, é consenso dizer que a presença do fator humano na realização dos ensaios manuais de inspeção é o responsável pela baixa confiabilidade que os mesmos possuem. Tendo isso em vista, através de uma análise estatística é possível quantificar a confiabilidade de um ensaio não destrutivo aplicado em uma inspeção de soldagem. Essa ferramenta é denominada curvas *PoD* (*Probability of Detection*), que são geradas a partir de uma determinada quantidade de experimentos ou por modelagem matemática.

2. OBJETIVOS

2.1. OBJETIVO GERAL

O objetivo deste trabalho é realizar um estudo sobre confiabilidade de ensaios não destrutivos empregados na detecção de defeitos de soldagem nos processos por fusão.

2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Fazer um levantamento de informações sobre os principais defeitos de soldagem encontrados na literatura;
- Explicar teoricamente a importância das curvas *PoD* na detecção de defeitos;
- Auxiliar no desenvolvimento de estudos de confiabilidade de inspeções e detecção de defeitos de soldagem.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1. Soldagem

Segundo Machado (2010), a soldagem caracteriza-se por ser um processo de ligação de materiais de forma permanente, no qual existe continuidade metálica, ou seja, o material a unir é geralmente fundido, podendo ou não ser adicionado outro material durante essa união de materiais. Segundo Marques *et all* (2011), a soldagem está classificada na categoria de união baseado por forças microscópicas – interatômicas e intermoleculares, conseguida pela aproximação dos átomos ou moléculas a serem unidas.

CHIAVERINI (1986) classifica as técnicas de soldagem de acordo com a fonte de energia empregada para aquecer os metais e a condição do metal na superfície de contato. Podem ser considerados dois grandes grupos: processos por fusão e processos por pressão.

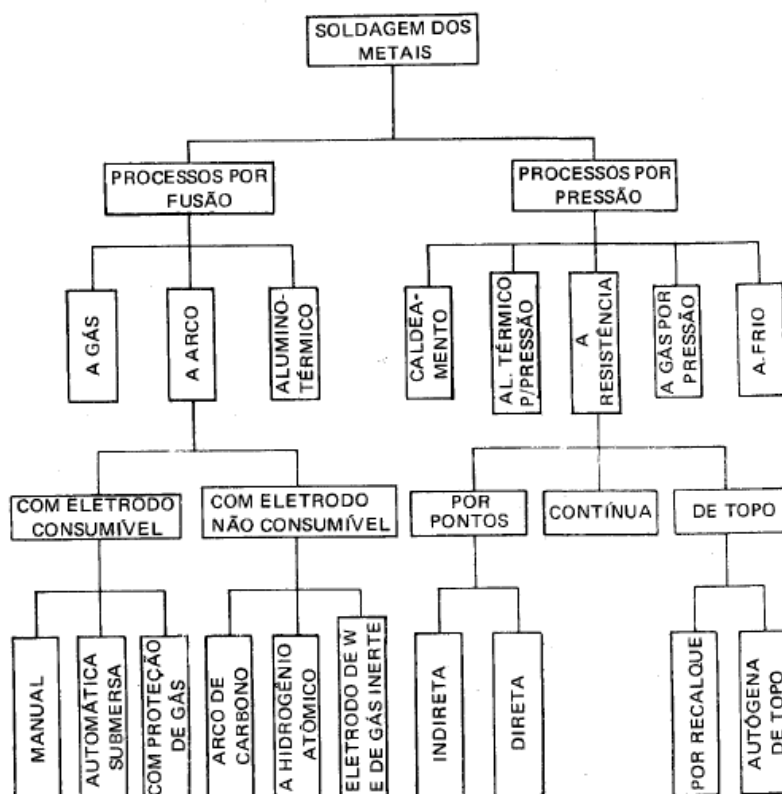


Figura 1: Principais processos de soldagem convencionais
Fonte: CHIAVERINI (1986)

Este trabalho se limitará a discutir os defeitos de soldagem provenientes das técnicas de soldagem por fusão, tendo em vista que é o método mais empregado na indústria. Existe um grande número de processos por fusão que podem ser separados em subgrupos, por exemplo, de acordo com o tipo de fonte de energia usada para fundir as peças. Dentre estes, os métodos de soldagem a arco, cuja fonte de energia é o arco elétrico, são os de maior importância industrial na atualidade. Vale ressaltar também que a maioria dos processos de soldagem por fusão utiliza também gases de proteção, devido a tendência de reação do material fundido com os gases da atmosfera, conforme destaca Modenesi e Marques (2006).

A tabela a seguir mostra as principais espécies de soldagem por fusão.

Quadro 1 – Principais técnicas de soldagem empregados na indústria					
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 semiautomática. 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. 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 semiautomático	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/mecanizada ou semiautomática. 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 constricto 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 ($\gg 10^{-4}$ 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 ₂ O)	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, 2006.

3.2. Soldagem a arco elétrico

Segundo Chiaverini (1986), este é o processo mais utilizado. Consiste no chamado soldagem autógena, ou seja, no processo, o material base participa por fusão na constituição da solda. Nele, a fonte de calor é um arco elétrico.

O arco elétrico é a fonte de calor mais utilizada na soldagem por fusão de materiais metálicos, pois apresenta uma combinação ótima de características, incluindo uma concentração adequada de energia para a fusão localizada do metal de base, facilidade de controle, baixo custo relativo do equipamento e um nível aceitável de riscos à saúde dos seus operadores. Como consequência, os processos de soldagem a arco têm atualmente uma grande importância industrial, sendo utilizados na fabricação dos mais variados componentes e estruturas metálicas e na recuperação de um grande número de peças danificadas ou desgastadas. (MARQUES *et all*, 2011).



Figura 2: arco elétrico observado entre um eletrodo de tungstênio e um bloco de cobre em uma atmosfera de argônio.

Fonte: MARQUES, MODENESI e BRACARENSE, 2011.

A corrente de soldagem pode variar de valores inferiores a 1A (na soldagem microplasma) a valores superiores a 1000 ou 2000A (em processos como a soldagem ao arco submerso). Esta variável afeta, de forma importante, a penetração do cordão e solda e a velocidade de fusão do eletrodo (e, portanto, a taxa de deposição). A tensão de soldagem varia tipicamente de menos de 10V a valores que podem superar 100V (na soldagem a plasma). Esta, em geral, controla o comprimento do arco (isto é, a separação entre o eletrodo e o metal base ou entre os eletrodos que mantêm o arco) e a largura do cordão de solda. Por fim, quando a fonte de calor se desloca ao longo da junta, a velocidade de soldagem controla a quantidade de calor que é fornecida ao longo da junta. Quanto maior for a velocidade de soldagem, menor será a quantidade de energia recebida por unidade de comprimento da junta e, em geral, menores serão as dimensões

do cordão. Finalmente, deve se deixar claro que, para se garantir uma estabilidade e controle adequados do processo e se obter um cordão de solda com um formato adequado, não se pode selecionar valores de corrente, tensão e velocidade de soldagem de forma independente. Além disto, cada processo de soldagem a arco possui uma extensa lista de variáveis adicionais que devem ser levadas em consideração ao se determinar as condições de soldagem para uma dada aplicação. (MODENESI, MARQUES, 2006).

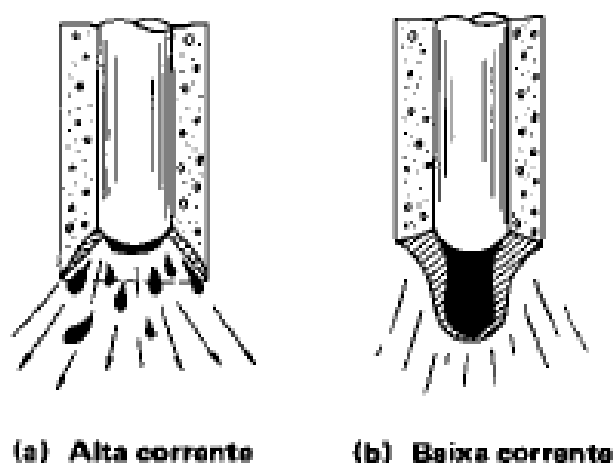


Figura 3: modos de transferência de metal de acordo com a tensão de corrente

Fonte: OKAMURA, TANIGUCHI, 1982

3.2.1. Soldagem com eletrodo revestido – SMAW

MARQUES *et al* (2011) definem “a soldagem a arco com eletrodos revestidos (*Shielded Metal Arc Welding—SMAW*) é um processo que produz a coalescência entre metais pelo aquecimento destes com um arco elétrico estabelecido entre um eletrodo metálico revestido e a peça que está sendo soldada.”

Os eletrodos são formados por um núcleo metálico, chamado de “alma” que conduz a corrente elétrica e é constituído geralmente por aço de baixo carbono e outros materiais (revestimento). Okamura e Taniguchi (1982) ressaltam ainda que o eletrodo consiste em um arame de material adequado, coberto com elemento fundente, e que é consumido através de um arco gerado entre sua extremidade livre e o metal que se deseja soldar, conforme ilustrado na figura abaixo. O arco representa a fonte de energia que é utilizada para promover a fusão das duas partes.

O revestimento gera escória e gases que protegem da atmosfera a região sendo soldada e estabilizam o arco. O revestimento pode ainda conter elementos que são incorporados à solda, influenciando sua composição química e características metalúrgicas.

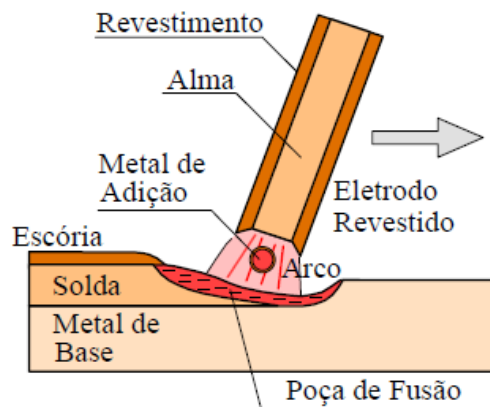


Figura 4: Princípio de funcionamento da soldagem a arco elétrico com eletrodo revestido

Fonte: OKAMURA, TANIGUCHI, 1982.

O revestimento do eletrodo possui diferentes funções, a saber:

- Estabilizar o arco elétrico;
- Ajustar a composição química do cordão, pela adição de elementos de liga e eliminação de impurezas;
- Proteger a poça de fusão e o metal de solda contra contaminação pela atmosfera, através da geração de gases e de uma camada de escória;
- Conferir características operacionais, mecânicas e metalúrgicas ao eletrodo e à solda.

Os equipamentos necessários para a soldagem manual com eletrodos revestidos compreendem, de maneira geral, fonte de energia, cabos, porta eletrodos, ferramentas (picadeira, escova de aço etc.) e equipamentos de segurança básicos (máscara, luvas, avental de raspa de couro, botas, etc.) conforme ilustra a figura a seguir.

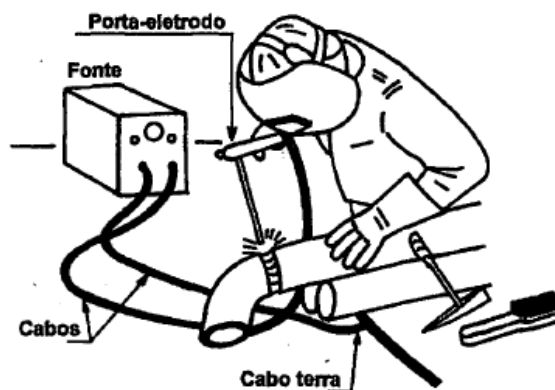


Figura 5: Equipamentos básicos para soldagem manual com eletrodo revestido

Fonte: MARQUES, MODENESI e BRACARENSE, 2011

Ainda segundo Guedes (2009), devido o fato de o processo ser totalmente manual, é totalmente influenciado pelas variáveis de manipulação do processo que depende do operador, das alterações durante todo o processo e das variáveis operacionais que podem influir na soldagem, tais como:

- tensão de soldagem;
- corrente de soldagem;
- velocidade de soldagem;
- polaridade da corrente de soldagem;
- penetração da solda.

Apesar de ser um processo relativamente simples e de baixo custo, o processo de soldagem por eletrodo revestido é o mais indicado quando se é requerido alta produtividade no processo. FIALHO (2015) destaca ainda que a soldagem com eletrodo revestido é um dos processos mais antigos e populares conhecidos. É usado principalmente pelo baixo custo, flexibilidade, portabilidade e versatilidade. Tanto os equipamentos e eletrodos são de baixo custo e muito simples. Sendo necessário um equipamento portátil para o fornecimento de energia (isto é, do gerador). Além de ser muito versátil, pois pode soldar diferentes tipos de metais, como ferro fundido, aço, níquel e alumínio.

Além disso, Schio (2013) cita outras vantagens, como equipamentos simples, portáteis, baratos, não necessitam de fluxos ou gases externos, pouco sensíveis a

corrente de ar, processo extremamente versátil em termos de materiais soldáveis, facilidade para atingir áreas restritas de acesso, porém, o mesmo processo apresenta algumas limitações, como, aplicação difícil para materiais reativos, produtividade relativamente baixa, exige limpeza a cada passe de soldagem.

3.2.2. Soldagem TIG – GTAW

MARQUES *et all* (2011) definem “*Gas Tungsten Arc Welding* (GTAW) é um processo no qual a união de peças metálicas é produzida pelo aquecimento e fusão destas através de um arco elétrico estabelecido entre um eletrodo de tungstênio não consumível, e as peças a unir.” A proteção da poça de fusão e do arco contra a contaminação pela atmosfera é feita por uma nuvem de gás inerte ou uma mistura de gases inertes. A soldagem pode ou não ser feita com metal de adição, e quando usada, é feita diretamente na poça de fusão.

MACHADO (2010) completa dizendo que também é possível ser utilizado um gás de proteção que pode ser argônio, hélio, ou outros, podendo utilizar dois tipos de corrente elétrica AC (Corrente Alternada) ou CC (Corrente Contínua), conforme for a necessidade da aplicação.

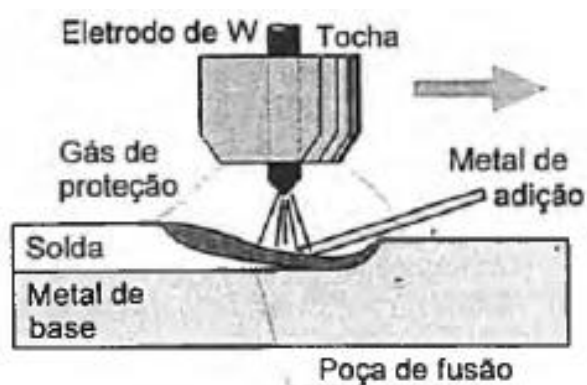


Figura 6: Esquema do processo TIG

Fonte: MARQUES, MODENESI e BRACARENSE, 2011.

Uma característica importante deste processo é o excelente controle da energia transferida para a peça, devido ao controle independente da fonte de calor e da adição de metal de enchimento, semelhantemente ao que ocorre na soldagem oxiacetilênica. Isso torna o processo bastante adequado para a soldagem de peças de pequena espessura e, aliado a eficiente proteção contra a contaminação, permite a soldagem de materiais de difícil soldabilidade, com ótimos resultados. (MARQUES, MODENESI e BRACARENSE, 2011).

A junta soldada pode ser obtida de duas maneiras distintas, apenas pela fusão do material base (sem metal de adição), ou utilizando um metal de adição, no formato de uma vareta similar ao usado no processo oxi-gás. A tocha utilizada nesse processo é um equipamento complexo, tendo em conta que no seu interior circulam vários fluidos, como gás para proteção da região soldada e a água de refrigeração, que pode ser opcional. Na tocha há também um eletrodo de tungstênio, responsável pela formação do arco elétrico, e que não é consumível, mas deve ser substituído a longo prazo (MACHADO, 2010). A figura a seguir apresenta a estrutura em corte de uma tocha utilizada no processo TIG.

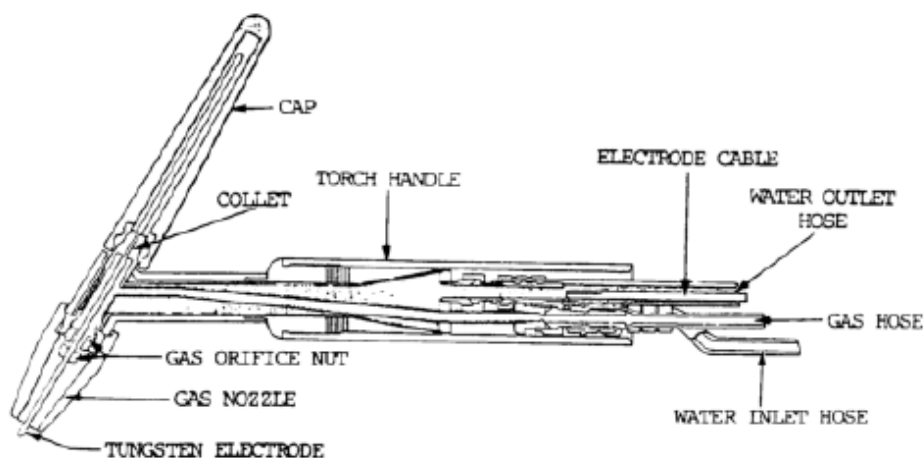


Figura 7: tocha de soldagem TIG

Fonte: MACHADO, 2010

É importante também ressaltar que no bico de saída da tocha pode ser usado variados tipos de bocais, ou difusores, para o transporte do gás de proteção de diferentes maneiras. A utilização destes bocais ou difusores é também definida pela geometria da soldagem e do cordão a ser obtido e pelo diâmetro do eletrodo utilizado. Os bocais e

difusores são geralmente construídos em material cerâmico ou refratário devido às elevadas temperaturas a que se encontram expostos. Na escolha do diâmetro de bocal é levada em consideração a largura do cordão de solda desejado, pois uma escolha errada pode acarretar uma soldagem com defeitos devido à falta de proteção gasosa da região soldada.

Os equipamentos necessários a este processo de soldagem possuem um custo alto, e a produtividade e rendimento são baixos se comparados ao processo de soldagem a arco elétrico com eletrodo revestido. No entanto, a qualidade da solda TIG é bem melhor, o que podemos afirmar neste caso que o processo de soldagem TIG é mais indicado quando a qualidade da soldagem é mais importante em relação à produtividade ou o custo da operação.

A soldagem TIG pode ser manual ou mecanizada e é considerado o processo mais controlável no que se refere à soldagem a arco. O equipamento básico do processo consiste em fonte de energia (de CC para a maioria das ligas metálicas), tocha com eletrodo de tungstênio, fonte de gás de proteção (Ar ou He) e um sistema para a abertura do arco (geralmente um ignitor de alta frequência).

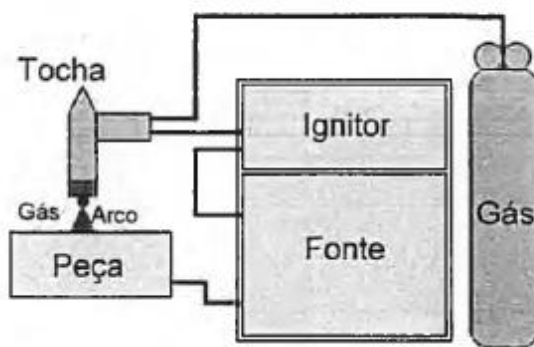


Figura 8: Equipamento básico para soldagem TIG

Fonte: MARQUES, MODENESI e BRACARENSE, 2011.

3.2.3. Soldagem MIG/MAG – GMAW

Para Marques *et all* (2011), a soldagem a arco com proteção gasosa (*Gas Metal Arc Welding - GMAW*) é um processo em que a união de peças metálicas é produzida pelo aquecimento destas com um arco elétrico estabelecido entre um eletrodo metálico nu, consumível, e a peça de trabalho. A proteção do arco e da região da solda contra contaminação pela atmosfera é feita por um gás ou mistura de gases, que podem ser inertes ou ativos. No Brasil, o processo é conhecido como MIG (*Metal Inert Gas*) quando a proteção usada é inerte ou rica em gases inertes ou MAG (*Metal Active Gas*) quando o gás usado é ativo ou contém misturas ricas em gases ativos.

De acordo com Machado (2010, p.10):

“Este processo é realizado com uma tocha na qual se encontra um fio que é fundido como material de adição. Além da função de material de adição, esse fio serve também como eletrodo, pois conduz a corrente estabelecendo um arco elétrico entre a peça ou peças a soldar e a tocha. Por sua vez, o gás de proteção flui através do bocal da tocha protegendo o arco elétrico e o material em fusão. No caso do processo MIG, o gás utilizado é geralmente o hélio ou o argônio ou mistura destes.”

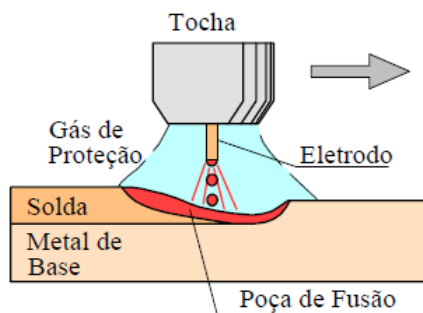


Figura 9: Soldagem GMAW

Fonte: MODENESI, MARQUES, 2006

Os equipamentos de soldagem podem ser usados manual ou automaticamente. Os de soldagem manual são mais fáceis de instalar, pois o próprio soldador realiza o trajeto do arco, e por isso são necessários basicamente três equipamentos (ESAB, 2005), e podem ser observados conforme ilustração a seguir:

- Tocha de soldagem;

- Motor de alimentação do arame (alimentador);
- Fonte de energia.

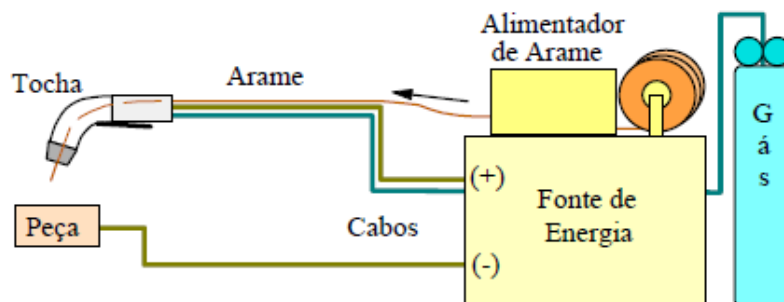


Figura 10: Equipamento para soldagem GMAW

Fonte: MODENESI, MARQUES, 2006.

Neste processo, a transferência de metal através do arco se dá, basicamente, por três métodos: aerossol (spray), globular e curto-circuito, dependendo de parâmetros operacionais, tais como o nível de corrente, sua polaridade, diâmetro e composição do eletrodo e a composição do gás de proteção. Uma quarta forma de transferência (pulsada) é possível com equipamentos especiais.

Na tabela a seguir temos algumas informações sobre as principais vantagens e aplicações do processo de soldagem GMAW, bem como os materiais e ligas que podem ser soldados por este processo.

Quadro 2 – 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, 2006

3.2.4. Soldagem com Arame Tubular – FCAW

Segundo Barbedo (2011), o processo FCAW (*Flux Cored Arc Welding*) é aquele onde a união entre os metais é obtida através do arco elétrico entre o eletrodo e a peça a ser soldada. A proteção do arco neste processo é feita pelo fluxo interno do arame podendo ser, ou não, complementada por um gás de proteção. Além da função de proteger o arco elétrico da contaminação pela atmosfera, o fluxo interno do arame pode também atuar como desoxidante através da escória formada, acrescentar elementos de liga ao metal de solda e estabilizar o arco. A escória formada, além de atuar metalurgicamente, protege a solda durante a solidificação.

MARQUES *et al* (2011) afirmam que é um processo que produz a coalescência de metais pelo aquecimento destes com um arco elétrico estabelecido entre um eletrodo tubular, contínuo, consumível e a peça de trabalho. A proteção do arco e do cordão de solda é feita por um fluxo de soldagem contido dentro do eletrodo, que pode ser suplementada por um fluxo de gás fornecido por uma fonte externa. Além da proteção, os fluxos podem ter outras funções, semelhantes às dos revestimentos de eletrodos, como desoxidar e refinar o metal de solda, adicionar elementos de liga, estabilizar o arco etc.

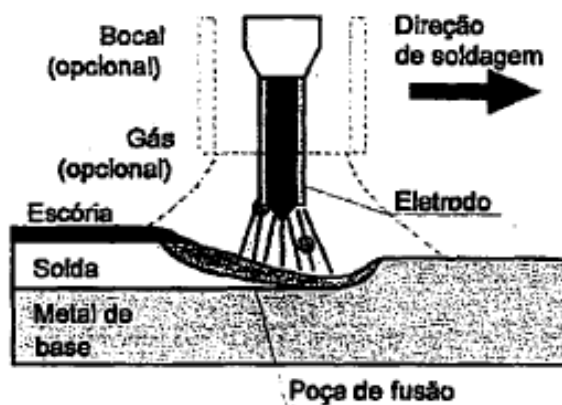


Figura 11: Esquema do processo FCAW

Fonte: MARQUES, MODENESI e BRACARENSE, 2011.

O processo FCAW possui algumas semelhanças em relação ao processo GMAW, no que diz respeito aos equipamentos e princípio de funcionamento. BARBEDO (2011) diz “este fato lhe permite compartilhar o alto fator de trabalho e a

taxa de deposição, característicos da soldagem GMAW. Por outro lado, através da soldagem FCAW é possível obter a alta versatilidade da soldagem com eletrodos revestidos no ajuste de composição química e facilidade de trabalho em campo.”

3.2.5. Soldagem a arco submerso – SAW

Assim como os processos anteriormente descritos, o processo de soldagem a arco submerso é um método em que a união entre os metais é obtida através do aquecimento e fusão destes por um arco elétrico formado entre o eletrodo metálico e o material a ser soldado. Para proteger a região a ser soldada da contaminação da atmosfera externa, a região a ser soldada é revestida por um material granular, chamado de fluxo, onde é formado o arco elétrico.

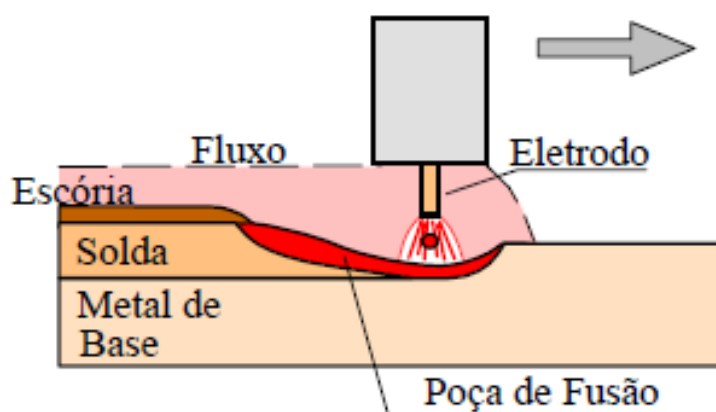


Figura 12: Soldagem a arco submerso

Fonte: MARQUES, MODENESI, 2006

O equipamento necessário a soldagem a arco submerso consiste basicamente de fonte de energia de tensão constante, alimentador de arame e sistema de controle, tocha de soldagem, porta fluxo e sistema de deslocamento da tocha. A figura a seguir ilustra os equipamentos utilizados no processo.

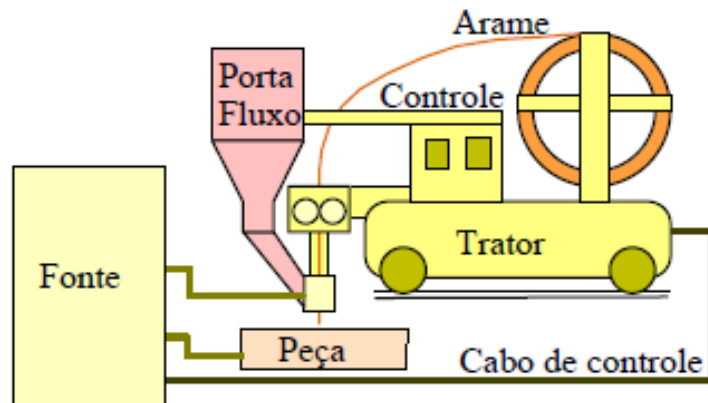


Figura 13: equipamento de soldagem SAW

Fonte: MARQUES, MODENESI, 2006

Entre as vantagens do processo, pode-se citar alta velocidade de soldagem e elevada taxa de deposição, produz soldas uniformes e de bom acabamento superficial, ausência de respingos e fumos, dispensa proteção contra radiação, pois o arco não é visível, processo mecanizado e alta produtividade. Entre desvantagens, podemos citar o número limitado de posições que se pode soldar com este processo (plana e filete horizontal), aporte térmico elevado e necessita retirada de escória entre cada passe de solda. (SCHIO, 2013).

3.3. Defeitos de soldagem

Segundo LOPES *et al* (p.02, apud ASM – *Welding Inspection Handbook*, 2000):

“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.”

Ainda segundo a norma PETROBRAS N-1738 (2013), descontinuidade é a interrupção das estruturas típicas de uma peça, no que se refere à homogeneidade de características físicas, mecânicas ou metalúrgicas. Não é necessariamente um defeito, devendo ser considerado um quando, por sua natureza, dimensões ou efeito acumulado, tornar a peça não conforme, por não atender os requisitos mínimos da norma técnica aplicável.

A American Welding Society, em seu livro *Welding Inspection*, apresenta uma classificação mais simples e direta, apresentando três categorias básicas de descontinuidades, apresentadas na tabela a seguir:

Quadro 3 – classificação das descontinuidades		
Descontinuidades dimensionais	Descontinuidades estruturais	Propriedades inadequadas
Distorção	Porosidades	Propriedades mecânicas
Dimensões incorretas da solda	Inclusões de tungstênio	Propriedades químicas e outras
Perfil incorreta da solda	Falta de fusão	
	Falta de penetração	
	Mordedura	
	Trincas e outras	

FONTE: Marques (2011)

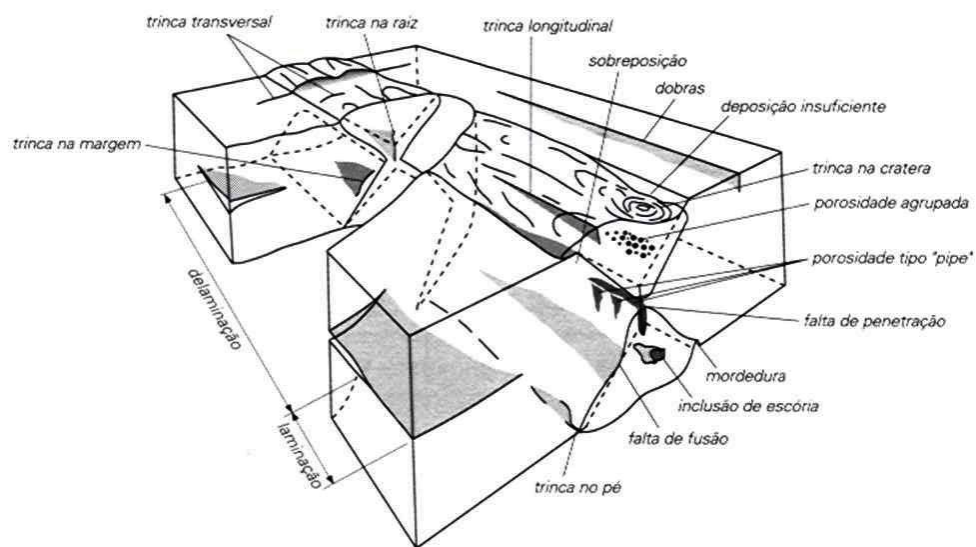


Figura 14: possíveis discontinuidades presentes em uma junta soldada

FONTE: Souza (2013)

Os defeitos podem ocorrer basicamente em três áreas da região soldada: metal base, zona de fusão ou zona termicamente afetada.

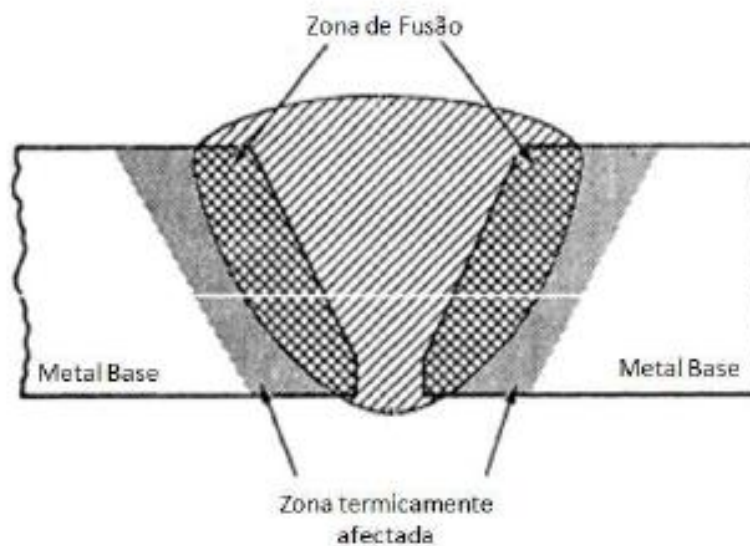


Figura 14: zonas de possíveis defeitos de soldagem

Fonte: MACHADO (2010)

3.3.1. Descontinuidades estruturais em solda por fusão

3.3.1.1. Falta de penetração

É uma falha na fusão da solda, ocorrendo geralmente na raiz da junta, originando um espaço vazio, ou descontinuidade, entre o metal base e o metal depositado.

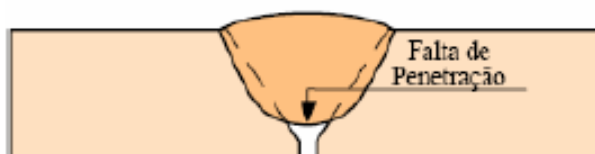


Figura 15: falta de penetração

Fonte: SANCHES (2010)

Este defeito ocasiona redução significativa da resistência da solda, além de ser ponto para possível propagação de trincas. Segundo Sanches (2010), pode ser causado por baixa corrente e velocidade de soldagem, abertura excessiva da junta, grande espessura da peça a ser soldada, ângulo ou movimento do eletrodo inadequado, e grande distância entre eletrodo e a peça.

3.3.1.2. Falta de fusão

Segundo Souza (2013), este defeito é a ausência de fusão entre os passes de solda ou entre o cordão e o metal base. MODENESI (2001) diz que a falta de fusão é causada por um aquecimento inadequado do material a ser soldado, em função da manipulação errada do eletrodo, do uso de energia de soldagem muito baixa, da soldagem em chanfros muito fechado, ou falta de limpeza da junta. Pode ocasionar intensa concentrações de tensões e facilitar iniciação de trincas.

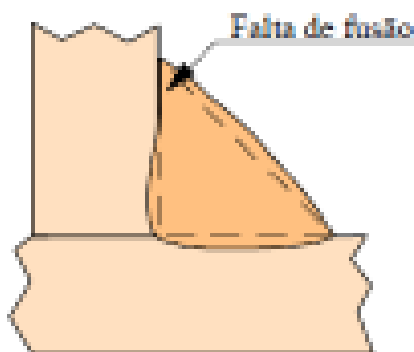


Figura 16: falta de fusão

Fonte: MODENESI (2001)

A tabela a seguir apresenta de forma clara causas e soluções para a eliminação ou diminuição dos dois defeitos explicados acima.

Quadro 4: falta de penetração/fusão – possíveis causas e soluções		
Causas	Possíveis soluções	Processos de soldagem
Parâmetros de soldagem inadequados	Aumentar a voltagem e a velocidade de alimentação do arame. Reduzir a velocidade de soldagem. Diminuir a distância do bico de contato à peça. Reduzir o diâmetro do arame. Reduzir a dimensão de cada cordão de solda.	GMAW / SAW /SMAW
Manipulação inadequada da tocha: tocha descentralizada no chanfro, no passe de raiz. Inclinação excessiva da tocha para o lado. Falta de acesso ao chanfro.	Distribuir o calor do arco em ambas as faces do chanfro. Manter a inclinação correta Alterar o projeto da união ou a sequência de montagem, ou ainda, usar um bocal menor.	GMAW
Desenho de chanfro inadequado: Ângulo de chanfro muito pequeno. Face da raiz (nariz) muito grande. Desalinhamento.	Aumentar a abertura da raiz. Aumentar o ângulo do chanfro. Reduzir o “nariz” Reduzir o desalinhamento.	GMAW / SAW /SMAW

<p>A poça de fusão se adianta em relação ao arco e impede a perfeita fusão das bordas:</p> <p>Velocidade de soldagem muito baixa ou taxa de deposição muito alta. Este defeito pode ocorrer mais facilmente na posição vertical descendente</p>	<p>Reduzir a dimensão de cada cordão individual.</p> <p>Diminuir a velocidade de alimentação de arame na posição vertical descendente.</p>	<p>GMAW / SAW / SMAW</p>
---	--	--------------------------

Fonte: NOVAIS (2010)

3.3.1.3. Mordeduras

É uma descontinuidade estrutural na qual ocorre a fusão do metal de base nas extremidades do cordão de solda, sem ocorrer o preenchimento da área, ocasionando o surgimento de reentrâncias agudas entre o cordão de solda e o metal de base (MODENESI, 2001). A forma inadequada de manipular o eletrodo, velocidade de soldagem alta e comprimento excessivo do arco podem ocasionar o surgimento desse defeito.

Quadro 5– mordeduras: possíveis causas e soluções		
Causas	Possíveis soluções	Processos de soldagem
<p>Manipulação inadequada da tocha ou eletrodo:</p> <p>Tocha descentralizada no chanfro, no passe de raiz.</p> <p>Inclinação excessiva da tocha para o lado.</p> <p>Falta de acesso ao chanfro</p>	<p>Distribuir o calor do arco em ambas as faces do chanfro.</p> <p>Manter a inclinação correta</p> <p>Alterar o projeto da união ou a sequência de montagem, ou ainda, usar um bocal menor.</p>	<p>GMAW / SAW / SMAW</p>
<p>Tensão / Corrente muito alta – tipo de transferência</p>	<p>Ajustar Tensão Corrente – evitar a transferência Globular</p>	<p>GMAW / SAW / SMAW</p>
<p>Velocidade de soldagem muito alta</p>	<p>Diminuir a velocidade de soldagem / ajustar aporte de calor a velocidade de soldagem</p>	<p>GMAW / SAW / SMAW</p>

Fonte: NOVAIS (2010)

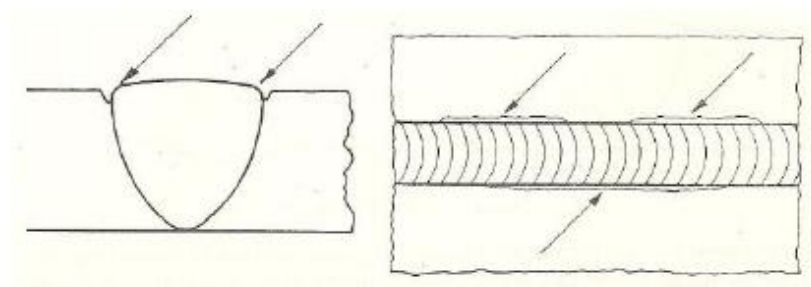


Figura 17: mordeduras

Fonte: SOUZA (2013)

3.3.1.4. Fendas (trincas)

Segundo Marques *et all* (2011), são as descontinuidades consideradas mais graves em soldagem, contribuindo no início da fratura frágil, pois são grandes concentradores de tensão. Podem-se entender as trincas como sendo uma resposta da incapacidade do material em atender os esforços impostos localmente pelas tensões decorrentes do processo de soldagem. O excesso de calor, acarretando expansões e contrações na peça, causa o surgimento de tensões, bi ou triaxiais na região da solda. As tensões aliada a mudança da microestrutura durante a soldagem, e/ou a presença de certos elementos, podem resultar na formação de trincas.

Quadro 6: trincas – possíveis causas e soluções		
Causas	Possíveis soluções	Processos de soldagem
Projeto de junta inadequado.	Adotar chanfros e condições gerais da junta com dimensões adequadas. Realizar uma preparação, ponteamto e montagem da junta com alinhamento e espaçamentos adequados.	GMAW / SAW/ SMAW
Elevada restrição dos componentes estruturais (Restrição Geométrica)	Usar pré-aquecimento, observar a montagem, Ajustar todos os parâmetros de soldagem para reduzir as tensões impostas a junta.	GMAW / SAW/ SMAW

Calor excessivo na junta, causando deformações; contrações e distorções	Reduzir a corrente ou a tensão Aumentar a velocidade da soldagem. Contrabalancear o aporte	GMAW / SAW/ SMAW
Relações Dimensionais Inadequadas	Alargar o perfil do cordão, diminuir a penetração.	GMAW / SAW/ SMAW
Cordão de solda muito pequeno (passes de raiz ou de filete)	Reduzir a velocidade de soldagem ou aumentar a seção transversal do cordão.	GMAW / SAW/ SMAW
Fragilização por calor causado pela presença de elementos como o Enxofre (S)	Utilizar consumíveis com maior teor de Manganês. Diminuir a altura do arco. Adequar a geometria do chanfro para melhorar a diluição. Alterar a sequência de passes para reduzir a restrição durante o resfriamento. Alterar o consumível ou metal base para obter uma adequada relação entre % Manganês e % de Enxofre.	GMAW / SAW/ SMAW
Têmpera da Zona termicamente Afetada (ZTA).	Realizar pré-aquecimento para retardar o resfriamento.	GMAW / SAW/ SMAW
Tensões Residuais muito elevadas.	Efetuar tratamento térmico de Alívio de Tensões.	GMAW / SAW/ SMAW
Fragilização por Hidrogênio	Utilizar consumíveis secos, (arames, eletrodos, gases). Remover contaminantes superficiais, (graxas, óleos, tintas de marcação) Manter a temperatura elevada após a conclusão da soldagem para difusão do Hidrogênio (Pós Aquecimento).	GMAW / SAW/ SMAW

Fonte: NOVAIS (2010)

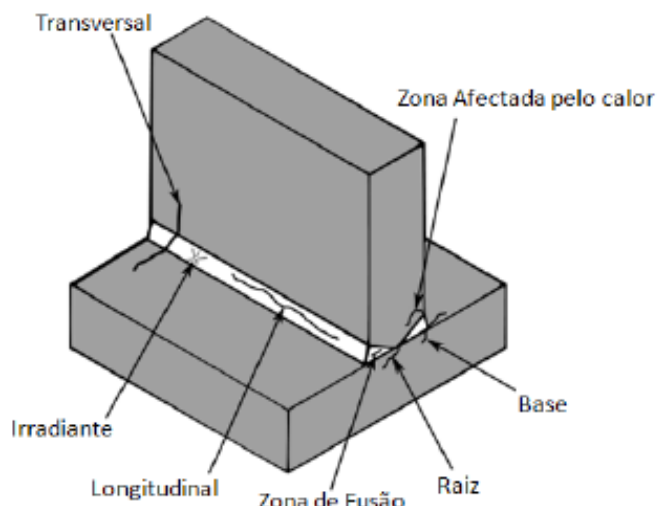


Figura 18: junta soldada apresentando trincas nos cordões de solda

Fonte: MACHADO (2010)

3.3.1.5. Porosidades

Segundo Machado (2010), são os mais comuns tipos de defeitos existentes nas juntas soldadas. Trata-se de vazios na zona do cordão de soldagem, tendo origem na evolução de gases durante a solidificação da solda, e geralmente tem formato esférico, conforme a ilustração a seguir. Pequenas quantidades de poros não são prejudiciais, mas em excesso pode ocasionar perdas de propriedades mecânicas, reduzindo a seção efetiva da junta. (MODENESI, MARQUES E BRACARENSE, 2011).

Quadro 7: porosidades – possíveis causas e soluções		
Causas	Possíveis soluções	Processos de soldagem
Baixa vazão de gás ou obstrução da saída de gás por respingos.	Aumentar a vazão de gás e/ou limpar o bocal regularmente	GMAW
Excesso de vazão de gás (turbulência)	Diminuir a vazão de gás para eliminar a turbulência	GMAW
Excessivas correntes de ar	Proteger a região de solda do vento	GMAW / SMAW
Arame oxidado ou sujo	Utilizar exclusivamente arames limpos e secos	GMAW / SMAW

Proteção insuficiente devido a elevada velocidade de soldagem	Reduzir a velocidade	GMAW
Tocha muito distante da peça	Aproximar a tocha da peça e, ao final da solda, mantê-la sobre a poça de fusão até que se solidifique.	GMAW
Ângulo de deslocamento muito grande.	Diminuir o ângulo de deslocamento da tocha	GMAW
Metal base contaminado (óleo; graxa; tinta; oxidação)	Melhorar a limpeza da peça	GMAW / SAW / SMAW
Tensão muito alta / Corrente muito baixa	Diminuir a tensão / aumentar corrente	GMAW / SAW / SMAW
Contaminação do gás de proteção	Utilizar gases de proteção de alta qualidade e verificar vazamentos, inclusive oring da guia espiral, checar pré-vazão.	GMAW
Metal Base com S>0,05% e/ou alto nível de inclusões	Utilizar metais base com S<0,05% e baixo nível de inclusões	GMAW / SAW / SMAW
Arames sem desoxidantes (fora da especificação) ou inadequados	Utilizar consumíveis adequados à aplicação	GMAW / SAW

Fonte: NOVAIS (2010)

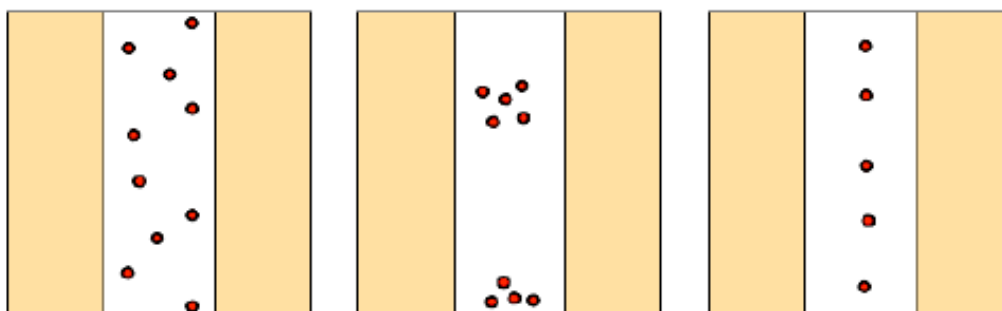


Figura 19: formação de poros na junta soldada

Fonte: SANCHES (2010)

3.3.1.6. Inclusões

Este tipo de defeito consiste no aprisionamento de corpos estranhos na massa de metal fundido, originados após reações que se processam e são mantidos na peça após a solidificação da solda. Pode haver vários tipos de inclusões, tais como inclusões de escória, de óxidos, metálicas, de tungstênio, no caso da solda TIG etc., sendo as inclusões de escória as mais frequentes (MACHADO, 2010). Segundo Modenesi (2001), inclusões de escória podem agir como concentradores de tensão, favorecendo a formação de trincas.

Quadro 8: inclusões – possíveis causas e soluções		
Causas	Possíveis soluções	Processos de soldagem
Manipulação inadequada do bocal ou eletrodo, no passe de raiz.	Manter a inclinação correta e a manipulação durante a soldagem. Alterar o projeto da união ou a sequência de montagem.	SAW / SMAW
Falha na limpeza entre passes.	Ajustar Tensão Corrente – evitar a transferência Globular	SAW / SMAW

Fonte: NOVAIS (2010)

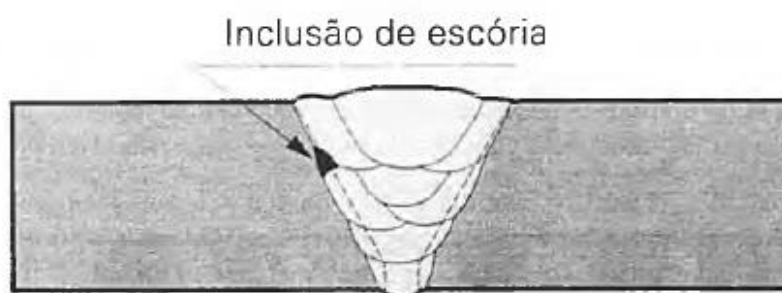


Figura 20: inclusão de escória

Fonte: MODENESI, MARQUES E BRACARENSE (2011)

É importante salientar que os defeitos não aparecem isoladamente na peça/junta soldada. Segundo Novais (2010), na prática é comumente observada duas ou até mais imperfeições combinadas.

4. MATERIAIS E MÉTODOS

4.1. Metodologia de pesquisa

A metodologia escolhida para o desenvolvimento deste trabalho foi a pesquisa bibliográfica, em diversas fontes relevantes publicadas anteriormente. Para realização do trabalho, foram utilizadas fontes de publicações de materiais de revistas, teses de doutorados, dissertações de mestrado, artigos de universidades renomadas, trabalhos de conclusão de curso e livros. A classificação quanto ao método científico utilizado é a do tipo dedutivo, que, de acordo com Prodanov e Freitas (2013), “é o método que parte do geral e desce ao particular. A partir de princípios, leis ou teorias consideradas verdadeiras e indiscutíveis, prediz a ocorrência de casos particulares com base na lógica”. A pesquisa deu ênfase aos principais defeitos de soldagem que ocorrem nos processos industriais, e nos ensaios não destrutivos empregados na detecção desses defeitos, além da metodologia estatística que é utilizada para garantir a confiabilidade dos ensaios, a curva PoD.

Inicialmente foi feita uma apresentação geral do estado da arte sobre o tema proposto, apresentando o conceito de soldagem, as divisões do processo (por fusão e por pressão) e detalhando os principais processos de soldagem por fusão, que foram o objeto de estudo do presente trabalho. Em seguida foram explorados os principais defeitos, ou discontinuidades, que são formados durante os processos de soldagem, a natureza de formação desses defeitos, bem como formas de eliminação ou redução dos mesmos. Também foram estudados os principais ensaios não destrutivos aplicados na detecção desses defeitos, e como esses ensaios são realizados e padronizados através de normas técnicas. Por último, foi estudado a técnica da curva *PoD*, que é uma metodologia para cálculo da probabilidade de detecção dos defeitos estudados neste trabalho.

5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1. Ensaio não destrutivo para detecção de defeitos de soldagem

A escolha de um determinado ensaio depende de alguns parâmetros, que devem ser levados em consideração, tais como a natureza do material a ser ensaiado, dimensões, tipo de superfície do material (lisa ou rugosa), o tipo de defeito, posição do defeito, entre outros.

Os ensaios mecânicos podem ser classificados em duas categorias: quanto à integridade geométrica e dimensional da peça ou componente e quanto à velocidade de aplicação da carga. (GARCIA, 2012)

Quanto à integridade geométrica e dimensional da peça ou componente os ensaios podem ser de dois tipos:

- Destrutivos: provocam a inutilização parcial ou total da peça (tração, dureza, fadiga, fluência, torção etc.);
- Não-destrutivos: não comprometem a integridade da peça (raios X, ultra-som, líquidos penetrantes etc.).

Quanto à velocidade de aplicação da carga, os ensaios podem ser:

- Estáticos: quando a carga é aplicada de maneira suficientemente lenta;
- Dinâmicos: quando a carga é aplicada rapidamente ou ciclicamente;
- Carga constante: quando a carga é aplicada durante um longo período;

Os ensaios mecânicos proporcionam muitas vantagens, dentre os quais se destacam: prevenção de acidentes, garantia de satisfação do cliente, controle dos problemas de manufatura, redução de custos e manutenção da qualidade. (ZOLIN, 2010).

De acordo com Lopes et al. (apud WEINER et.al, 2005), “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.”

Os ensaios não destrutivos são aqueles que, quando realizados sobre peças semiacabadas ou acabadas, não prejudicam nem interferem com o futuro das mesmas. Em suma, são ensaios que não deixam vestígios de sua utilização sobre a peça ensaiada.

As principais vantagens dos END's são:

- Os ensaios são realizados diretamente nos elementos a serem utilizados posteriormente; conseqüentemente, eles anulam a dúvida quanto ao elemento.
- Várias regiões críticas de uma mesma peça podem ser examinadas simultânea ou sucessivamente.
- Os ensaios auxiliam a manutenção preventiva, permitindo repetições de ensaio em uma ou em várias unidades, durante um período de tempo.
- Materiais e peças de altos custos de produção não são perdidos pelos ensaios.
- Em geral, eles requerem pouca ou nenhuma preparação de amostras, podem ser portáteis e comumente mais baratos e mais rápidos que os ensaios destrutivos.

Algumas desvantagens:

- Por envolverem medições indiretas de suas propriedades, o comportamento em serviço da peça ensaiada é resultado de um significado indireto.
- São, em geral, qualitativos e poucas vezes quantitativos.
- Na interpretação das indicações dos ensaios, são necessárias experiências prévias.

Os tipos de END mais usados na inspeção de juntas soldadas são (MODENESI, 2001):

5.1.1. Inspeção visual

Por envolverem medições indiretas de suas propriedades, o comportamento em serviço da peça ensaiada é resultado de um significado indireto. São, em geral, qualitativos e poucas vezes quantitativos. Na interpretação das indicações dos ensaios, são necessárias experiências prévias (MODENESI, 2001).

LOPES et.al (2010) complementa dizendo que a inspeção visual é um método de avaliação primária de alguns programas de controle de qualidade, podendo ser

facilmente realizada, pois é uma técnica de baixo custo que não exige o uso de equipamentos especiais além de lentes de aumento, boroscópios ou sistemas de câmaras televisivas.

5.1.2. Inspeção com líquidos penetrantes

O ensaio por líquidos penetrantes baseia-se na ação de penetração de líquidos em trincas e rachaduras existentes na superfície das juntas ou peças soldadas, por meio do fenômeno da capilaridade. É aplicado, portanto, na verificação da existência de trincas superficiais difíceis de serem detectadas a olho nu. (GARCIA, 2012). MODENESI (2001) complementa dizendo que para a remoção posterior dos líquidos penetrantes é usado um material absorvente (revelador) na superfície examinada.

As fases da aplicação do ensaio por líquidos penetrantes estão esquematizados na figura a seguir:

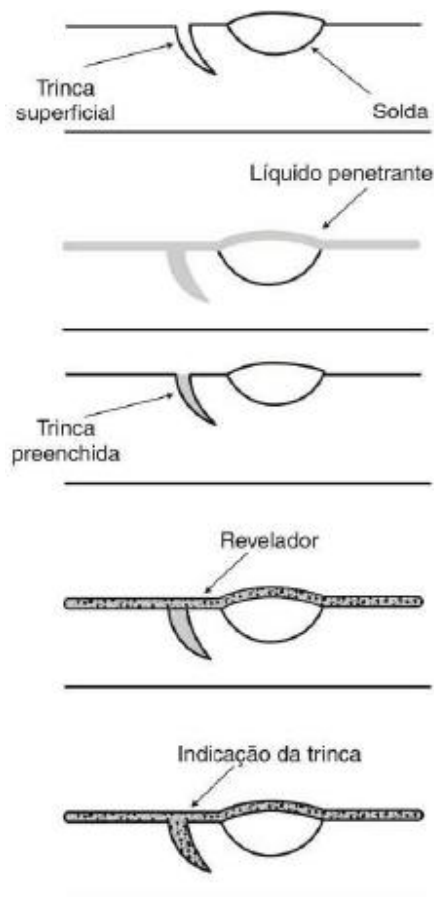


Figura 21: etapas do processo de ensaio por líquidos penetrantes

Fonte: GARCIA (2012)

A norma ABNT NBR 16450 estabelece que o ensaio deve ser conduzido na temperatura mínima estabelecida no procedimento de tolerância de 0°C e -5°C. Imediatamente antes da aplicação do penetrante no bloco de ensaio e estabilizada a temperatura mínima, deve-se efetuar uma leve limpeza da superfície do bloco com panos secos e limpos de forma a remover qualquer condensado que possa interferir no ensaio.

- Remoção com água: depois de decorrido o tempo de penetração especificado, a remoção do excesso de penetrante deve ser conduzida por meio de um spray de água por um tempo máximo de 1 min e em seguida efetuar a secagem com panos secos e limpos.

- Remoção por solvente: depois de decorrido o tempo de penetração especificado, a remoção do excesso de penetrante deve ser conduzida primeiramente com panos levemente umedecidos em solvente e em seguida com panos secos e limpos.

A revelação deve ser efetuada no tempo máximo estabelecido no procedimento após o término do processo de remoção do excesso do penetrante. A avaliação do ensaio deve ser efetuada depois de decorrido o tempo mínimo de revelação especificado no procedimento e de acordo com o nível de sensibilidade requerido.

5.1.3. *Inspeção com partículas magnéticas*

Segundo a norma ABNT NBR NM 342, o método de partículas magnéticas é baseado no princípio de que as linhas do campo magnético, quando presentes em um material magnético, são distorcidas por uma mudança na continuidade do material, como uma mudança brusca na geometria do material ou presença de uma descontinuidade. Se uma descontinuidade for aberta ou estiver próxima à superfície do material magnetizado, as linhas de fluxo são distorcidas na superfície. Esta distorção é conhecida como campo de fuga. A aplicação de finas partículas magnéticas sobre a área das descontinuidades, enquanto o vazamento de fluxo ocorre, gera uma atração no local, e o acúmulo das partículas é visível sob condições apropriadas de iluminação. O princípio básico do ensaio por partículas magnéticas está representado na figura a seguir:

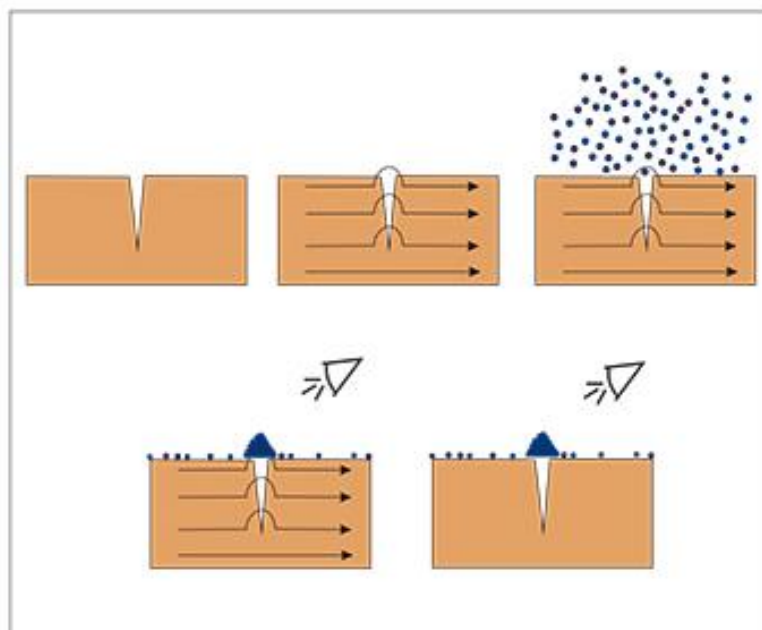


Figura 22: princípio do ensaio por partículas magnéticas

Fonte: MODENESI (2001)

Os ensaios por partículas magnéticas utilizam equipamentos do tipo estacionários ou portáteis, sendo necessária uma fonte de corrente alternada, corrente contínua ou corrente retificada de meia onda ou onda completa para produzir campos magnéticos adequados nas peças a serem ensaiadas. O equipamento deve possibilitar a regulagem da corrente de magnetização a ser utilizada em cada ensaio, permitindo o ajuste do campo magnético.

A superfície da peça a ser ensaiada deve ser limpa e livre de óleo, graxa, areia, ferrugem e carepas soltas, ou de qualquer outra substância que possa interferir nos resultados dos ensaios. No caso de ensaio por via seca, a área a ser ensaiada deve estar seca; no caso de ensaio por via úmida colorida em superfícies do tipo bruto de soldagem, jateadas, rugosas ou esmerilhadas, deve ser utilizada tinta de contraste.

A sequência de operação no ensaio de partículas magnéticas refere-se à relação entre o tempo de aplicação das partículas magnéticas e o estabelecimento do campo magnético. Utilizam-se duas técnicas básicas como sequência de operação: técnica contínua ou técnica residual, ambas comumente empregadas na indústria.

5.1.4. Inspeção por ultrassom

Segundo o Guia de END e Inspeção, da ABENDI, o ensaio por ultrassom consiste na transmissão de vibrações para o material que será inspecionado. O tempo de trânsito dessas vibrações dentro do material é capturado pelo equipamento, assim é possível a localização de falhas internas no material. Para serem consideradas ultrassônicas, as vibrações mecânicas devem possuir frequências acima de 20kHz, acima da capacidade da audição humana. Encontra sua maior aplicação justamente na detecção de falhas em peças soldadas, laminadas, fundidas, forjadas etc.

Para inspeção em peças metálicas, este ensaio apresenta um grande poder de penetração (até cerca de 6m), uma elevada sensibilidade e a capacidade de localizar descontinuidades com precisão. Devido as suas características, é um método de ensaio muito adequado para a detecção de descontinuidades planares (como trincas). Por outro lado, a interpretação dos resultados deste ensaio é relativamente difícil e a detecção de descontinuidades localizadas próximas à superfície pode ser problemática (MODENESI, 2001).

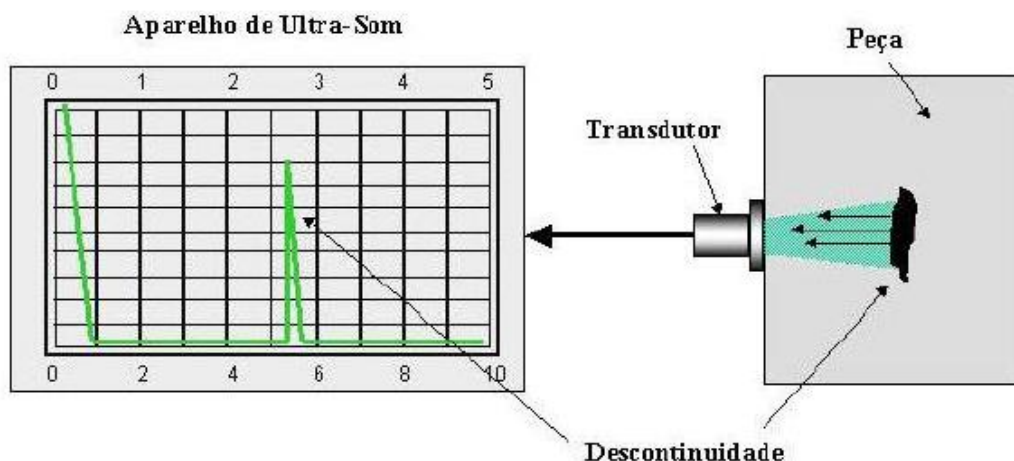


Figura 23: ensaio ultrassônico detectando a descontinuidade na peça

Fonte: CÂNDIDO (2010)

O ensaio ultrassônico, devido a sua alta sensibilidade de detecção a descontinuidades, tem se destacado atualmente como o principal método de inspeção de estruturas soldadas (DITCHBRUN et.al, 1996). Outra aplicação recente do ultrassom é a caracterização de tensões residuais em soldas. Essas tensões residuais são originadas

principalmente de tensões de compressão e tração impostas pelos subsequentes ciclos térmicos de aquecimento e resfriamento de soldagem a que são impostas a zona fundida e adjacências.

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. Além disso, as imprecisões podem ser causadas por outros fatores, como atenuação, acoplamento, resolução e características do equipamento. A técnica pulso eco está representada na ilustração a seguir:

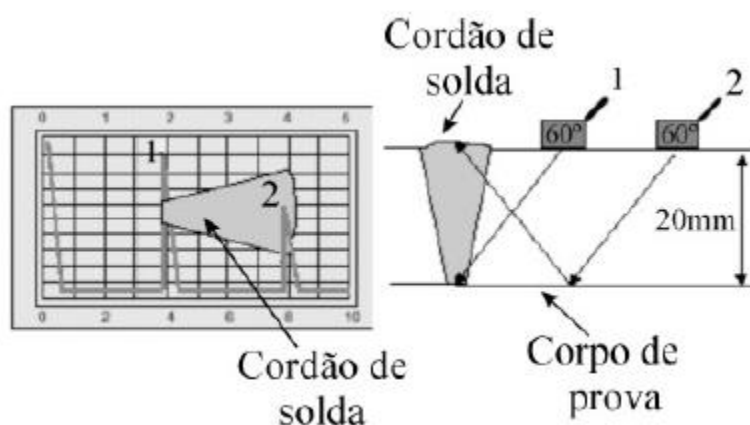


Figura 24: técnica do pulso eco aplicada em cordões de solda

Fonte: LOPES (2010)

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 descontinuidades em juntas soldadas.

5.1.5. Radiografia

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.

Conforme Garcia (2012), o exame de raios X, também conhecido como radiografia, xerografia ou fluoroscopia, é um método não destrutivo de detecção da presença de discontinuidades na massa do material, como inclusões, bolhas, mudanças de massa específica (densidade), microtrincas etc. Modenesi (2001) complementa dizendo que é um método de END baseado em variações de absorção de radiação eletromagnética penetrante (raio X e gama) devidas a alterações de densidade, composição e espessura da peça sob inspeção.

Este método é usado para detectar a presença de discontinuidades internas e externas em metais ferrosos e não ferrosos e em materiais não metálicos e permite a obtenção de um registro permanente do resultado de ensaio. Tem um importante uso na inspeção de peças soldadas e fundidas, com espessuras de até 100mm (aço) e particularmente quando destinadas a aplicações críticas. Uma desvantagem é que o processo tende a ser caro e lento, pois pode necessitar, no caso de peças de maior espessura, tempos de exposição que pode levar horas. Como o método é baseado em diferentes períodos de exposição, defeitos planares, como trincas, cuja orientação não seja paralela à direção de propagação da radiação, são dificilmente detectados por este ensaio. O resultado do ensaio é, em geral, registrado em filme ou, menos comumente, em telas fluorescentes. Este resultado é interpretado em termos das diferenças de exposição dos filmes devido às diferenças de espessura, densidade ou composição da peça associadas com as suas discontinuidades e variações dimensionais.

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.

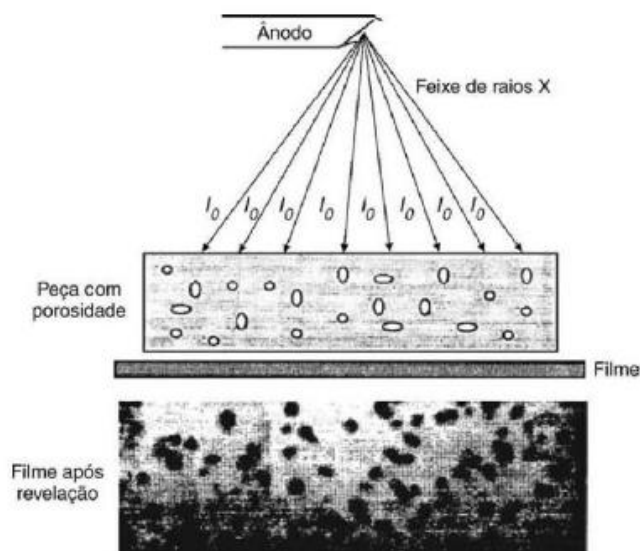


Figura 25: ensaios de raios X com o filme radiográfico após revelação

Fonte: GARCIA (2012)

5.2. Medição da confiabilidade dos ensaios não destrutivos: a curva *POD*

Apesar das técnicas de ensaios não destrutivos serem ferramentas essenciais na avaliação de integridade de um equipamento, rotineiramente são utilizadas técnicas manuais no que diz respeito ao procedimento de inspeções, dependendo da operacionalidade humana na obtenção dos resultados. A falha humana é um dos fatores que prevalecem na geração de erros de inspeção, e por isso essas técnicas apresentam baixa confiabilidade.

Dessa forma, por meio de uma análise estatística, é possível quantificar a confiabilidade de detecção de defeitos para uma determinada técnica de END empregada. A ferramenta para essa análise é denominada *PoD* (“*Probability of Detection*”), que pode ser obtido através de vários resultados experimentais a partir de um corpo de prova, ou pode ser analisado através de uma modelagem matemática.

Supondo que para a detecção de uma descontinuidade foram realizadas 10 inspeções, sendo que, do total dos resultados, apenas 3 apontaram que de fato estava presente uma descontinuidade. É fácil visualizar que esta descontinuidade possui 30% de detectabilidade, analisando a amostra de 10 inspeções. Assim, uma maneira simples

de calcular a probabilidade de detecção de uma descontinuidade pode ser através da sua proporção de detecção, através da equação a seguir:

$$p = \frac{k}{m}$$

Onde:

k = número de detecções realizadas com sucesso;

m = número de inspeções de um defeito.

5.2.1. Curvas *PoD*

Segundo Bartholo (2011), As curvas *PoD* são curvas matemáticas, descritas de maneira similar a uma função cumulativa de probabilidades, nas quais o valor mínimo encontrado é referente a 0% e o valor máximo é referente a 100%. Essas curvas são normalmente descritas em função de uma dimensão da descontinuidade (a), a qual pode ser o comprimento, altura ou profundidade.

Para se desenvolver uma curva *PoD* de uma análise experimental, é importante que os corpos de prova ou o equipamento a serem inspecionados possuam uma quantidade de defeitos suficientemente grande, de forma a representar a situação de trabalho que será confrontada. Além disso, a escala de tamanhos deve ser ampla o bastante para que a curva descreva bem a confiabilidade sem necessidades de extrapolações exageradas da curva. Finalmente, quanto mais inspeções de um mesmo defeito forem realizadas, mais sutil será o intervalo de confiança. Quando são necessários altos índices de confiabilidade, é preciso aumentar o número de inspeções para que esses dados estatísticos se apresentem de uma maneira bem refinada.

Na figura 26 temos um exemplo de uma curva *PoD* ideal.

Para o caso da curva ideal, o valor crítico para a dimensão da descontinuidade (a_{critico}) é bem definido. Valores inferiores à dimensão crítica apresentam probabilidade de detecção igual a 0 (não-deteção), e valores superiores a dimensão crítica, probabilidade de detecção igual a 1 (deteção).

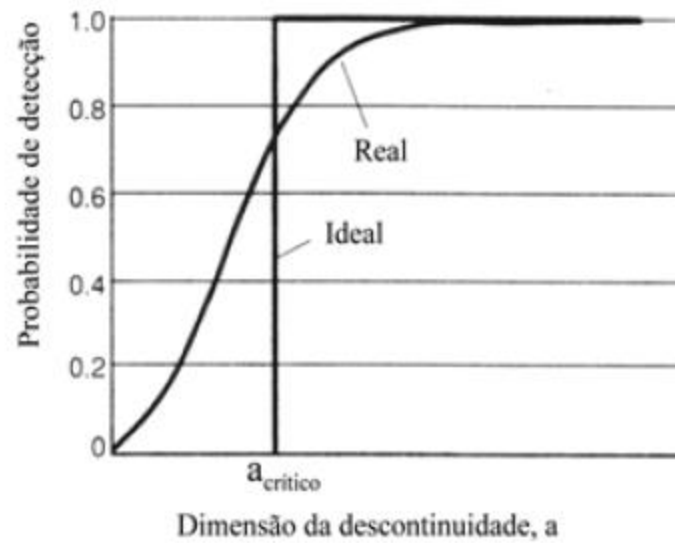


Figura 26: curva *PoD* para situações real e ideal
 Fonte: FRANÇA (2015)

5.2.2. Parâmetros da curva *PoD*

Existem três parâmetros que caracterizam de forma eficiente as curvas *PoD*. São os valores de dimensão, denominados: a_{50} , a_{90} e $a_{90/95}$. O valor de a_{50} representa 50% de chance de que determinado defeito esteja de fato presente na peça (50% de detecção). De forma análoga, a_{90} significa o valor de dimensão de 90% de chance de detecção. E $a_{90/95}$, representa a chance de 90% de chance de detecção com 95% de confiança.

5.2.3. Modelagem de curvas *PoD*

5.2.3.1. Análise Hit/miss

Existem duas análises de confiabilidade dos dados para desenvolver a curva $PoD(a)$, ou seja, probabilidade em função do defeito (a).

Originalmente os resultados dos ensaios não destrutivos eram registrados em função da detecção ou não do defeito presente na peça inspecionada. Este método é

chamado *hit/miss*, os dados são registrados em termos de detecção (*hit*) ou não detecção (*miss*) do defeito. Essa análise é apropriada para os ensaios não destrutivos de líquidos penetrantes e partículas magnéticas, por exemplo.

Dessa forma, podemos analisar o banco de dados das inspeções de maneira binária. Para a detecção de um defeito, representa-se pela indicação 1, enquanto a não detecção é representada pela indicação 0. Pode-se observar uma aplicação deste método em um caso concreto na tabela a seguir.

Devido a essa indicação binária, é possível observar dois patamares, se for utilizado como ferramenta auxiliar um gráfico para detecção, sendo necessário para gerar o gráfico trabalhar com duas equações:

$$\text{Hit: } PoD(a) = 1$$

$$\text{Miss: } PoD(a) = 0$$

Quadro 9: dados <i>hit/miss</i>		
Numero da amostra	Detectável?	Comprimento da trinca
1	0	0,0125
2	1	0,032
3	0	0,0075
4	0	0,016
5	1	0,025
6	0	0,0096
7	0	0,0215
8	0	0
9	1	0,038
10	0	0,0125
11	0	0,0085
12	1	0,021
13	1	0,028

Fonte: FRANÇA (2011)

A modelagem da curva *PoD* para a análise *hit/miss* pode ser observado na figura a seguir. A curva descreve a probabilidade de detecção dos dados acima transcritos, iniciando do menor defeito não detectado e terminando no maior defeito detectado. A escala do gráfico é logarítmica.

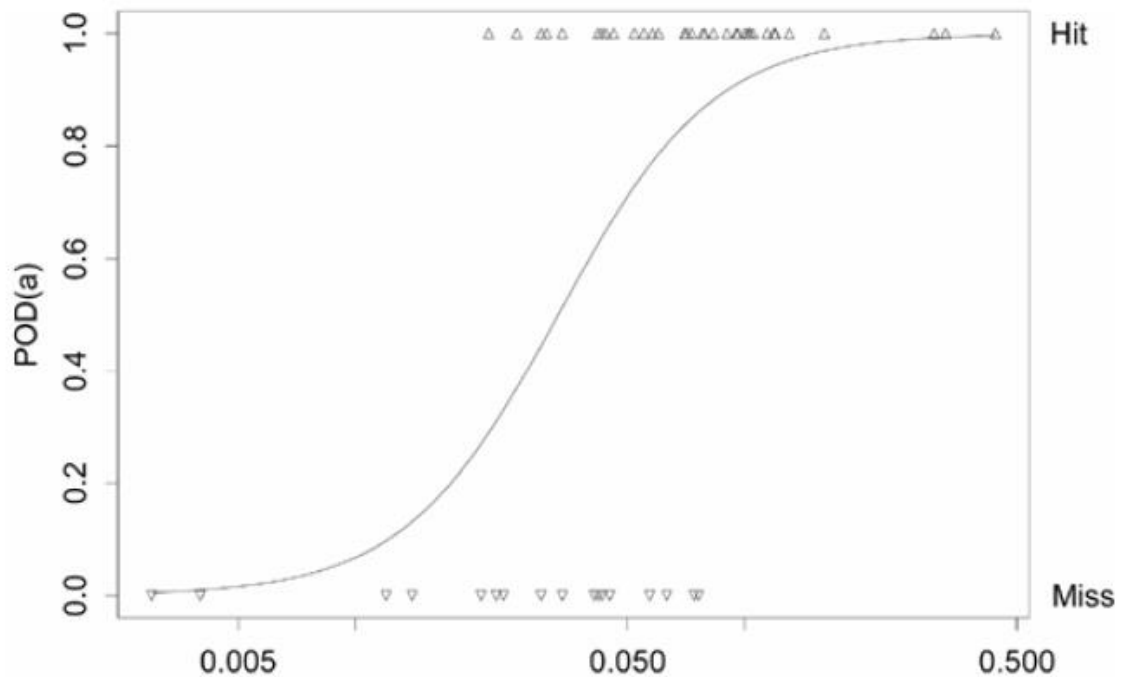


Figura 27: Análise *hit/miss*
Fonte: BARTHOLO (2011)

Pode-se também representar graficamente patamares de detecção e não detecção em função do tamanho das descontinuidades. Obviamente, descontinuidades pequenas são mais difíceis de serem detectadas, por isso o patamar de não detecção localiza-se no canto inferior esquerdo do gráfico (região B). Do mesmo modo, grandes descontinuidades são facilmente detectadas, de modo que o patamar de detecção encontra-se no canto superior direito do gráfico (região A), de acordo com a figura a seguir.

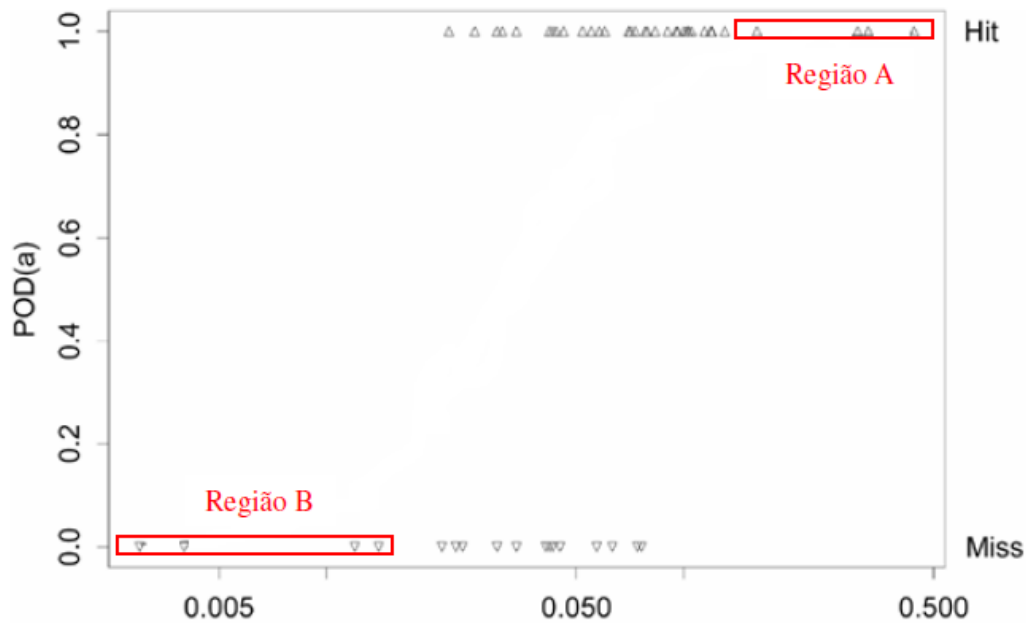


Figura 28: Patamares de detecção
 Fonte: BARTHOLO (2011)

5.2.3.2. Análise \hat{A} vs A

O segundo método, \hat{a} versus a , tem-se uma informação referente ao sinal de resposta. Se o sinal de resposta puder ser interpretado como função do tamanho do defeito, esse dado é denominado \hat{a} .

No caso do ultrassom, o sinal de resposta é a reflexão da onda originada ao encontrar alguma superfície refletora (um defeito, por exemplo). Esse sinal possui uma magnitude que é convertida no tamanho de defeito medido (\hat{a}) em função de um tamanho real de defeito (a). Com isso, temos os seguintes casos de dimensionamento:

- ✓ $\hat{a} = a$ - tamanho detectado é igual ao tamanho do defeito
- ✓ $\hat{a} > a$ – tamanho detectado é maior que o tamanho real
- ✓ $\hat{a} < a$ – tamanho detectado é menor que o tamanho real

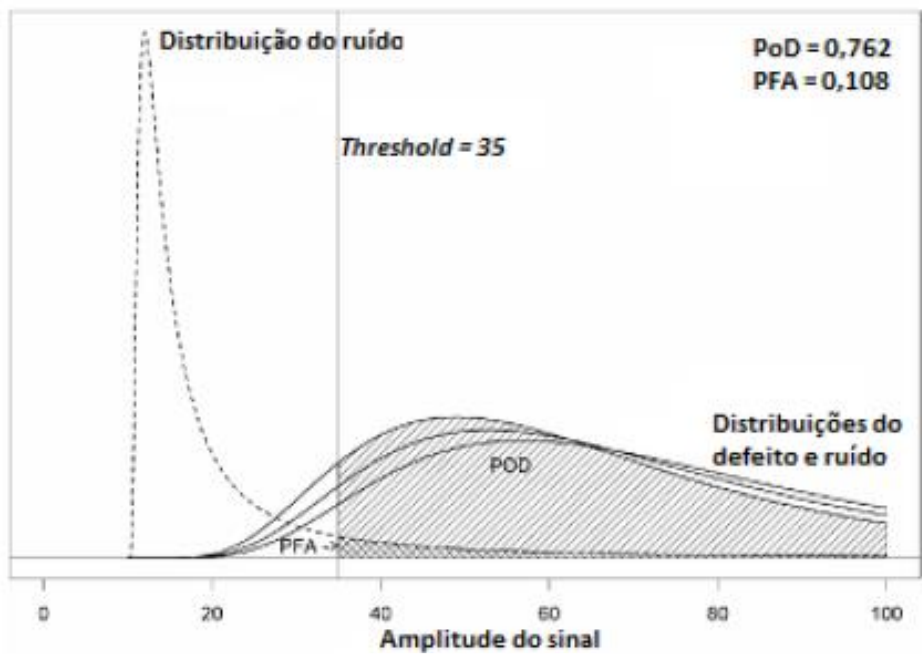


Figura 29: distribuição dos sinais de ultrassom
Fonte: BARTHOLO (2011)

CONCLUSÃO

De acordo com o exposto neste trabalho, podemos verificar que o objetivo proposto pode ser alcançado, visto que o estudo trouxe uma contribuição significativa para o campo da soldagem, principalmente no estudo da confiabilidade dos ensaios empregados na inspeção de defeitos, que é a etapa crucial na inspeção de soldagem.

Este trabalho mostrou também a importância de se ter um conhecimento profundo dos defeitos de soldagem, tendo em vista que a presença destes defeitos interfere diretamente na qualidade da estrutura soldada, e por isso deve ser minimizada ao máximo.

Conclui-se que a curva *PoD* é uma excelente ferramenta para atestar a confiabilidade dos ensaios não destrutivos aplicados na detecção de descontinuidades de uma junta soldada, tendo em vista sua facilidade de aplicação e eficiência, já que a curva é descrita em função de uma dimensão de descontinuidade.

A partir deste estudo foi possível concluir que a curva *PoD* é uma ferramenta poderosa e de custo relativamente baixo quando se deseja avaliar a confiabilidade de uma determinada técnica não destrutiva.

De forma paralela ao estudo sobre a confiabilidade dos ensaios, a presença de defeitos pode influenciar também na ocorrência de falhas mecânicas, ou de forma secundária, como em estruturas de grande porte (pontes, por exemplo) que podem apresentar trincas ao longo do tempo, e propagar-se, e vindo a falhar por meio de uma fratura dúctil se não for corrigido a tempo.

Fica como proposta para trabalhos futuros o estudo sobre a interferência de defeitos de soldagem na falha por fadiga, onde seriam induzidas trincas na superfície da junta soldada, e em seguida sendo realizado um ensaio de resistência à fadiga, e avaliar os valores obtidos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BARBEDO, Nancy Del Duca. **Avaliação comparativa dos processos de soldagem GMAW e FCAW utilizando aço ASTM A-36 para verificar a soldabilidade, propriedades metalúrgicas e geométricas, e resistência mecânica.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal de Itabujá, Itajubá, 2011.

BARTHOLO, Pablo Uchôa. **PoD Aplicado à Significância de Descontinuidades pela Técnica Ultrassônica.** Dissertação (mestrado) - Rio de Janeiro: UFRJ/COPPE, 2011.

CÂNDIDO, Francisco Almir de Assis. **Ensaio não destrutivo.** Universidade Potiguar, 2010

CHIAVERINI, Vicente. **Tecnologia Mecânica.** 2º Ed.- São Paulo, vol. 2, 1986.

DITCHBURN, R. J., et al, **NDT of Welds: State of The Art,** NDT&E International, 1996;

ESAB. **Apostila de soldagem MIG/MAG.** Disponível em <http://www.esab.com.br/br/pt/education/apostilas/upload/1901104rev0_apostilasoldagemmigmag_low.pdf> acesso em 06 set. 2016

FIALHO, Michaella Socorro Bruce. **Análise comparativa da influência da corrente de soldagem nas propriedades de juntas de aço ASTM-36 com eletrodo revestido.** Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Mecânica) – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Amazonas – IFAM. Manaus, 2015.

GARCIA, Amauri; SPIM, Jaime Alvares; SANTOS, Carlos Alexandre dos. **Ensaio dos Materiais.** 2ª edição atualizada – Rio de Janeiro: LTC, 2012.

GUEDES, Ricardo Pereira. **Influência da corrente de soldagem nas propriedades de juntas de aço de alta resistência e baixa liga soldadas com eletro revestido.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2009.

INFOSOLDA. O Portal Brasileiro da Soldagem. Descontinuidades. Disponível em <<http://www.infosolda.com.br/biblioteca-digital/28-biblioteca-digital/livros-senai/metalurgia/125-descontinuidades.html>> acesso em 23 Set. 2016.

LOPES, Diego et al. **Visão geral sobre a inspeção em cordões de solda através de técnicas não destrutivas ultrassônicas.** Instituto Federal da Bahia, Salvador.

MACHADO, Paulo Jorge Bilro. **Avaliação da Resistência Estrutural de Juntas Soldadas de um Quadro de uma Bicicleta.** Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) – Escola Superior de Tecnologia de Setúbal, Setúbal, 2010.

MARQUES, Paulo Villani; MODENESI, Paulo José; BRACARENSE, Alexandre Queiroz. **Soldagem Fundamentos e Tecnologia**- 3º Edição atualizada- Belo Horizonte: Editora UFMG, 2011.

MODENESI, Paulo José; MARQUES, Paulo Villani. **Introdução aos Processos de Soldagem**, Apostila Soldagem I. UFMG, 2005.

MODENESI, Paulo José. **Descontinuidades e Inspeção em Juntas Soldas**. Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais da Universidade Federal de Minas Gerais: 2001.

NOVAIS, P.R.S. **Avaliação das Principais Descontinuidades Encontradas nas Juntas Soldadas, Causas e Possíveis Soluções**. In: CONSTRUMETAL – CONGRESSO LATINO AMERICANO DA CONSTRUÇÃO METÁLICA. 2010, São Paulo. Artigo, p.3-9.

OKUMURA. T.; TANIGUCHI. C. **Engenharia de Soldagem e Aplicações**. Rio de Janeiro: LTC, 1982.

PETROBRAS N-1738 – Descontinuidades em juntas soldadas, fundidos, forjados e laminados. Julho/2003

PRODANOV, Cleber Cristiano; FREITAS, Ernani Cesar, *Metodologia do Trabalho Científico: Métodos e Técnicas da Pesquisa e do Trabalho Acadêmico*. 2 ed. Novo Hamburgo – Rio Grande do Sul: Universidade Feevale, 2013.

SANCHES, Ricardo Almeida. **Defeitos em solda detectáveis através de inspeção visual**. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) – Centro Universitário Luterano de Manaus – CEULM/ULBRA. Manaus, 2010.

SCHIO, Fernando. **Análise comparativa entre soldagem MIG/MAG manual e robotizada**. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Mecânica) – Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul – UNIJUÍ. Panambi/RS, 2013.

SOUZA, Elton Vogt. **Análise da influência das descontinuidades induzidas na solda pelo processo GMAW (MAG) no comportamento a fadiga da junta soldada**. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Mecânica) – Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul – UNIJUÍ. Panambi/RS, 2013.

ZOLIN, Ivan. Curso técnico em automação industrial: ensaios mecânicos e análise de falhas. 3ª ed – Santa Maria: Universidade Federal de Santa Maria: Colégio Técnico Industrial de Santa Maria, 2010.