

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ

FELIPE HAMADA COSTA

**ENSAIOS NÃO DESTRUTIVOS PARA QUALIFICAÇÃO DE SOLDAGEM EM
CALDEIRAS**

PATO BRANCO

2022

FELIPE HAMADA COSTA

ENSAIOS NÃO DESTRUTIVOS PARA QUALIFICAÇÃO DE SOLDAGEM EM CALDEIRAS

Nondestructive examinations for qualification of welding in boilers

Trabalho de conclusão de curso de graduação apresentada como requisito para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).
Orientador: Prof. Dr. Paulo Cezar Adamczuk

PATO BRANCO

2022



[4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/)

Esta licença permite download e compartilhamento do trabalho desde que sejam atribuídos créditos ao autor, sem a possibilidade de alterá-lo ou utilizá-lo para fins comerciais. Conteúdos elaborados por terceiros, citados e referenciados nesta obra não são cobertos pela licença.

FELIPE HAMADA COSTA

**ENSAIOS NÃO DESTRUTIVOS PARA QUALIFICAÇÃO DE SOLDAGEM EM
CALDEIRAS**

Trabalho de conclusão de curso de graduação
apresentada como requisito para obtenção do título de
Bacharel em Engenharia Mecânica da Universidade
Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).
Orientador: Prof. Dr. Paulo Cezar Adamczuk

Data de aprovação: 01/dezembro/2022

Paulo Cezar Adamczuk
Doutorado
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Bruno Bellini Medeiros
Doutorado
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Maria Nalu Verona Gomes
Doutorado
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

PATO BRANCO

2022

RESUMO

O controle da qualificação na soldagem é fundamental tanto na fabricação quanto na manutenção de componentes de caldeiras. Não somente o aspecto de padronização de procedimentos, mas principalmente na garantia da fabricação de componentes com elevado grau de confiabilidade. A demanda por otimização dos processos de soldagem, reduzindo as falhas em componentes soldados e custos por retrabalho, é cada vez maior no setor industrial. Os ensaios não destrutivos são meios com excelente custo benefício, os quais possibilitam análises mais eficientes de soldas sem a necessidade de descartar ou inutilizar a estrutura avaliada. Dessa forma, através da capacitação de profissionais e a utilização das normas pertinentes, os ensaios não destrutivos tornam-se uma ferramenta adequada na qualificação de soldas em componentes de caldeiras. Com o objetivo de apresentar e explorar os principais ensaios não destrutivos utilizados para qualificação na soldagem de componentes de caldeiras, o presente trabalho faz uso da norma ASME para caldeiras e vasos de pressão de 2019 como principal fonte para elaboração dos ensaios, além de artigos e livros relacionados. Os resultados obtidos fundamentam-se no levantamento das condições necessárias, como a indicação e calibração dos aparelhos utilizados, parâmetros de quantidades e avaliação dos requisitos para validação da solda, na execução dos ensaios não destrutivos. Por fim, o registro dos procedimentos, técnicas, materiais, nome e certificação do profissional, bem como as condições do ambiente, são itens essenciais para padronização e, conseqüentemente, controle e garantia de uma qualificação adequada.

Palavras-chave: ensaios não destrutivos; qualificação de soldagem; caldeiras; padronização.

ABSTRACT

The control of qualification in welding is essential both in the manufacture and maintenance of boiler components. Not only the aspect of standardizing procedures, but mainly in guaranteeing the manufacture of components with a high degree of reliability. The demand for optimization of welding processes, reducing failures in welded components and costs for rework, is increasing in the industrial sector. Nondestructive tests are means with excellent cost-effectiveness, which allow more efficient analyzes of welds without the need to discard or disable the evaluated structure. Thus, through the training of professionals and the use of relevant standards, nondestructive tests become an adequate tool in the qualification of welds in boiler components. With the objective of presenting and exploring the main non-destructive tests used for qualification in the welding of boiler components, the present work makes use of the ASME standard for boilers and pressure vessels of 2019 as the main source for the preparation of the tests, in addition to articles and related books. The results obtained are based on the survey of the necessary conditions, such as the indication and calibration of the devices used, parameters of quantities and evaluation of the requirements for validation of the weld, in the execution of the nondestructive tests. Finally, the registration of procedures, techniques, materials, name and certification of the professional, as well as the conditions of the environment, are essential items for standardization and, consequently, control and guarantee of an adequate qualification.

Keywords: nondestructive tests; welding qualification; boilers; standardization.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Posições de soldagem.....	16
Figura 2 - Processo de soldagem por pressão.....	17
Figura 3 - Soldagem por fricção com mistura	17
Figura 4 - Processo de soldagem por fusão	18
Figura 5 - Esquema de soldagem com eletrodo revestido	18
Figura 6 - Esquema de soldagem TIG	20
Figura 7 - Esquema de soldagem MIG/MAG	21
Figura 8 - Esquema de soldagem por arco submerso	23
Figura 9 - Escopo da metalurgia da soldagem	25
Figura 10 - Tipos de juntas	25
Figura 11 - Tipos de chanfros	26
Figura 12 - Tipos de juntas e exemplos de chanfros	26
Figura 13 - Regiões da junta soldada	27
Figura 14 - Seção transversal da área de solda e a diluição de dois materiais em um processo de soldagem.....	28
Figura 15 - Curvas de ciclo térmico.....	31
Figura 16 - Fatores definidores do ciclo térmico.....	32
Figura 17 - Defeitos de solda mais comuns.....	35
Figura 18 - Microtrincas de solidificação na zona fundida de uma liga Fe-Mn-Al-Si-C, ampliada 200x.....	36
Figura 19 - Trinca por solidificação	37
Figura 20 - Nivel de restrição conforme (a) as dimensões da solda em relação à junta e (b) a rigidez da montagem.	37
Figura 21 - Fissuração no centro do cordão de solda. Trincas induzidas por hidrogênio.....	38
Figura 22 - Exemplo de porosidade em uma junta soldada	39
Figura 23 - Exemplo de inclusão de escórias em uma junta soldada	40
Figura 24 - Ilustração de um cordão de solda apresentando falta de penetração	41
Figura 25 - Ilustração de um cordão de solda apresentando falta de fusão	42
Figura 26 - Fluxograma do processo de qualificação de soldagem	43
Figura 27 - Modelo de uma EPS (frente).....	44
Figura 28 - Modelo de uma EPS (verso)	44
Figura 29 - Requisitos de escolaridade x experiência profissional	47
Figura 30 - Exemplo de um RQPS (frente)	49
Figura 31 - Exemplo de um RQPS (verso).....	50
Figura 32 - Disposição do examinador para a peça examinada.....	56
Figura 33 - Boróscopio e fibroscópio	57
Figura 34 - Resultado em um ensaio por líquido penetrante de juntas soldadas	59
Figura 35 - Princípio básico do ensaio por ultrassom	59
Figura 36 - Interpretação da diferença de impedância acústica	60
Figura 37 - Representação de uma imagem em A-scan	61
Figura 38 - Representação de uma imagem em B-scan	62
Figura 39 - Representação de uma imagem em C-scan de uma peça com revestimento	62
Figura 40 - Conjunto de cristais operando em fase	63

Figura 41 - Conjunto de cristais operando defasados	64
Figura 42 - Exemplo de leitura do método de inspeção TOFD em um cordão de solda sem descontinuidade, representado a direita em A-scan	64
Figura 43 - Princípio do ensaio de partícula magnética.....	65
Figura 44 - Aplicação de forma manual por via seca	66
Figura 45 - Aplicação de forma manual por via úmida	67
Figura 46 - Técnica de ensaio com magnetização por eletrodos.....	68
Figura 47 - Técnica de ensaio por magnetização circular direta	69
Figura 48 - Equipamento estacionário horizontal para utilizado para aplicação da técnica de ensaio por magnetização circular direta	69
Figura 49 - Posicionamento na técnica de magnetização circular por condutor central	70
Figura 50 - Representação de um aparelho yoke	70
Figura 51 - Caldeira flamotubular vertical.....	73
Figura 52 - Espelho de uma caldeira flamotubular.....	73
Figura 53 - Caldeira flamotubular escocesa	74
Figura 54 - Caldeira aquatubular de cano reto com tambor longitudinal.....	75
Figura 55 - Interior de uma caldeira aquatubular de tubos curvos.....	76
Figura 56 - Fluxograma da pesquisa	77
Figura 57 - Inspeção visual direta em um espelho de uma caldeira.....	81
Figura 58 - Inspeção visual remota com a utilização de um boroscópio	82
Figura 59 - Aplicação por líquido penetrante em espelho de caldeira flamotubular.....	85
Figura 60 - Região efetiva de ensaio na utilização da técnica de condutor central	92
Figura 61 - Indicação de trinca detectada pela técnica do condutor central	92
Figura 62 - Técnica de condutor central com a utilização de um e dois condutores centrais	92
Figura 63 - Esquema sequencial para técnica de eletrodos e yoke.....	94
Figura 64 - Instrumento denominado "formato de torta".....	94
Figura 65 - Componentes da ferramenta "formato de torta"	95
Figura 66 - Anel de teste de Ketos	96
Figura 67 - Gaussímetro	99
Figura 68. Área de varredura pra uma solda de topo.....	101
Figura 69 - Aparelho de ultrassom digital da marca GE Mod.....	102
Figura 70 - Transdutor tipo phased array com 60 cristais, da marca Olympus	102
Figura 71 - Bloco de verificação de linearidade em altura da tela do aparelho de ultrassom	105
Figura 72 - Bloco de calibração padrão para superfícies planas	106
Figura 73 - Plotagem da curva de referência (DAC)	108
Figura 74 - Ajuste de ganho no bloco de calibração para alcançar o valor da curva DAC	108
Figura 75 - Correção aplicada à peça a ser inspecionada, através da curva DAC	109
Figura 76 - Caminho realizado pelo transdutor	109
Figura 77 - Reflexos nas bordas da chapa.....	110

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Vantagens, limitações e aplicações para o processo de soldagem por eletrodo revestido	19
Quadro 2 - Vantagens, limitações e aplicações para o processo de soldagem TIG	21
Quadro 3 - Vantagens, limitações e aplicações para o processo de soldagem MIG e MAG	22
Quadro 4 - Vantagens, limitações e aplicações para o processo de soldagem por arco submerso	24
Quadro 5 - Classificação de grupos de ligas conforme P-Nº	54
Quadro 6 - Relação de defeitos de soldagem com tipos de métodos de exames não destrutivos.....	55
Quadro 7 - Requerimentos para aplicação do exame visual	80
Quadro 8 - Requerimentos para aplicação do procedimento de líquido penetrante	84
Quadro 9 - Tempo mínimo de permanência para líquidos penetrantes	86
Quadro 10 - Requerimentos para o procedimento do ensaio por partículas magnéticas.....	90
Quadro 11 - Requerimentos gerais para o procedimento do ensaio por ultrassom	100
Quadro 12 - Variáveis essenciais, suplementares e não essenciais para o processo de soldagem MIG/MAG	119

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Intensidade da fonte de calor para diversos processos de soldagem	29
Tabela 2 - Rendimento térmico para alguns processos de soldagem	30
Tabela 3 - Impedância acústica de alguns materiais e acoplantes	104
Tabela 4 - Verificação de linearidade em amplitude da tela do aparelho de ultrassom	105
Tabela 5 - Parâmetros do bloco de calibração para superfícies planas.....	107
Tabela 6 - Parâmetros de dimensões dos entalhes no bloco de calibração....	107

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	13
1.1	Objetivos	14
1.1.1	Geral.....	14
1.1.2	Específicos	14
1.2	Justificativa	14
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	15
2.1	Soldagem	15
2.1.1	Posições de soldagem	15
2.1.2	Processos de soldagem	16
<u>2.1.2.1</u>	<u>Soldagem por pressão</u>	<u>16</u>
<u>2.1.2.2</u>	<u>Soldagem por fusão</u>	<u>17</u>
2.1.2.2.1	<i>Processo de soldagem por eletrodo revestido</i>	18
2.1.2.2.2	<i>Processo de soldagem TIG</i>	19
2.1.2.2.3	<i>Processo de soldagem MIG e MAG</i>	21
2.1.2.2.4	<i>Processo de soldagem por arco submerso</i>	23
2.2	Metalurgia da soldagem	24
2.2.1	Junta soldada	25
2.2.2	Diluição.....	28
2.2.3	Fluxo de calor na soldagem	28
<u>2.2.3.1</u>	<u>Aporte de energia</u>	<u>29</u>
<u>2.2.3.2</u>	<u>Rendimento térmico</u>	<u>30</u>
<u>2.2.3.3</u>	<u>Ciclo térmico da soldagem</u>	<u>31</u>
<u>2.2.3.4</u>	<u>Velocidade de resfriamento da zona soldada</u>	<u>33</u>
2.3	Descontinuidades em juntas soldadas	34
2.3.1	Trincas.....	35
<u>2.3.1.1</u>	<u>Trincas a quente</u>	<u>35</u>
<u>2.3.1.2</u>	<u>Trincas a frio</u>	<u>38</u>
2.3.2	Porosidade	39
2.3.3	Inclusões de Escórias.....	40
2.3.4	Falta de Penetração	41
2.3.5	Fusão Incompleta.....	41
2.4	Qualificação na soldagem	42
2.4.1	Especificação do procedimento de soldagem (EPS).....	43

2.4.2	Qualificação do procedimento de soldagem (QPS).....	45
<u>2.4.2.1</u>	<u>Qualificação e certificação de inspetores e soldadores.....</u>	<u>46</u>
2.4.3	Registro de qualificação do procedimento de soldagem (RQPS).....	48
2.5	Norma ASME para caldeiras e vasos de pressão.....	51
2.5.1	ASME seção I: Regras para construção de caldeiras de energia	52
2.5.2	ASME seção V: Testes não destrutivos	53
2.5.3	ASME seção IX: Padrões de qualificação para procedimento de soldagem, brasagem e fusão	53
2.6	Ensaio não destrutivo	55
2.6.1	Inspeção Visual	56
2.6.2	Inspeção por líquido penetrante	57
2.6.3	Inspeção por ultrassom	59
<u>2.6.3.1</u>	<u>Método de inspeção por ultrassom <i>phased array</i>.....</u>	<u>63</u>
<u>2.6.3.2</u>	<u>Método de inspeção por ultrassom TOFD</u>	<u>64</u>
2.6.4	Inspeção por partícula magnética.....	65
<u>2.6.4.1</u>	<u>Técnica de magnetização por eletrodos.....</u>	<u>67</u>
<u>2.6.4.2</u>	<u>Técnica de magnetização circular</u>	<u>68</u>
<u>2.6.4.3</u>	<u>Técnica de magnetização yoke</u>	<u>70</u>
<u>2.6.4.4</u>	<u>Desmagnetização.....</u>	<u>71</u>
2.7	Caldeiras	71
2.7.1	Caldeiras flamotubulares.....	72
2.7.2	Caldeiras aquatubulares.....	74
3	METODOLOGIA (MATERIAIS E MÉTODOS).....	77
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	79
4.1	Ensaio por inspeção visual	79
4.1.1	Inspeção visual direta.....	81
4.1.2	Inspeção visual remota.....	82
4.1.3	Inspeção visual translúcida	82
4.1.4	Critérios de aceitação.....	83
4.2	Ensaio por líquido penetrante	83
4.2.1	Preparação da superfície	84
4.2.2	Aplicação do líquido penetrante	85
4.2.3	Remoção do excesso do líquido penetrante	86
4.2.4	Aplicação do revelador	87
4.2.5	Registro de resultados.....	88

4.2.6	Critérios de aceitação.....	89
4.3	Ensaio por partículas magnéticas	89
4.3.1	Preparação da superfície	90
4.3.2	Técnicas	90
<u>4.3.2.1</u>	<u>Técnica por eletrodos (<i>Prod Technique</i>)</u>	<u>91</u>
<u>4.3.2.2</u>	<u>Técnica de magnetização circular</u>	<u>91</u>
<u>4.3.2.2.1</u>	<u>Técnica por contato direto</u>	<u>91</u>
<u>4.3.2.2.2</u>	<u>Técnica de condutor central</u>	<u>91</u>
<u>4.3.2.3</u>	<u>Técnica yoke</u>	<u>93</u>
4.3.3	Calibração	93
4.3.4	Adequação e direção do campo magnético	93
<u>4.3.4.1</u>	<u>Indicador de campo de partícula magnética “formato de torta”</u>	<u>94</u>
4.3.5	Concentração e contaminação de partículas por via úmida	95
4.3.6	Anel de teste de Ketos	96
4.3.7	Método de ensaio	97
4.3.8	Interpretação	97
<u>4.3.8.1</u>	<u>Critérios de aceitação para o ensaio de partículas magnéticas</u>	<u>97</u>
<u>4.3.8.2</u>	<u>Partículas magnéticas visíveis (contraste colorido)</u>	<u>98</u>
<u>4.3.8.3</u>	<u>Partículas magnéticas fluorescentes</u>	<u>98</u>
4.3.9	Desmagnetização.....	98
4.4	Ensaio por ultrassom.....	99
4.4.1	Instrumentação.....	101
4.4.2	Acoplantes.....	103
4.4.3	Calibração	104
<u>4.4.3.1</u>	<u>Calibração da linearidade vertical e controle de amplitude do aparelho.....</u>	<u>104</u>
<u>4.4.3.2</u>	<u>Blocos de calibração</u>	<u>106</u>
<u>4.4.3.3</u>	<u>Obtenção da curva de referência <i>distance amplitude correction (DAC)</i> e aplicação de correção</u>	<u>107</u>
4.4.4	Realização da inspeção	109
4.4.5	Critérios para validação dos resultados.....	110
5	CONCLUSÃO	111
	REFERÊNCIAS.....	112
	APÊNDICE A - Variáveis das especificações do procedimento de soldagem MIG/MAG.....	118

1 INTRODUÇÃO

A falta de normalização ou a não execução da mesma, dentro de um processo de fabricação como a soldagem, tem causado acidentes e outros problemas. O campo de abrangência no caso da soldagem, varia desde uma simples solda de função estrutural em uma escada metálica, até uma solda de caráter complexo como a de construção de um reator nuclear. Por isso, a elaboração e uso das normas resultam em um melhor controle de qualidade, e conseqüentemente, uma maior possibilidade de correção de falhas em produtos e um processo de produção mais padronizado (MARQUES; MODENESI; BRACARENSE, 2012).

As operações de soldagem para fabricação de caldeiras são muitas e estão presentes em vários componentes. Sendo importantes regiões de menores resistências, as falhas em juntas soldadas potencializam os riscos de explosão das caldeiras (GYURKOVITS, 2004).

Na contemporaneidade, inúmeros esforços têm sido desenvolvidos de modo que o desempenho de um componente soldado ocorra com o menor número de descontinuidades. Por consequência, cria-se a dependência de um grande número de parâmetros, o que dificulta a elaboração de uma padronização e controle desse processo. A garantia da qualidade na soldagem está relacionada com a conscientização da excelência de planejamento, execução e registro, relacionados a custos e prazos compatíveis (BRANCHINI, 2004).

Segundo Modenesi (2005), para uma empresa, uma das formas para aumento de produtividade e redução de custos, acontece através da implementação correta de códigos e de um sistema de garantia de qualidade em uma empresa.

Os ensaios não destrutivos por sua vez, são importantes ferramentas utilizadas para qualificação da solda, onde através destes é possível localizar, identificar e interpretar as falhas, sem deixar qualquer vestígio da utilização do ensaio na peça ensaiada (GARCIA; SPIM; DOS SANTOS, 2012).

No entanto, apesar dos ensaios não destrutivos não prejudicarem a peça, deve-se levar em consideração que os mesmos demandam de custos para aplicação. Dentre eles, o principal é o custo da mão de obra qualificada, sendo pela qualificação do colaborador, ou pela terceirização desse serviço.

1.1 Objetivos

1.1.1 Geral

O trabalho tem como objetivo identificar e apresentar os procedimentos e requisitos para qualificação da soldagem para caldeiras, bem como seus principais ensaios não destrutivos.

1.1.2 Específicos

Para se atingir o objetivo geral, serão propostos os seguintes objetivos específicos:

- Verificar e descrever as normas existentes para qualificação de soldagem para caldeiras;
- Identificar as normas específicas para cada ensaio não destrutivo apresentado;
- Descrever os procedimentos a serem executados conforme a norma adequada, para a execução dos ensaios não destrutivos selecionados;

1.2 Justificativa

Com a contínua busca pelo melhor custo benefício de seus produtos, as empresas procuram se adaptar para fornecer um nível adequado de qualidade e, ao mesmo tempo, um custo que não extrapole o orçamento.

Não é diferente para processos de soldagem em caldeiras, o qual demanda um elevado grau de confiabilidade. A qualificação da soldagem nas caldeiras é um processo complexo, que demanda de mão de obra qualificada e a utilização de parâmetros adequados, como as normas vigentes.

O presente trabalho justifica-se como ferramenta de orientação para compreensão do procedimento de qualificação da soldagem em caldeiras. O processo de interpretação de normas e utilização de parâmetros adequados requer conhecimento técnico, experiência e familiarização em outras línguas, visto que há pouco material disponível no Brasil em português.

Ainda, fundamenta-se o desenvolvimento pessoal do aluno na formação da carreira como engenheiro mecânico, agregando conhecimento nos processos de qualificação de soldagem.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Soldagem

A soldagem pode ser definida como um processo de união de materiais, fundamentado na determinação de forças de ligação química de natureza semelhante às atuantes no interior dos próprios materiais (MARQUES; MODENESI; BRACARENSE, 2012).

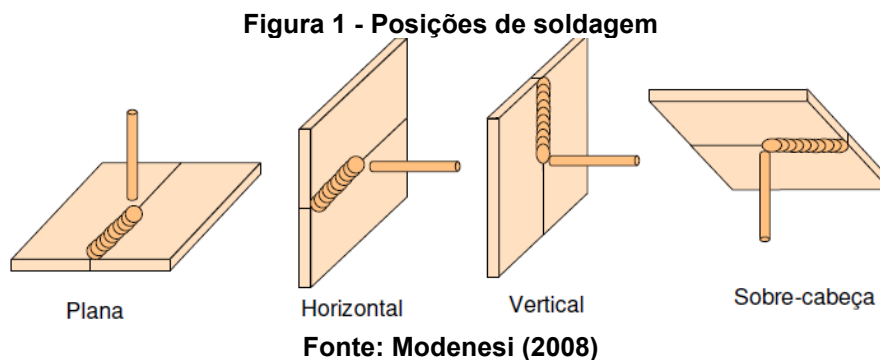
Conforme a norma NBR ISO 9000 para Sistema de Qualidade, a soldagem é considerada um processo especial no qual, dependendo da complexidade da estrutura soldada, demanda métodos de controle para compreender as atividades do projeto, de fabricação e inspeção e de seleção de materiais, no intuito de garantir que a qualidade especificada seja alcançada.

De acordo com a American Welding Society (AWS) (2010), a soldabilidade é definida como a capacidade do material em ser soldado sobre condições de fabricação específicas, impostas sobre um projeto adequado e com uma performance satisfatória para um determinado serviço.

2.1.1 Posições de soldagem

São quatro as diferentes posições de soldagem: plana, horizontal, sobre cabeça e vertical, conforme podem ser observadas na figura 1 (MODENESI, 2008):

- Plana: soldagem realizada na parte superior de uma junta e a face da solda é aproximadamente horizontal;
- Horizontal: o eixo da solda é horizontal, contudo, sua face é inclinada;
- Sobre cabeça: a soldagem é realizada na parte inferior de uma junta e o seu eixo é aproximadamente horizontal;
- Vertical: o eixo da solda é aproximadamente vertical. A soldagem pode acontecer para cima ou para baixo.



2.1.2 Processos de soldagem

O grande impulso nos processos de soldagem veio durante a segunda guerra mundial, por consequência da fabricação de navio e aviões. Hoje em dia, esses processos são utilizados na fabricação de estruturas metálicas, veículos espaciais, pontes, prédios, plataformas marítimas, reatores nucleares, entre vários outros produtos (BRANCHINI, 2004).

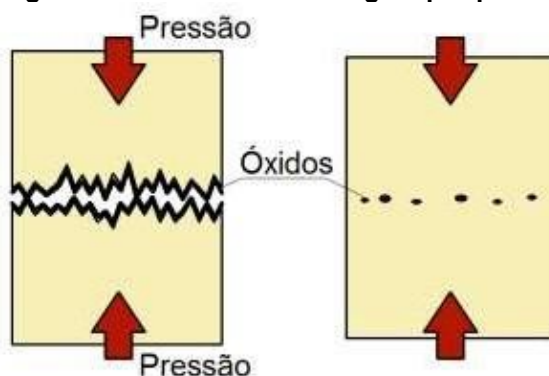
Segundo Houldcroft (1979), os processos de soldagem devem atender requisitos como:

- Ser capaz de gerar energia suficiente, capaz de unir dois materiais;
- Eliminar as contaminações das superfícies a serem unidas;
- Impedir a contaminação da região durante a soldagem pelo ar atmosférico;
- Garantir que a solda obtenha as propriedades desejadas, através do controle de transformação de fase.

2.1.2.1 Soldagem por pressão

Os processos de soldagem são classificados em dois grandes grupos: processo de soldagem por pressão e processo de soldagem por fusão. A soldagem por pressão baseia-se na deformação das superfícies de contato, possibilitando a aproximação dos átomos, podendo haver um aquecimento local como forma de deformar as superfícies de contato, conforme ilustrado na figura 2 (MARQUES; MODENESI; BRACARENSE, 2012),

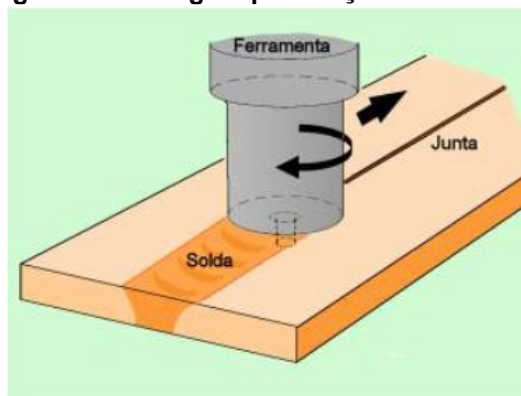
Figura 2 - Processo de soldagem por pressão



Fonte: Modenesi, Marques e Santos (2012)

Neste grupo, estão inclusos os processos de soldagem por ultrassom, por fricção, por forjamento, por resistência elétrica, por difusão e por explosão. Dentre estes processos, o processo de soldagem por fricção com mistura, apresenta enorme importância tecnológica. Neste, o aquecimento e a deformação acontecem através de uma ferramenta especial que rotaciona e é forçada contra e entre as peças, como ilustrado na figura 3 (MODENESI; MARQUES; SANTOS, 2012).

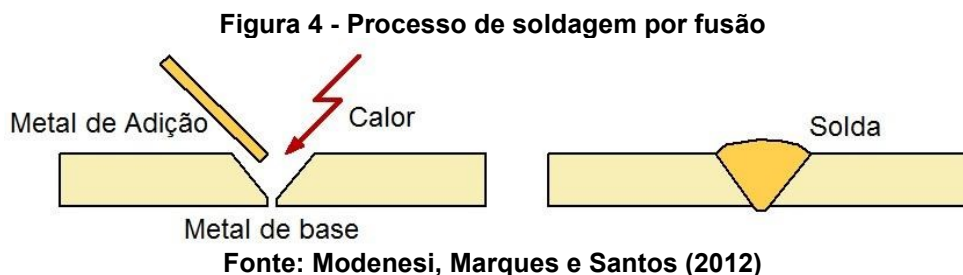
Figura 3 - Soldagem por fricção com mistura



Fonte: Modenesi, Marques e Santos (2012)

2.1.2.2 Soldagem por fusão

O processo de soldagem por fusão é considerado um importante meio de fabricação dentro da linha de produção industrial. O processo consiste no derretimento de determinadas áreas dos materiais a serem unidos, através de uma fonte de calor como um arco ou laser. Por fim, essa zona onde ocorreu o derretimento é unificada através da solidificação dos metais derretidos, como é ilustrado na figura 4 (OGAWA,2011).



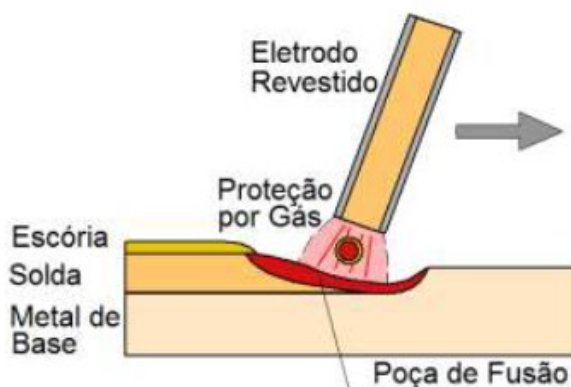
Os processos de soldagem por fusão que utilizam o arco elétrico como fonte de energia são os mais utilizados dentro do setor industrial (MODENESI; MARQUES; SANTOS, 2012). Dentre estes, os processos de soldagem por eletrodo revestido, TIG, MIG/MAG e arco submerso são os mais utilizados dentro da fabricação de caldeiras e serão abordados a seguir.

2.1.2.2.1 Processo de soldagem por eletrodo revestido

A soldagem com eletrodo revestido ou SMAW (Shielded Metal Arc Welding) é definida como um processo de soldagem com arco, no qual a união acontece devido ao calor produzido pelo arco entre um eletrodo revestido e a peça a soldar (TECCO, 2004).

O equipamento necessário consiste de um porta eletrodo, cabos e uma fonte de energia, podendo ser de corrente contínua ou alternada. O eletrodo é composto por uma “alma”, um núcleo metálico, que conduz corrente elétrica e serve como metal de adição, além de um revestimento recoberto por uma camada de minerais e outros materiais. A figura 5 ilustra esse esquema de soldagem com eletrodo revestido (MODENESI; MARQUES; SANTOS, 2012)

Figura 5 - Esquema de soldagem com eletrodo revestido



Seu revestimento é composto de liga de silicato, além de outros materiais como fluoretos e carbonetos. Este, apresenta uma série de funções, como: estabilizar o arco; promover proteção à contaminação do ar atmosférico; fornecer desoxidantes na limpeza da solda, no intuito de prevenir o crescimento excessivo do grão; funcionar como uma fonte de elementos de liga para produzir um metal de solda compatível (SINGH,2012).

Na soldagem com eletrodo revestido, a extremidade desencapada do eletrodo é presa no porta eletrodo o qual é conectado a fonte de energia. O arco é aberto realizando o contato do eletrodo com a superfície de trabalho e, em seguida, separando-os imediatamente sobre por 2 a 3 milímetros aproximadamente. O arco resultante gera calor suficiente para derreter o metal a ser soldado e o metal do eletrodo, resultando na coalescência dos metais (SINGH,2012).

O quadro 1 apresenta as principais vantagens, limitações e aplicações para o processo de soldagem por eletrodo revestido (MODENESI; MARQUES; SANTOS, 2012).

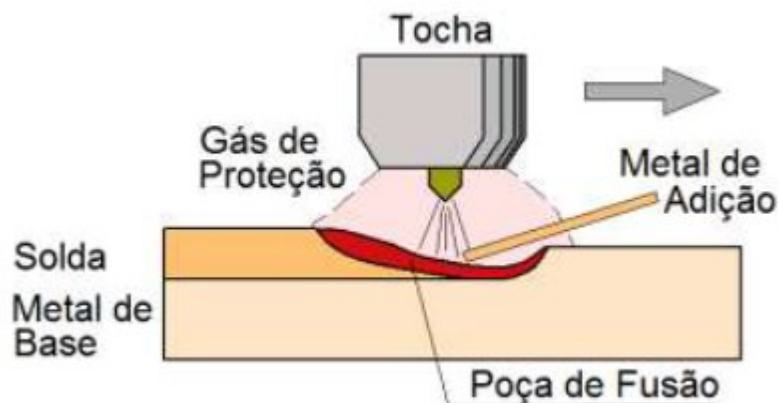
Quadro 1 - Vantagens, limitações e aplicações para o processo de soldagem por eletrodo revestido

Vantagens e limitações	Aplicações
Equipamento simples, portátil e barato	Soldagem de produção, manutenção e em montagens de campo
Não necessita fluxos ou gases externos	Soldagem de aços carbono, baixa liga e alta liga
Pouco sensível à 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	

Fonte: Modenesi, Marques e Santos (2012)

2.1.2.2.2 *Processo de soldagem TIG*

O processo TIG (tungstênio inerte o gás) ou GTAW (Gas Tungsten Arc Welding) utiliza um eletrodo não consumível de tungstênio e sua fonte de calor, assim como na soldagem com eletrodo revestido, é um arco elétrico mantido entre o eletrodo e a peça a soldar, como ilustrado na figura 6 (BRANDI,2004).

Figura 6 - Esquema de soldagem TIG

Fonte: Modenesi, Marques e Santos (2012)

Considerado o mais controlável dos processos de soldagem a arco, o processo de soldagem TIG pode ser manual ou mecanizada. A proteção do eletrodo da zona de solda acontece pela atuação de um gás inerte, normalmente sendo o argônio (Ar), ou pela mistura de gases inertes (argônio (Ar) e hélio (He)) (MODENESI; MARQUES; SANTOS, 2012).

O processo de soldagem TIG é capaz de produzir uma solda livre da maioria dos defeitos, com uma qualidade superior. Inclusive, o processo permite um excelente controle de penetração no passe da junta soldada, além de um controle preciso das variáveis de soldagem, podendo ser usado para soldar a maioria dos metais (SINGH,2012).

Ainda de acordo com Singh (2012), a contaminação pode ocorrer se o gás inerte que envolve a poça de solda não for mantido constante durante o processo, além de ocorrências de inclusões de tungstênio se o eletrodo, porventura, tocar a poça de solda. Assim, quando comparado com outros processos de soldagem, o soldador precisa de maior capacitação para operar com este equipamento.

O quadro 2 apresenta as principais vantagens, limitações e aplicações para o processo de soldagem por TIG (MODENESI; MARQUES; SANTOS, 2012).

Quadro 2 - Vantagens, limitações e aplicações para o processo de soldagem TIG

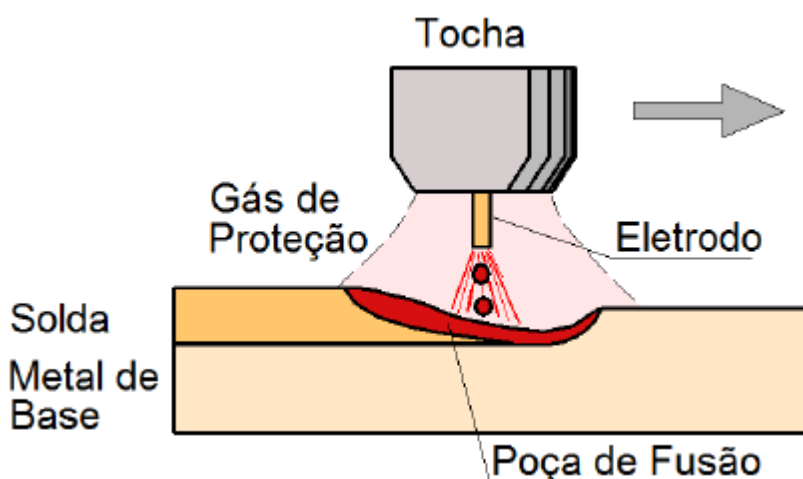
Vantagens e limitações	Aplicações
Excelente controle da poça de fusão	Soldagem de precisão ou de elevada qualidade
Pode ser usado para soldar a maioria dos metais	Execução de passe de raiz em tubulações
Produz soldas de alta qualidade e excelente acabamento	Soldagem de ligas especiais, não ferrosas e materiais exóticos
Permite soldagem sem o uso de metal de adição	Soldagem de peças de pequenas espessuras e tubulações de pequenos diâmetros
Gera pouco ou nenhum respingo	
Exige pouca ou nenhuma limpeza após a soldagem	
Permite a soldagem em qualquer posição	
Produtividade relativamente baixa	
Custo relativamente alto de consumíveis e equipamento	

Fonte: Modenesi, Marques e Santos (2012)

2.1.2.2.3 Processo de soldagem MIG e MAG

Os processos MIG/MAG (MIG - Metal Inert Gás) e (MAG – Metal Active Gas), utilizam como fonte de calor um arco elétrico mantido entre um eletrodo nu consumível e a peça a soldar, conforme ilustrado na figura 7. A sua proteção é realizada por um gás inerte (MIG) ou um gás ativo (MAG) (BRANDI,2004).

Figura 7 - Esquema de soldagem MIG/MAG



Fonte: Modenesi, Marques e Santos (2012)

De acordo com Singh (2012), a transferência de metal através do arco pode ocorrer de três formas distintas:

- Transferência por curto circuito: ocorre para os menores valores de correntes e diâmetros de eletrodos, sendo plausível para qualquer tipo de gás de proteção. Este tipo de transferência produz uma pequena quantidade de solda e por isso, é adequada para qualquer posição de soldagem;
- Transferência globular: ocorre para baixas densidades de correntes e serve com qualquer tipo de gás de proteção, sendo o dióxido de carbono e o hélio os mais comuns. A quantidade de solda no eletrodo é maior que o seu diâmetro, sendo indicada para soldagens em posições planas;
- Transferência por aerosol: ocorre para elevadas densidades de correntes e elevadas tensões. Aceita apenas o argônio ou misturas ricas em argônio como gás de proteção. Devido a quantidade de solda ser grande, é indicada para posições planas e horizontais de soldagem.

O equipamento básico para este processo se dá através de uma fonte de energia de corrente constante, uma fonte de gás, um alimentador de arame e uma tocha de soldagem. Normalmente operado de forma semiautomática, o processo apresenta uma elevada produtividade, como uma de suas principais vantagens, conforme apresentado no quadro 3 (MODENESI; MARQUES; SANTOS, 2012).

Quadro 3 - Vantagens, limitações e aplicações para o processo de soldagem MIG e MAG

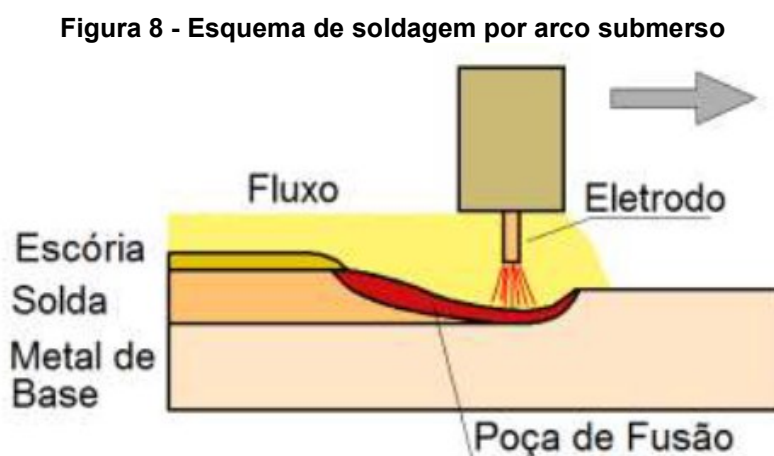
Vantagens e limitações	Aplicações
Processo com eletrodo contínuo	Soldagem de ligas ferrosas e não ferrosas
Permite soldagem em qualquer posição	Soldagem de carrocerias e estruturas de veículos
Elevada taxa de deposição de metal	Soldagem de tubulações, etc
Geralmente, exige menos habilidade do soldador quando comparado ao processo de soldagem por eletrodo revestido	
Elevada penetração	
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	

Fonte: Modenesi, Marques e Santos (2012)

2.1.2.2.4 Processo de soldagem por arco submerso

No processo de soldagem por arco submerso (Submerged Arc Welding – SAW), o arco elétrico é estabelecido entre o material a ser soldado e o eletrodo, no qual o arco permanece totalmente submerso em uma camada de fluxo, não sendo visível. Assim, o desenvolvimento da solda acontece sem fagulhas, radiação luminosa ou respingos, como acontece com os processos de soldagem com arco aberto (PARANHOS,2004).

A proteção do arco ocorre por uma camada de material fusível granulado (fluxo), que é colocado sobre a peça enquanto o eletrodo é alimentado continuamente. Esse fluxo é fundido, formando uma camada sólida de escória sobre o cordão, que acaba por proteger o arco e poça de fusão, como mostrado na figura 8 (MODENESI; MARQUES; SANTOS, 2012).



Ainda de acordo com Paranhos (2004), a soldagem por arco submerso permite o uso de correntes elevadas, oferecendo ao processo uma elevada taxa de deposição, tornando o processo mais econômico e rápido. Além disso, as soldas resultantes do processo apresentam boa ductibilidade e tenacidade ao impacto, sendo as propriedades do cordão de solda sempre compatíveis com o material base. Sua maior limitação estaria na posição de soldagem, onde apenas as posições planas e horizontas são aceitas no processo, além de outras, como apresentadas no quadro 4.

Quadro 4 - Vantagens, limitações e aplicações para o processo de soldagem por arco submerso

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 grandes diâmetros
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	
Necessita da retirada de escória entre passes	

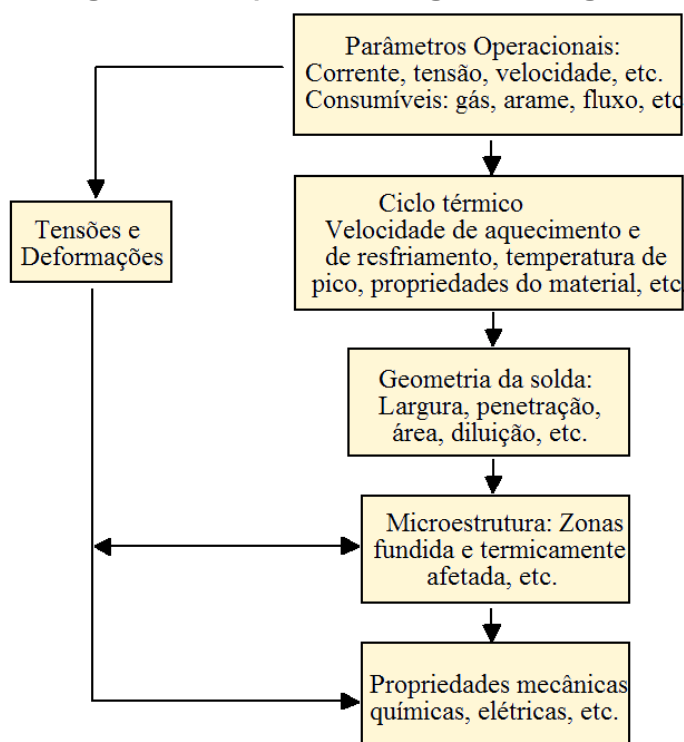
Fonte: Modenesi, Marques e Santos (2012)

O equipamento necessário consiste em uma fonte de energia, um alimentador de arame, a tocha de soldagem, um painel de controle, um porta fluxo e um sistema de deslocamento da tocha, usualmente feito de forma mecanizada (MODENESI; MARQUES; SANTOS, 2012).

2.2 Metalurgia da soldagem

A soldagem provoca alterações localizadas e bruscas de temperatura no material submetido à solda. Em geral, essas alterações podem causar importantes implicações na peça soldada. Assim sendo, a metalurgia da soldagem tem em vista estudar a estrutura e as propriedades dos materiais envolvidos em uma operação de soldagem. Uma de suas abordagens se dá através do estudo da soldabilidade dos materiais envolvidos. Outra, seria através do controle da operação de soldagem, determinando os parâmetros operacionais de soldagem (MODENESI; MARQUES; SANTOS, 2012). A figura 9 ilustra o escopo da metalurgia de soldagem.

Figura 9 - Escopo da metalurgia da soldagem

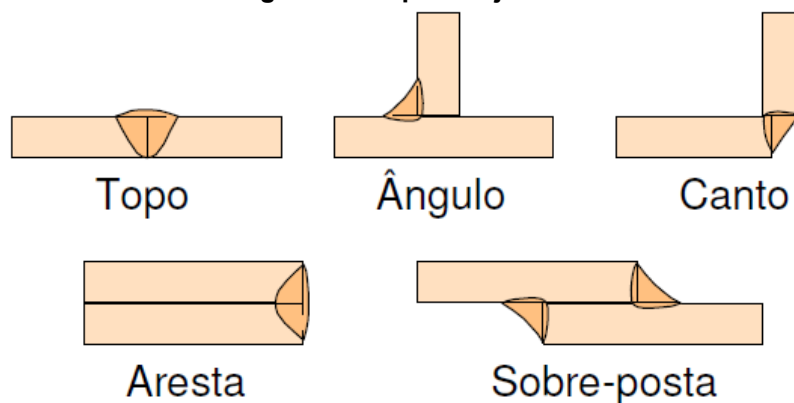


Fonte: Modenesi, Marques e Santos (2012)

2.2.1 Junta soldada

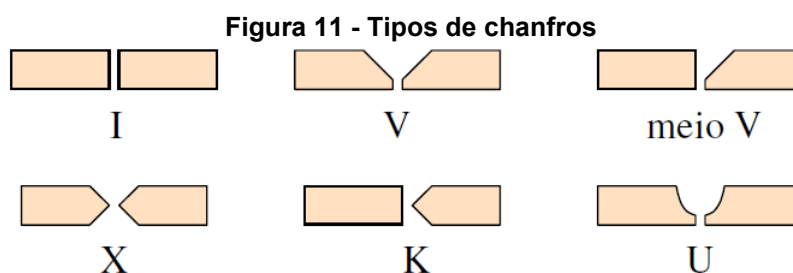
A junta soldada é a região de união entre duas ou mais peças. Os principais tipos de junta são: topo (*butt*), ângulo (*tee*), canto (*corner*), sobreposta (*lap*) e aresta (*edge*), conforme ilustrado pela figura 10. As soldas de topo e ângulo podem ser de penetração parcial ou total. As soldas com penetração total apresentam melhores propriedades mecânicas, no entanto são mais difíceis de se executar (MODENESI, 2008).

Figura 10 - Tipos de juntas

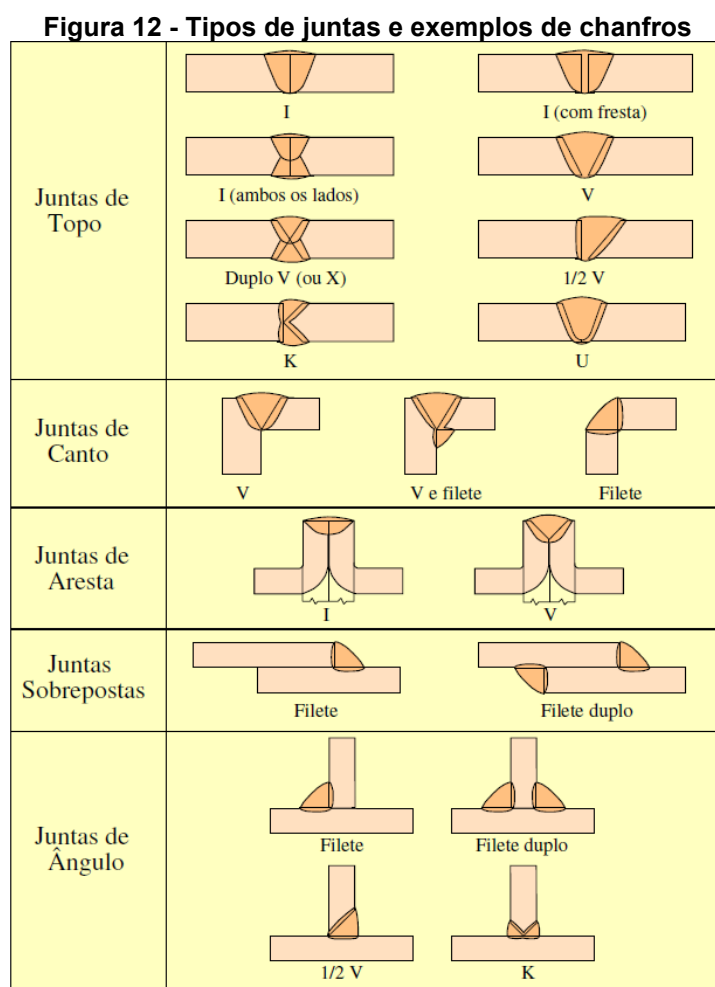


Fonte: Modenesi (2008)

Em muitos dos casos, faz-se necessário um corte na junta, o chanfro, com intuito de facilitar a obtenção de uma solda com a penetração desejada. Os tipos de chanfros são apresentados conforme a figura 11. A escolha do tipo de chanfro e suas dimensões dependem de vários fatores como o tipo de junta, o material base, sua espessura, o processo de soldagem e as características desejadas para a junta. A figura 12 ilustra vários tipos de chanfros de acordo com os diferentes tipos de juntas (MODENESI, 2008).



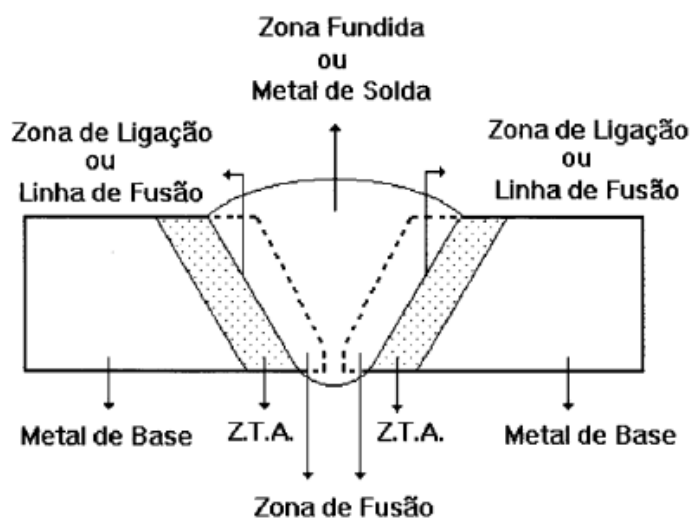
Fonte: Modenesi (2008)



Fonte: Modenesi (2008)

O calor que é gerado pelo processo de soldagem resulta em alterações à níveis microestruturais do material, sendo essas alterações relacionadas diretamente à quantidade de energia fornecida aos materiais de base. Esse processo é responsável pela formação de importantes regiões na soldagem, como ilustrado na figura 13 a seguir (PEREIRA,2020).

Figura 13 - Regiões da junta soldada



Fonte: Barbedo (2011)

A zona fundida (ZF), corresponde a porção do material que é totalmente fundida, sendo a região sujeita à máxima temperatura do processo (PEREIRA,2020). Denominada metal de solda, essa massa metálica resultante na zona fundida é composta de parte de metal de base e parte de metal de adição. A qualidade final da junta soldada é majoritariamente influenciada pela forma como ocorre a solidificação da zona fundida após o resfriamento da região (PEIXOTO,2012).

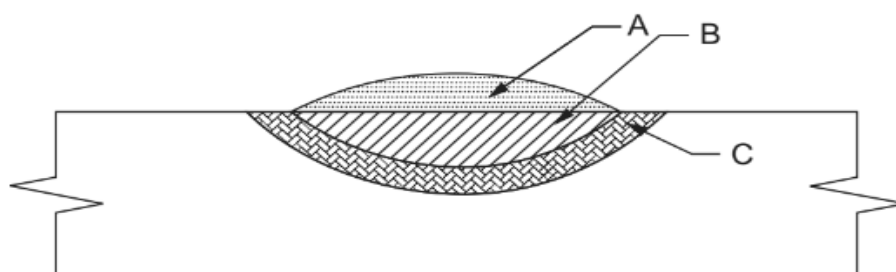
A zona termicamente afetada (ZTA), situa-se entre a ZF e o material base, portanto é uma zona que sofre bastante transformações por ação da energia térmica, onde acontecem alterações no tamanho de grão e de transformações metalúrgicas e consequentemente de propriedades mecânicas (PEREIRA,2020).

O metal base é o material utilizado para construir a estrutura metálica nessa região. O material não sofre qualquer alteração, seja física, química ou metalúrgica (PEIXOTO,2012).

2.2.2 Diluição

É a relação da quantidade de metal base presente na composição do metal de solda, podendo ser um valor muito baixo, como no caso da solda de brasagem, podendo chegar a valores extremos, como na solda autógena, sem a presença de metal de adição (PEIXOTO,2012). A figura 14 ilustra a seção transversal de uma região de solda e a diluição entre o metal de adição, representado pela letra A, e o metal base, representado pela letra B.

Figura 14 - Seção transversal da área de solda e a diluição de dois materiais em um processo de soldagem.



Fonte: Singh (2012)

Conforme ilustrado na figura 14, a diluição pode ser calculada pela expressão:

$$D = \frac{B}{A+B} \quad [1]$$

Onde “D” representa a porcentagem do metal de base diluído dentro da composição do metal de solda. A região representada por “A” é a região do material de adição e a região “B” representa a área do metal base. A região representada pela letra “C” é a ZTA (zona termicamente afetada) e ela não entra no cálculo de diluição (SINGH, 2012).

2.2.3 Fluxo de calor na soldagem

A necessidade de adequação da temperatura no aquecimento de uma junta é fundamental na maioria dos processos de soldagem. Parâmetros como a elevada intensidade da fonte de calor, deve receber uma maior atenção, para que essa adequação ocorra da forma desejada. A tabela 1 mostra a intensidade da fonte para alguns processos de soldagem (MODENESI; MARQUES; SANTOS, 2012).

Tabela 1 - Intensidade da fonte de calor para diversos processos de soldagem

Processo de Soldagem	Intensidade da Fonte (GW/m ²)
Eletrodo Revestido (SMAW)	0,005 - 0,5
Processo MIG/MAG (GMAW)	0,005 - 0,5
Soldagem Plasma (PAW)	0,005 - 50
Feixe de Elétrons/Laser (EBW/LBW)	50 - 5000

Fonte: Modenesi, Marques e Santos (2012)

Segundo Taniguchi (2004), o calor é essencial para execução de união soldadas e apresenta influência direta nas transformações metalúrgicas que ocorrem na zona de solda. Por consequência, fatores importantes no estudo da transferência de calor em juntas soldadas devem ser levados em consideração, para melhor controle do processo de soldagem. São estes: o aporte de energia à junta soldada; o rendimento térmico do arco elétrico; o ciclo térmico durante a soldagem e a velocidade de resfriamento da zona de solda.

2.2.3.1 Aporte de energia

O aporte de calor correlaciona a quantidade de energia disponível para a soldagem com a velocidade de avanço da fonte de calor, velocidade está sendo medida em mm/s (SINGH,2012).

$$H = P/V \quad [2]$$

Onde:

H = Aporte de energia total [J/mm]

P = Potência do arco elétrico [Watts]; onde P = tensão [V] x corrente [A]

V = Velocidade de avanço da fonte de calor [mm/s]

Ainda de acordo com Singh (2012), para fundir uma área de um metal base, uma quantidade específica de calor (Q) é requerida. Essa quantidade de calor é considerada para um determinado volume de metal com sua temperatura inicial ambiente. Além disso, algumas propriedades do metal ou liga são levados em consideração: o calor requerido para elevar a temperatura do metal sólido para sua temperatura de fusão; e o seu calor de fusão.

Assim sendo, a quantidade de calor (Q) pode ser calculada da seguinte forma:

$$Q = \frac{(T_m + 273)^2}{300000} \quad [3]$$

Onde:

T_m = Temperatura de fusão do metal ou liga [°C]

Q = Quantidade de calor [J/mm³]

2.2.3.2 Rendimento térmico

Considerando a fusão por arco elétrico, constata-se que parte da energia disponível é dissipada para atmosfera por irradiação, outra pequena parte perde-se por convecção com o meio gasoso de proteção da poça de fusão. Portanto, nem toda energia disponível é totalmente aproveitada no processo de fusão (TANIGUCHI, 2004).

Desta forma, o rendimento térmico do processo (η) deve ser levado em consideração. Tal rendimento será sempre menor que 100%, assim o restante da quantidade de energia por comprimento de solda que não foi transferida para a peça, representa as perdas do processo. O rendimento térmico é, usualmente, aferido através de métodos calorimétricos, onde seu valor depende do processo e das condições de soldagem (MODENESI; MARQUES; SANTOS, 2012). A tabela 2 apresenta o rendimento térmico para alguns dos processos de soldagem.

Tabela 2 - Rendimento térmico para alguns processos de soldagem

Processo	Rendimento Térmico (η)
Arco Submerso (SAW)	0,85 - 0,98
MIG/MAG (GMAW)	0,75 - 0,95
Eletrodo Revestido (SMAW)	0,70 - 0,90
TIG (CC-) (GTAW)	0,50 - 0,80
TIG (CC+) (GTAW)	0,20 - 0,50
Laser (LBW)	0,005 - 0,70

Fonte: Modenesi, Marques e Santos (2012)

Desta forma, o aporte térmico líquido é representado da seguinte forma:

$$H_L = \eta * H \quad [4]$$

Onde:

H_L = Aporte térmico líquido [J/mm]

η = Rendimento térmico do processo

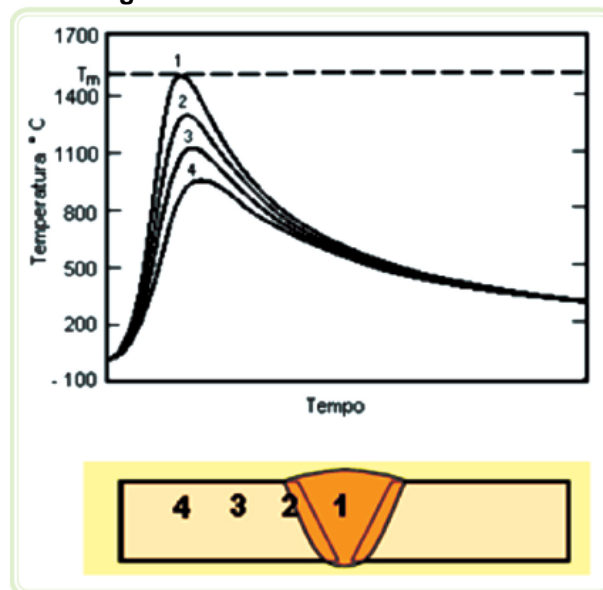
H = Aporte de energia total [J/mm]

2.2.3.3 Ciclo térmico da soldagem

O ciclo térmico de soldagem é a descrição da variação de temperatura durante a soldagem em um determinado ponto da peça. Cada um desses pontos, são submetidos a um ciclo térmico particular, de acordo com a localização do ponto em relação à solda (MODENESI; MARQUES; SANTOS, 2012).

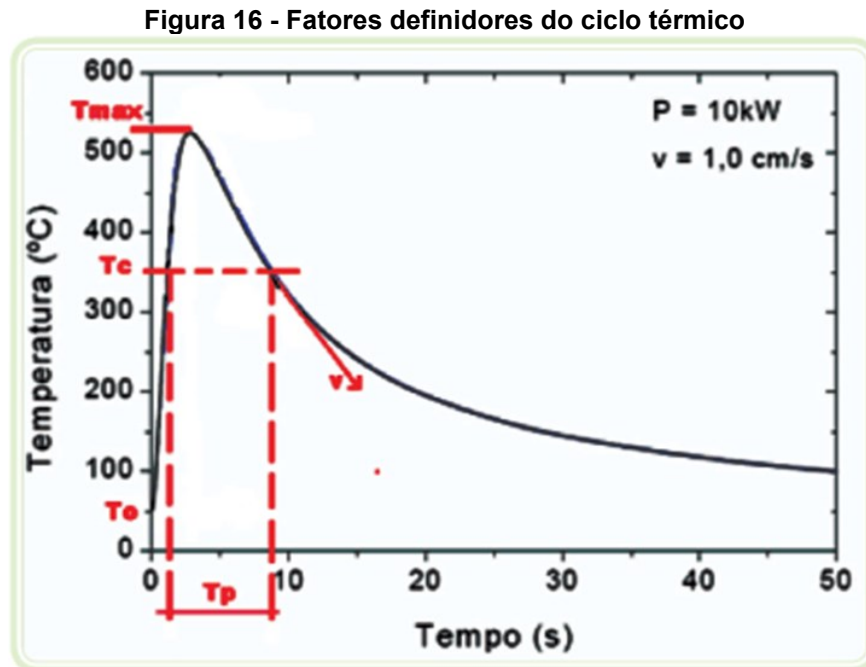
A composição de vários pontos consecutivos em diferentes condições térmicas na junta soldada, caracteriza várias curvas de ciclos térmicos sobrepostas, conforme a distância do ponto em relação ao cordão de solda. Quanto maior o afastamento do ponto em relação ao cordão de solda, menor a temperatura máxima alcançada pelo mesmo (PEIXOTO, 2012). A figura 15 exemplifica esse cenário.

Figura 15 - Curvas de ciclo térmico



Fonte: Peixoto (2012)

Segundo Peixoto (2012), os principais fatores presentes na definição dos ciclos térmicos dos pontos presentes em uma região soldada são apresentados conforme a figura 16:



Fonte: Peixoto (2012)

- Temperatura inicial (T_0): temperatura que se inicia o processo, nem sempre sendo a temperatura ambiente, para os casos onde há um preaquecimento no material a ser soldado (PEIXOTO, 2012)
- Temperatura Máxima (T_{max}): é a maior temperatura que um determinado ponto alcançou durante o processo de soldagem. Essa temperatura é proporcional ao aporte líquido de calor, ou seja, elevados valores de aporte térmico resultam na elevação da temperatura máxima (PEIXOTO,2012).
- Temperatura Crítica (T_c): temperatura limite, onde a partir desta, o material tem chances de sofrer transformações metalúrgicas no estado sólido. Seu valor depende de cada material (PEIXOTO,2012).
- Tempo de Permanência (T_p): representa o tempo de permanência em uma determinada temperatura, indicando o tempo de efetivação necessário para seja possível a ocorrência de transformações (PEIXOTO,2012).

- Velocidade de Resfriamento (v): é um importante parâmetro para determinação de microestrutura dos materiais que podem sofrer transformações de fases durante o resfriamento (MODENESI; MARQUES; SANTOS, 2012).

Os ciclos térmicos tem influência direta na estrutura cristalina dos materiais que são submetidos à soldagem. Assim, através da análise da distribuição de temperaturas a que são submetidos os sólidos durante o processo, é possível compreender o comportamento do material após o fim da operação (TANIGUCHI, 2004).

Ainda de acordo com Taniguchi (2004), os ciclos térmicos durante a soldagem podem provocar efeitos danosos à estrutura soldada. Entre eles, o aparecimento de deformações residuais. Fenômeno ligado a problemas como propagação de trincas, corrosão sob tensão, fadiga, entre outros.

2.2.3.4 Velocidade de resfriamento da zona soldada

A velocidade de resfriamento é fundamental na definição da microestrutura da solda de ligas que sofrem transformação microestrutural no estado sólido, como os aços (MODENESI; MARQUES; SANTOS, 2012).

Segundo Peixoto (2012), o cálculo da velocidade de resfriamento, relacionada para diferentes condições de soldagem pode ser representada conforme a equação [5]:

$$v = 2k\pi * \rho * c * \left(\frac{e}{H_L}\right) * (T - T_0)^3 \quad [5]$$

Onde:

v = velocidade de resfriamento a partir de qualquer temperatura [°C/s]

k = condutividade térmica do metal [J/mm.s.°C]

ρ = densidade do material [g/mm³]

c = calor específico do material [J/g.°C]

e = espessura da peça [mm]

H_L = aporte térmico líquido [J/mm]

T = temperatura de interesse [°C]

T_0 = temperatura inicial [°C]

A equação [5] adapta-se no caso da utilização de chapas muito espessas. Dessa forma, obtém-se a equação [6]. As variáveis utilizadas são as mesmas da equação anterior.

$$v = \frac{2k\pi}{H_L} * (T - T_0)^2 \quad [6]$$

A velocidade de resfriamento tem grande dependência do aporte de energia e, portanto, depende indiretamente da velocidade de soldagem e da temperatura inicial da junta (pré-aquecimento). O controle após a soldagem (pós aquecimento) é fundamental para alívio das tensões internas e para recuperar os produtos derivados do resfriamento da zona de solda (TANIGUCHI,2004).

Através das equações [5] e [6] é possível observar que a velocidade de resfriamento (v) varia inversamente em relação à temperatura inicial (T_0). Por isso a importância da utilização do preaquecimento. Quanto maior a temperatura de preaquecimento, menor a velocidade de resfriamento. No entanto, deve-se levar em consideração o conseqüente aumento da temperatura máxima do ciclo, com o aumento na temperatura do preaquecimento (PEIXOTO, 2012).

Em muitos casos, a diminuição na velocidade de resfriamento é fundamental para que o tempo de permanência seja suficiente para ocorrência de transformações necessárias como o crescimento de grãos, por exemplo (PEIXOTO, 2012).

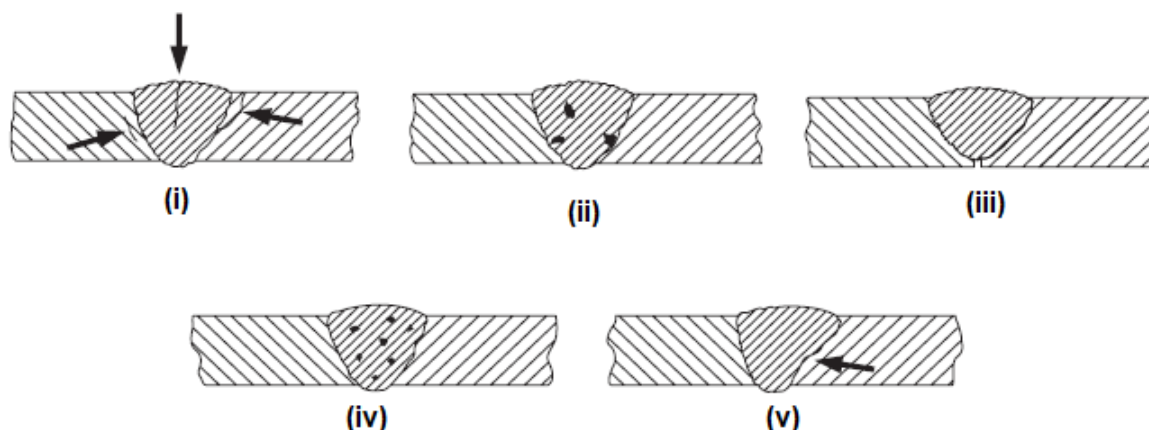
2.3 Descontinuidades em juntas soldadas

A presença de descontinuidades nas juntas soldadas é definida pela interrupção na estrutura do cordão de solda, podendo comprometer o desempenho da peça soldada. Assim sendo, faz-se necessário a detecção e classificação destas descontinuidades, realizadas por um técnico certificado (PEREIRA,2020).

Alguns exemplos dos defeitos que podem ocorrer por consequência de descontinuidades são representados pela figura 17.

- i. Trincas;
- ii. Inclusões de escórias;
- iii. Falta de penetração.
- iv. Porosidade
- v. Fusão incompleta

Figura 17 - Defeitos de solda mais comuns



Fonte: Singh (2012)

2.3.1 Trincas

Consideradas um dos tipos mais graves de descontinuidades em uma junta soldada, as fissuras, ou trincas, aparecem quando um material é incapaz de se deformar plasticamente para absorver as tensões de tração que se desenvolvem. Estas aparecem devido às variações de volume, ocasionadas pelas transformações de fase, usualmente associadas com o aquecimento disforme da região. (MARQUES; MODENESI; BRACARENSE, 2009).

Pode ocorrer no interior do metal de base (MB), na zona fundida (ZF) ou na zona termicamente afetada (ZTA), com dimensões micro ou macroscópicas. As ocorrências manifestam-se durante a solidificação da poça de fusão, durante o resfriamento (trinca a quente) ou até horas após a realização da solda, (trinca a frio), mais comumente causadas por hidrogênio (FELIZARDO, 2016).

2.3.1.1 Trincas a quente

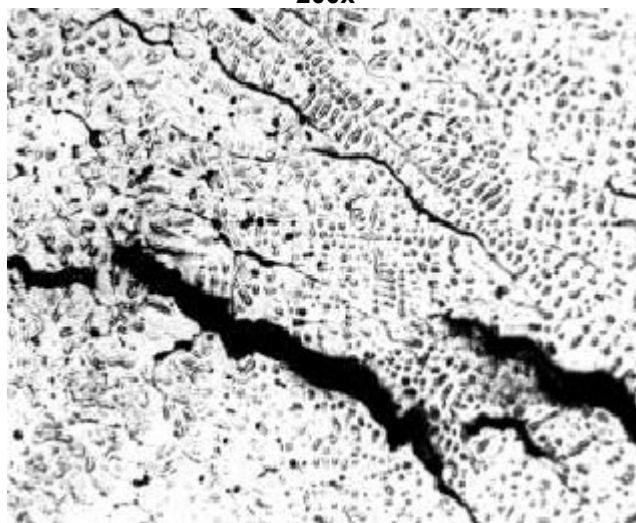
A composição química é a grande responsável pelo defeito da fissuração. Isto se dá principalmente devido a forma como ocorre a solidificação da poça de fusão e pela formação de uma pequena quantidade de líquido. Este, por sua vez, apresenta uma temperatura de solidificação inferior a poça de fusão e tende a se espalhar pelos contornos de grãos e espaços interdendríticos (MODENESI, 2012).

O próprio carbono influencia no modo de solidificação da poça de fusão. Para um teor de carbono acima de 0,1%, no sistema ferro-carbono, e a uma temperatura a partir de 1500°C, ocorre uma reação peritética e o material se solidifica

como austenita. Quando isto acontece, há um aumento da sensibilidade à fissuração, muito provavelmente devido a baixa solubilidade do enxofre na austenita. O níquel, por sua vez, tem um efeito parecido ao carbono. Cerca de 4% de níquel provoca o aumento da sensibilidade à fissuração (MODENESI, 2012).

A trinca aparece entre os contornos de grão, sendo sua morfologia intergranular em relação à estrutura primária de solidificação. A figura 18 apresenta um exemplo de uma micro trinca de solidificação na zona fundida de uma liga de aço inoxidável austenítico (MARQUES; MODENESI; BRACARENSE, 2009).

Figura 18 - Microtrincas de solidificação na zona fundida de uma liga Fe-Mn-Al-Si-C, ampliada 200x



Fonte: Modenesi, Marques e Santos (2012)

É possível associar uma trinca de solidificação com dois fatores. A primeira seria a incapacidade do material em deformar-se, e a segunda devido à presença de esforços de tração, que geram tensões capazes de ultrapassar a capacidade de resistência do material, um exemplo é ilustrado na figura 19 (MARQUES; MODENESI; BRACARENSE, 2012).

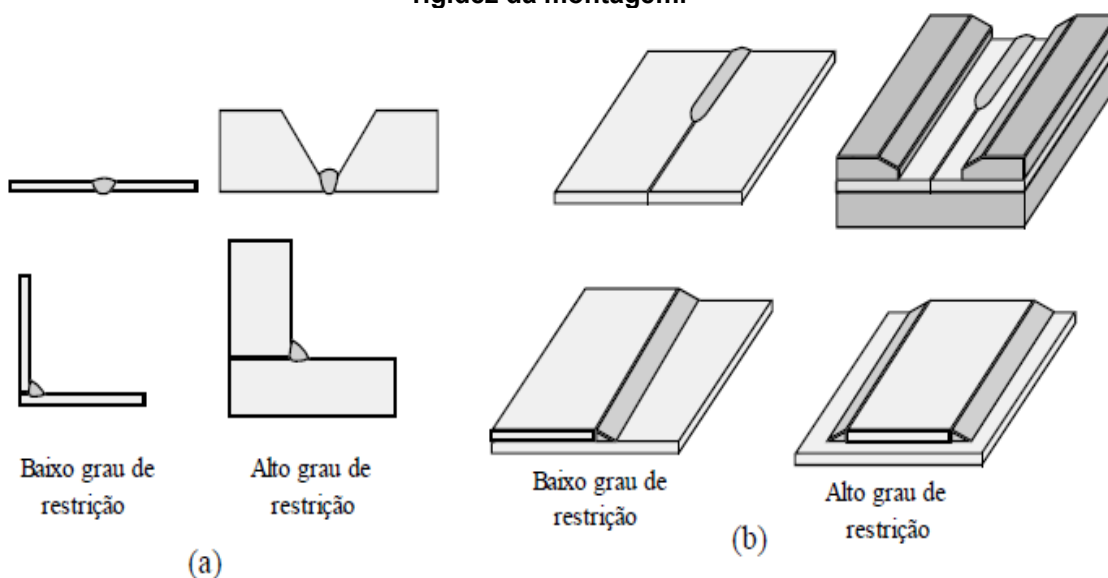
Figura 19 - Trinca por solidificação



Fonte: Felizardo (2016)

As trincas por solidificação podem ter vínculo com qualquer processo de soldagem conhecido. O nível de restrição da junta aumenta as chances de formação de trincas. Sua espessura e a rigidez da montagem, influenciam na relação de liberdade que os membros da junta têm para se mover e se adaptar às tensões resultantes da soldagem. A figura 20 ilustra os diferentes níveis de restrição conforme as dimensões da solda em relação à junta e a rigidez da montagem. (MARQUES; MODENESI; BRACARENSE, 2012).

Figura 20 - Nível de restrição conforme (a) as dimensões da solda em relação à junta e (b) a rigidez da montagem.



Fonte: Modenesi, Marques e Santos (2012)

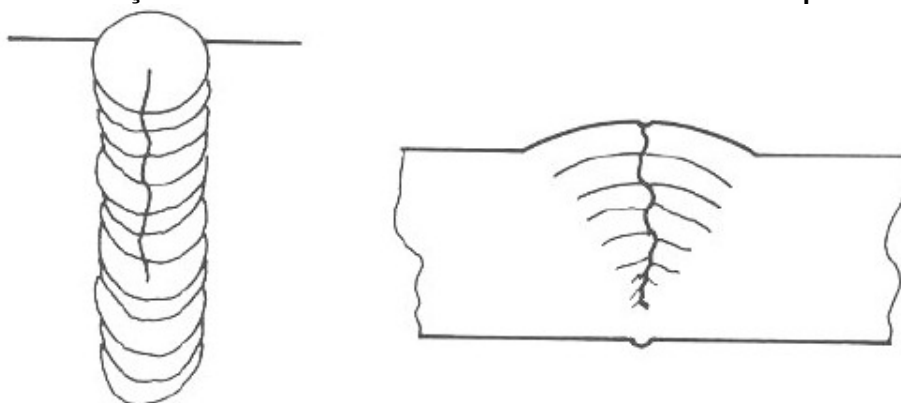
As trincas de solidificação a quente podem ser minimizadas por diversos fatores como: reduzir o grau de restrição das juntas; limpar apropriadamente a junta, impedindo a presença de materiais ricos em enxofre e carbono; e, quando necessário,

regular compostos químicos afim de aumentar a resistência à fissuração, como por exemplo a adição de manganês que tende a reagir com o enxofre e formar um sulfeto de maior temperatura de fusão (MODENESI, 2012).

2.3.1.2 Trincas a frio

A trinca a frio é caracterizada pela presença de hidrogênio, podendo ocorrer tanto na zona termicamente afetada quanto na zona fundida. A trinca se forma quando o material está próximo da temperatura ambiente, se desenvolvendo de uma forma lenta e descontínua, levando até 48 horas após soldagem para sua formação completa, conforme ilustrado pela figura 21 (MARQUES; MODENESI; BRACARENSE, 2012).

Figura 21 - Fissuração no centro do cordão de solda. Trincas induzidas por hidrogênio



Fonte: Tiburi (2007)

Proveniente do ar atmosférico ou até mesmo da humidade absorvida na superfície dos materiais, o hidrogênio difunde-se intersticialmente pela rede cristalina do metal (PEREIRA,2020). Como resultado, o hidrogênio difunde-se do cordão de solda para regiões da zona termicamente afetada, onde devido a presença de austenita, dificulta a difusão do hidrogênio e o mesmo acaba ficando retido nessa região adjacente ao cordão de solda (TIBURI, 2007).

Então, quando se inicia a decomposição dessa austenita em ferrita mais cementita, a solubilidade do hidrogênio cai, difundindo-se para a região austenitizada do metal base. Assim durante o resfriamento, essa região sofre têmpera, resultando em martensita e, conseqüentemente, em uma microestrutura mais frágil (BRANDI,2004).

Ainda, de acordo com Brandi (2004), o preaquecimento da chapa a ser soldada influencia na prevenção da trinca induzida por hidrogênio. Com o preaquecimento, a velocidade de resfriamento diminui e pode-se diminuir a quantidade de martensita na zona afetada pelo calor, além do que, favorece o escape de hidrogênio do metal base para atmosfera.

2.3.2 Porosidade

Esta descontinuidade baseia-se na formação de cavidades, resultantes do aprisionamento de gases durante a solidificação do cordão de solda, apresentando dimensões variáveis e não uniformes, conforme apresentado pela figura 22. (PEREIRA,2020).

De acordo com Tiburi (2007), a porosidade pode ocorrer por três formas. A primeira através da liberação de monóxido de carbono (CO), devido ao resultado de reações químicas em uma poça de fusão, ocasionada por inadequação da desoxidação da mesma. A segunda forma seria devido à expulsão do gás de solução conforme a solidificação da solda, como por exemplo na liberação do hidrogênio, em soldagem de ligas de alumínio. E uma terceira forma pode ocorrer pelo aprisionamento de gases na poça de fusão na soldagem com gás de proteção.

Figura 22 - Exemplo de porosidade em uma junta soldada



Fonte: Jacob (2007)

De acordo com Jacob (2017), o maior motivo de ocorrência dessa descontinuidade é devido a velocidade de soldagem ser muito rápida. Como o passe

acontece de forma rápida, o metal pode não fundir uniformemente, deixando lacunas internas.

A formação de porosidade também está relacionada à contaminação por sujeiras, pela presença de umidade nos consumíveis de soldagem ou metal base e ainda, por perturbações no gás de proteção, provocado por uma vazão muito elevada. A corrente excessiva e um arco longo, favorecem a degradação do revestimento ou o consumo excessivo de desoxidantes, provocando o aumento de CO na poça de fusão e, conseqüentemente, a formação de porosidade (MODENESI, 2012).

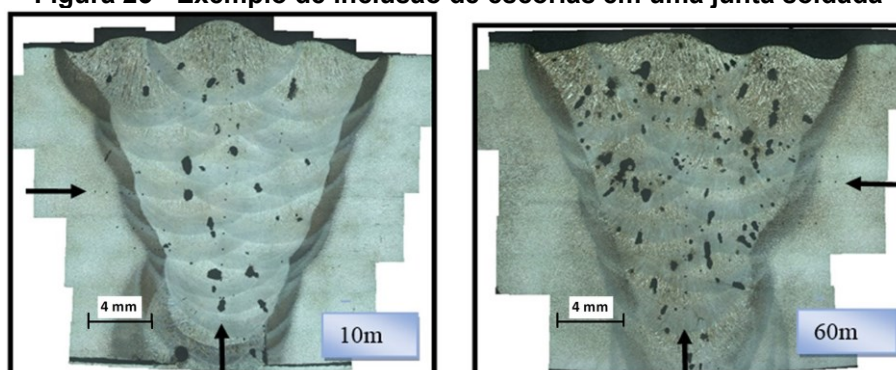
A remoção de resíduos de óleo, graxa, pintura e umidade na peça a ser soldada, antes da operação de soldagem, é fundamental para evitar a ocorrência de porosidade (ALCAN,2001).

2.3.3 Inclusões de Escórias

Inclusões de escórias são partículas não magnéticas presas no metal de solda ou na interface de solda. Essas escórias são resultado de uma falha técnica de soldagem ou por um acesso importuno à junta de solda, conforme ilustrado na figura 23. Entalhes afiados nas bordas da junta de solda ou entre os passes de solda, promovem o aprisionamento de escória (SINGH,2012).

Geralmente acontece com processos que utilizam fluxo, sendo possível que algumas partículas desse fluxo formem inclusões no cordão de solda. Como no caso do processo de soldagem TIG, onde a inadequação da escolha do gás de proteção pode resultar em inclusões de óxidos no cordão de solda. Ou ainda, inclusões de tungstênio, quando ocorre a utilização de correntes muito altas para o diâmetro do eletrodo de tungstênio (TIBURI,2007).

Figura 23 - Exemplo de inclusão de escórias em uma junta soldada



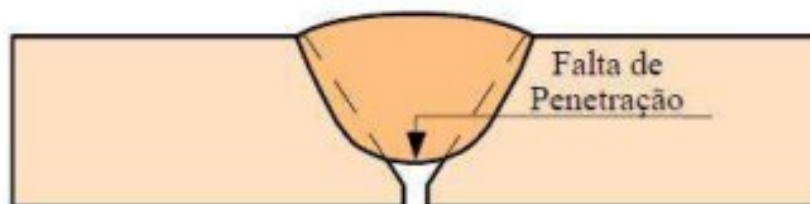
Fonte: Jacob (2007)

Tais inclusões são concentradores de tensão e, por consequência, favorecem a formação de trincas. Medidas preventivas como a remoção adequada da escória entre os passes e uma aplicação correta da técnica de soldagem, promovem um melhor resultado (TIBURI,2007).

2.3.4 Falta de Penetração

Esta descontinuidade ocorre quando o material de adição não consegue penetrar totalmente a espessura da junta, dando origem a fissuras em seu interior, como indicado pela figura 24 (PEREIRA,2020).

Figura 24 - Ilustração de um cordão de solda apresentando falta de penetração



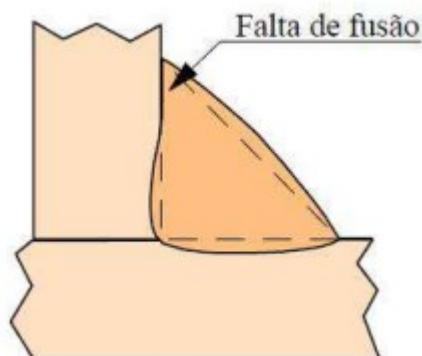
Fonte: Modenesi (2012)

A falta de penetração causa uma redução da seção útil da solda, além de ser um concentrador de tensões. A manipulação incorreta do eletrodo, um projeto inadequado da junta (com a abertura da raiz ou ângulo de chanfro pequenos) e a insuficiência da corrente de soldagem são causas para este defeito de soldagem (DE LUCA, 2014). A correção mais adequada para este tipo de descontinuidade é a elaboração de um procedimento de soldagem apropriado, seguido de um projeto de junta bem elaborado (MARQUES; MODENESI; BRACARENSE, 2012).

2.3.5 Fusão Incompleta

São fatores causadores desta descontinuidade: o uso incorreto da técnica de soldagem, o preparo inadequado dos materiais, um projeto mal elaborado das juntas, dificuldade de acesso à todas as juntas das faces para soldagem, além da presença de sujeira na junta. Todos estes fatores podem causar um problema de fusão incompleta, conseqüentemente, gerando uma região de concentração de tensão, conforme ilustrado pela figura 25 (SINGH,2012).

Figura 25 - Ilustração de um cordão de solda apresentando falta de fusão



Fonte: Modenesi (2012)

De acordo com Tiburi (2007), esse é um defeito não muito complexo de se evitar. Basta uma melhor qualificação do soldador, melhorando a técnica de soldagem, realizando procedimentos padrões, como a limpeza prévia da área a ser soldada, regulagem dos parâmetros e maior atenção na abertura das juntas de solda.

2.4 Qualificação na soldagem

A qualificação na soldagem é a garantia de conformidade conforme as normas, de que os materiais e procedimentos utilizados para a o processo de soldagem apresentarão um conjunto de propriedades mecânicas adequadas à sua aplicação final (PEREIRA,2020).

Antes da execução de um procedimento de soldagem, é necessário a elaboração de uma especificação do procedimento de soldagem preliminar (EPSp). Neste documento estarão contidas todas as diretrizes para a execução da soldagem. No entanto, este precisa ser validado antes de ser aprovado (PEREIRA,2020).

Ainda de acordo com Pereira (2020), para a validação da EPSp, a mesma é submetida a um processo de qualificação de soldagem (QPS). O registro dos resultados da qualificação, estarão presentes no registro de qualificação do procedimento de soldagem (RQPS). Quando aprovada, a EPSp dá origem a uma especificação do procedimento de soldagem (EPS), quando não, deve-se realizar as devidas modificações na EPSp e submete-la novamente a uma QPS.

Uma vez aprovada a EPS, um registro de qualificação do procedimento de soldagem (RQPS) deve ser elaborado. Neste, deve estar contido todo o registro dos resultados dos testes realizados, além de todas as variáveis utilizadas durante o

processo de soldagem, assim como representado na imagem 26 (ASME: Seção IX, 2019).

Figura 26 - Fluxograma do processo de qualificação de soldagem



Fonte: Autor (2022)

Os requisitos de soldagem em relação às estruturas soldadas são estabelecidos conforme regulamentos e normas. O fabricante que executa o trabalho deve responsabilizar-se pela análise dos requisitos presentes nas normas adequadas (WEMAN, 2012).

2.4.1 Especificação do procedimento de soldagem (EPS)

A especificação do procedimento de soldagem é um procedimento de soldagem qualificado, preparado para instruir a produção de soldas conforme os requerimentos da norma vigente. Uma EPS qualificada, é uma EPSp que passou por um processo de qualificação e foi aprovada. Esta, por sua vez, deve apresentar todas as variáveis essenciais, não essenciais e, quando necessário, as variáveis suplementares para cada processo de soldagem utilizado. Uma exemplificação do quadro de variáveis para o processo de soldagem por MIG /MAG está representado no apêndice A (ASME: Seção IX, 2019). As figuras 27 e 28 representam um modelo de EPS.

Figura 27 - Modelo de uma EPS (frente)ESPECIFICAÇÃO DE PROCEDIMENTO DE SOLDAGEM (EPS)

Nome da Companhia:
 EPS Nº: Data: .../.../..... RQP correspondente(s):
 Processo(s) de soldagem: Tipo:
 (manual, semi-, automático)

JUNTAS: Projeto da Junta: Cobre Junta (Sim/Não): Material (tipo): Outro:	TRAT. TÉRMICO APÓS SOLDAGEM: Faixa de Temperatura: Tempo de permanência: Outro:
METAIS DE BASE: Tipo: Análise química: Faixa de espessura: Outro:	CARACTERÍSTICAS ELÉTRICAS: Corrente (CC/CA): Polaridade: Faixa de corrente: Tensão: Outro:
METAIS DE ADIÇÃO E FLUXOS: Classif. AWS: Marca comercial: Dimensões: Outro:	TÉCNICA: Dimensão do bocal: Dist. Bico de contato-peça: Limpeza inicial ou entre passes (escovamento, esmerilhamento, ...): Cordão (reto/trançado): Oscilação: Método de goivagem: Número de passes (por lado):
GÁS: Gás(es) de proteção: Composição (misturas): Vazão: Outro:	Eletrodo (simples ou múltiplo): Velocidade de soldagem (faixa): Posição: Outro:
PRÉ-AQUECIMENTO: Temperatura: Temp. entre passes: Outro:	

Fonte: ASME: Seção IX; Adaptado por Modenesi (2005)

Figura 28 - Modelo de uma EPS (verso)ESPECIFICAÇÃO DE PROCEDIMENTO DE SOLDAGEM (verso)

DETALHES DA JUNTA:							
Passe Nº	Processo	Metal de adição		Corrente		Faixa de Tensão (V)	Velocidade de Soldagem (mm/s)
		Classe	Diâmetro	Pol.	Faixa (A)		

Fonte: ASME: Seção IX; Adaptado por Modenesi (2005)

Alterações nas variáveis não essenciais podem ser realizadas, afim de que se adaptem aos requerimentos de produção, sem a necessidade de uma requalificação da EPS. Quando necessário alterações em qualquer uma das variáveis essenciais ou suplementares, quando requisitadas, uma requalificação da EPS deve ser realizada. As informações requisitadas em uma EPS podem estar em qualquer formato, escrito ou por tabelas, a fim de que se adeque às necessidades da organização (ASME: Seção IX, 2019).

Uma EPS pode apresentar um ou mais registros de qualificação de soldagem (RQPS) e uma RPQS pode ser utilizada como parâmetro para uma ou mais EPSs (ASME: Seção IX, 2019).

2.4.2 Qualificação do procedimento de soldagem (QPS)

Afim de assegurar um cenário mais realista, o controle da qualidade na soldagem é de grande importância para garantir a harmonia entre custo e qualidade. Portanto, é imprescindível que procedimentos e equipamentos sejam capazes de produzirem soldas que atendam às demandas de normas e assegurar que a qualidade seja mantida durante a produção (ALCAN,2001).

O intuito de se qualificar as especificações dos procedimentos de soldagem é demonstrar que o processo é capaz de produzir juntas com elevada qualidade de propriedades mecânicas e de resistência à corrosão. O seu registro deve documentar as principais variáveis do processo de qualificação do procedimento de soldagem, assim como os resultados dos testes aplicados (ASME: Seção IX, 2019).

Existem duas formas de determinar se a solda atende à precisão requisitada em um projeto. A primeira seria submeter todos os produtos a testes reais, mas isso causaria sérias implicações, como um orçamento elevado e a possível destruição dos produtos. A segunda maneira seria através da realização dos testes não destrutivos. Desta maneira, além de abranger a maioria dos aspectos da solda, excluiria a necessidade de destruir os produtos a serem inspecionados (SINGH,2012).

Ainda de acordo com Singh (2012) os ensaios não destrutivos são utilizados para identificar todos os métodos de inspeção que permitem uma avaliação dos materiais e soldas sem destruí-los. A escolha de um determinado método de teste não destrutivo depende da energia disponível, o tipo de material a ser testado, o objetivo da inspeção e o grau de precisão requerido.

Além da qualificação do procedimento de soldagem, faz-se necessário também a qualificação da performance de soldagem. Esta, por sua vez, tem a função de qualificar a pessoa que vai utilizar do procedimento de soldagem, através de uma avaliação das suas habilidades em produzir uma junta de solda utilizando o procedimento de soldagem adequado (ASME: Seção IX, 2019).

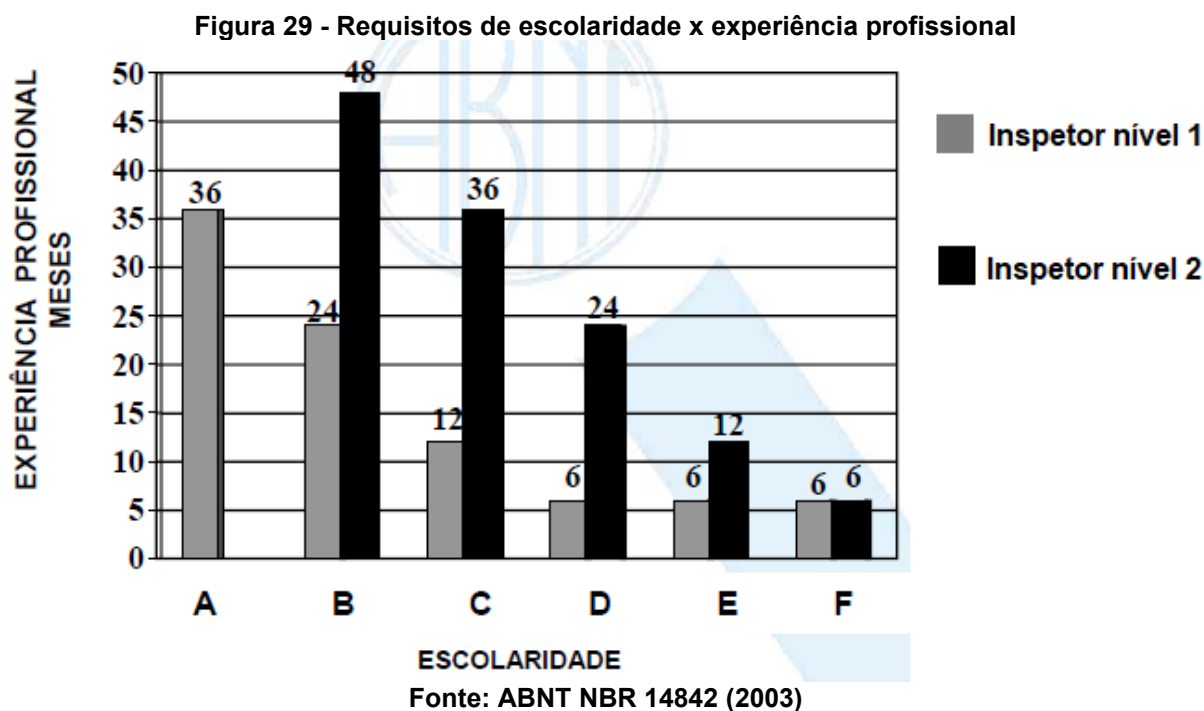
É de responsabilidade da empresa adequar as pessoas para supervisionarem as atividades performadas ou terceirizar profissionais que estejam qualificados. Estas, devem apresentar um nível satisfatório de competência, como qualificação educacional, experiência ou treinamento adequado, de acordo com um programa de qualificação. Além disso, um registro deve ser mantido pela empresa, contendo evidências de qualificações e treinamentos (ASME: Seção IX, 2019).

2.4.2.1 Qualificação e certificação de inspetores e soldadores

Os profissionais que atuam como inspetores de soldagem são classificados em dois níveis, nível 1 e nível 2. O inspetor de nível 1 atua diretamente no acompanhamento da execução dos procedimentos de soldagem, verificando conformidade da quantidade especificada, além de verificar os resultados de ensaios não destrutivos e a qualificação dos soldadores que estão sendo utilizados. O inspetor nível 2 é qualificado para atuar em todos os segmentos do inspetor nível 1, além de interpretar e implementar os requisitos de normas técnicas referentes à soldagem, avaliar os resultados, emitir laudos e aprovar a qualificação (ABNT NBR:14842, 2003).

Os candidatos a inspetores devem atender aos requisitos mínimos de escolaridade e experiência profissional, conforme apresentado na figura 29. A figura possui seis classificações distintas conforme a escolaridade do profissional. Em A, observa-se que o profissional com apenas o ensino fundamental completo consegue dar início no curso de inspetor nível 1 com 36 meses de experiência profissional comprovada. Apenas com o ensino fundamental, o profissional não consegue realizar a graduação para o inspetor de nível 2, independentemente do tempo de experiência profissional (ABNT NBR:14842, 2003).

Quanto maior o nível de escolaridade, menor o tempo de experiência profissional requerido. Conforme pode-se observar na classificação F da figura 29. Um profissional com curso de especialização em engenharia da soldagem, pode iniciar a sua graduação para inspetor de nível 1 com apenas 6 meses de experiência comprovada. O mesmo para o inspetor de nível 2. (ABNT NBR:14842, 2003)



Legenda:

A: Ensino fundamental completo;

B: Ensino médio completo;

C: Curso técnico em mecânica, metalurgia ou naval;

D: Curso técnico em soldagem;

E: Curso superior em engenharia, nas áreas de ciências exatas ou curso de tecnologia da soldagem;

F: Curso de especialização em engenharia de soldagem

Para certificação de inspetor de nível 1, o profissional deve apresentar certificação igual ou inferior há seis anos em um curso de treinamento com carga horária mínima de 162 horas, além dos requisitos de escolaridade mínima. Para inspetor de nível 2, a carga horária mínima é de 210 horas.

Para formação e certificação dos profissionais, a Fundação Brasileira de Tecnologia da Soldagem (FBTS) é acreditada pela Coordenação Geral de Acreditação do Inmetro (Cgcre) como Organismo de Certificação de Pessoas (OPC) e de Produtos (OCP) e está apta a fornecer os cursos de qualificação para inspetores de nível 1 e 2 (FBTS, 2022).

A FBTS possui sede no Rio de Janeiro e apresenta a sua principal demanda juntamente da Petrobrás, na área de soldagem. A empresa desenvolve de modo

cooperativo, suas ações e projetos nas áreas de educação e treinamento, certificação da qualidade, gestão tecnológica, pesquisa e desenvolvimento. Além disso, a FBTS tem reconhecimento internacional, com serviços executados em países como Uruguai, por exemplo (FBTS, 2022).


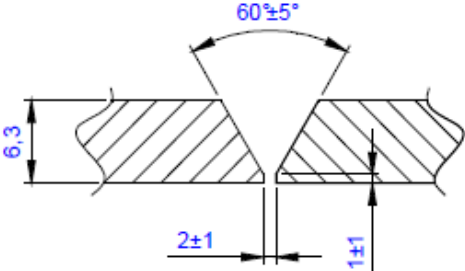
Um soldador deve apresentar um teste prático, o qual deve ser supervisionado por um inspetor de soldagem, para obter a certificação de qualificação do soldador (CQS) (INSPESOLDA, 2022).

Através da supervisão de um inspetor de solda qualificado, um corpo de prova deve ser soldado, conforme EPS, onde mostre: a utilização das variáveis essenciais durante a soldagem, os resultados dos ensaios não destrutivos do cordão de solda e a identificação da especificação do procedimento de soldagem. Estes devem ser registrados e avaliados por um inspetor de solda qualificado e deve ficar disponível para consultas (ASME: Seção IX, 2019).

2.4.3 Registro de qualificação do procedimento de soldagem (RQPS)


O RQPS é um registro de variáveis utilizadas durante o procedimento de soldagem dos corpos de prova. Um RQPS qualificado, deve conter todas as variáveis essenciais, não essenciais e, quando necessário, as variáveis suplementares utilizadas para cada processo de soldagem. No caso de alguma variável não estar sendo monitorada durante o processo, esta não deve ser registrada. Além disso, o RQPS deve ter em seu registro, os resultados dos testes aplicados, conforme ilustrado nas figuras 30 e 31 (ASME: Seção IX, 2019).

Figura 30 - Exemplo de um RQPS (frente)

	REGISTRO DE QUALIFICAÇÃO DE PROCEDIMENTO DE SOLDAGEM (RQPS) <small>(WELDING PROCEDURE QUALIFICATION RECORD - WPQR)</small>		DATA: <small>(DATE)</small> 06/05/2013
			RQPS Nº: <small>(WPQR No.)</small> 001/13-ER
			FOLHA: <small>(SHEET)</small> 01 de 02
ESPECIFICAÇÃO DE PROCEDIMENTO DE SOLDAGEM Nº: <small>(WELDING PROCEDURE SPECIFICATION No.)</small>			001/13-ER
ACOMPANHAMENTO DE QUALIFICAÇÃO SOLDADOR / OPERADOR Nº: <small>(WELDER / OPERATOR MONITORING OF QUALIFICATION)</small>			001/13-ER
EMISSÃO INICIAL			REVISÃO <small>(REVISION)</small> 0 DATA <small>(DATE)</small> 06/05/2013
PROCESSO DE SOLDA: <small>(WELDING PROCESS)</small> ELETRODO REVESTIDO <small>(SMAW)</small>		TIPOS (PQW-410.25): <small>(TYPES)</small> MANUAL <small>(MANUAL)</small>	
JUNTA <small>(JOINTS)</small>			
MATA JUNTA: <small>(BACKING)</small> <input checked="" type="checkbox"/> SIM <small>(YES)</small> <input type="checkbox"/> NÃO <small>(NO)</small>		MATERIAL MATA JUNTA: <small>(BACKING MATERIAL)</small> <input checked="" type="checkbox"/> METÁLICO <small>(METALLIC)</small> <input type="checkbox"/> NÃO METÁLICO <small>(NON METALLIC)</small> <input type="checkbox"/> OUTROS <small>(OTHERS)</small>	
DETALHES DA JUNTA <small>(JOINT DETAILS)</small>		METAIS BASE <small>(BASE METAL)</small>	
 <p style="text-align: center;">TODAS AS MEDIDAS EM mm, EXCETO ONDE INDICADO. <small>(ALL DIMENSIONS IN mm EXCEPT WHERE IS INDICATED)</small></p>		GRUPO Nº: <small>(GROUP NUMBER)</small> II	COM GRUPO Nº: <small>(WITH GROUP NUMBER)</small> II
		ESPECIFICAÇÃO: <small>(SPECIFICATION)</small> ASTM A-36	
		TIPO OU GRAU: <small>(TYPE OR GRADE)</small> NÃO APLICÁVEL <small>(NOT APPLICABLE)</small>	
		METAIS DEPOSITADOS <small>(FILLER METALS)</small>	
		ESPECIFICAÇÃO SFA Nº: <small>(SPECIFICATION)</small> 5.1	F Nº: <small>(F NUMBER)</small> 4
		CLASSIFICAÇÃO AWS Nº: <small>(CLASSIFICATION AWS No.)</small> E70 18	
		DIMENSÕES: <small>(SIZES OF FILLER METAL)</small> Ø 2,5mm / Ø 3,25mm	
		MARCA COMERCIAL: <small>(TRADEMARK)</small> DEF	
POSIÇÕES <small>(POSITION)</small>			
POSIÇÃO: <small>(POSITION)</small> 2G HORIZONTAL <small>(2G HORIZONTAL)</small>		SENTIDO DE PROGRESSÃO: <small>(WELDING PROGRESSION)</small> NÃO APLICÁVEL <small>(NOT APPLICABLE)</small>	
PREAQUECIMENTO <small>(PREHEAT)</small>			
TEMPERATURA DE PREAQUECIMENTO: <small>(PREHEAT TEMPERATURE)</small> 20°C		TEMPERATURA DE INTERPASSE: <small>(INTERPASS TEMPERATURE)</small> 250°C	
CONTROLE: <small>(CONTROL)</small> LÁPIS TÉRMICO <small>(TEMPERATUR INDICATOR)</small>		OBSERVAÇÕES: <small>(REMARKS)</small>	
TRATAMENTO TÉRMICO PÓS-SOLDAGEM <small>(POSTWELD HEAT TREATMENT)</small>			
TAXA DE AQUECIMENTO: <small>(HEATING RATE)</small> NÃO APLICÁVEL <small>(NOT APPLICABLE)</small>		TEMPERATURA DE TRATAMENTO: <small>(TEMPERATURE TREATMENT)</small> NÃO APLICÁVEL <small>(NOT APPLICABLE)</small>	
TEMPO DE TRATAMENTO: <small>(TIME OF TREATMENT)</small> NÃO APLICÁVEL <small>(NOT APPLICABLE)</small>		TAXA DE RESFRIAMENTO: <small>(COOLING RATE)</small> NÃO APLICÁVEL <small>(NOT APPLICABLE)</small>	
TÉCNICA <small>(TECHNIQUE)</small>			
RETILINEO OU OSCILANTE: <small>(STRING OR WEAVE BEAD)</small>	RETILINEO <small>(STRING)</small>	OSCILAÇÃO: <small>(WEAVE)</small>	3 X Ø ALMA DO ELETRODO <small>(3 X Ø ELECTRODE)</small>
METODO DE LIMPEZA <small>(METHOD CLEANING)</small>	ESCOVAMENTO <small>(BRUSHING)</small>	METODO DE GOIVAGEM: <small>(METHOD BACK GOUGE)</small>	LIXAMENTO <small>(SANDING)</small>
PASSE SIMP./MULT. POR LADO: <small>(MULTIPASS PER SIDE / SINGLE PASS PER SIDE)</small>	MÚLTIPLOS <small>(MULTIPASS)</small>	ELET. SIMPLES OU MÚLTIPLOS: <small>(MULTIPLE / SINGLE ELECTRODE)</small>	SIMPLES <small>(SIMPLES)</small>
CARACTERÍSTICAS ELÉTRICAS <small>(ELECTRIC CHARACTERISTICS)</small>			
TIPO DE CORRENTE: <small>(CURRENT TYPE)</small> CONTÍNUA - CC <small>(DIRECT - DC)</small>		POLARIDADE: <small>(POLARITY)</small> REVERSA + <small>(REVERSE +)</small>	
FAIXA DE CORRENTE: <small>(CURRENT RANGE)</small> 95 – 125 A		FAIXA DE TENSÃO: <small>(VOLTAGE RANGE)</small> 22 – 28 V	
CERTIFICAMOS QUE OS DADOS DESTES REGISTRO ESTÃO CORRETOS E QUE AS SOLDAS FORAM PREPARADAS, SOLDADAS E TESTADAS DE ACORDO COM OS REQUISITOS DA NORMA AWS D1.1 EDIÇÃO 2010. <small>(WE CERTIFY THAT THE STATEMENTS IN THIS RECORD ARE CORRECT AND THAT THE TEST WELDS WERE PREPARED, WELDED AND TESTED IN ACCORDANCE WITH THE REQUIREMENTS OF THE AWS D1.1 STANDARD EDITION 2010.)</small>			
EMITIDO POR <small>(ISSUED BY)</small>	APROVADO POR <small>(APPROVED BY)</small>	CONTROLE DE QUALIDADE <small>(QUALITY CONTROL)</small>	

Fonte: Junior; Ferreira (2015)

Figura 31 - Exemplo de um RQPS (verso)

		REGISTRO DE QUALIFICAÇÃO DE PROCEDIMENTO DE SOLDAGEM (RQPS) <small>(WELDING PROCEDURE QUALIFICATION RECORD - WPQR)</small>			REVISÃO <small>(REVISION)</small>	DATA <small>(DATE)</small>	DATA: <small>(DATE)</small>	06/05/2013
					0	06/05/2013	RQPS Nº: <small>(WPQR No.)</small>	001/13-ER
					-	-	FOLHA: <small>(SHEET)</small>	02 de 02
TESTE DE TRAÇÃO <small>(TENSILE TEST)</small>								
IDENTIFICAÇÃO <small>(SPECIMEN No.)</small>	DIMENSÕES mm <small>(DIMENSION)</small>	ÁREA mm ² <small>(AREA)</small>	CARGA Kgf <small>(LOAD)</small>	TENSÃO DE RUPTURA MPa <small>(ULTIMATE TENSILE STRESS)</small>	LOCAL DA RUPTURA <small>(FAILURE LOCATION)</small>			
TP 1	6,15 x 20,13	123,80	6036	478	ROMPEU NO METAL DE BASE			
TP 2	6,17 x 20,11	482,78	5514	436	ROMPEU NO METAL DE BASE			
OBSERVAÇÕES: <small>(REMARKS)</small>	RESULTADO <small>(RESULT)</small>	APROVADO <small>(APPROVED)</small>			CERT. Nº:	REL. N°XXXX DA ZZZ		
TESTE DE DOBRAMENTO <small>(GUIDED BEND TESTS)</small>								
TIPO DE DOBRAMENTO <small>(TYPE)</small>	RESULTADO <small>(RESULT)</small>		TIPO DE DOBRAMENTO <small>(TYPE AND FIG. Nº)</small>		RESULTADO <small>(RESULT)</small>			
DF1	APROVADO <small>(APPROVED)</small>		DR1		APROVADO <small>(APPROVED)</small>			
DF2	APROVADO <small>(APPROVED)</small>		DR2		APROVADO <small>(APPROVED)</small>			
OBSERVAÇÕES: <small>(REMARKS)</small>	RESULTADO <small>(RESULT)</small>	APROVADO <small>(APPROVED)</small>			CERT. Nº:	REL. N°XXXX DA ZZZ		
TESTE DE IMPACTO <small>(TOUGHNESS TESTS)</small>								
TIPO <small>(TYPE)</small>	TEMPERATURA <small>(TEMPERATURE)</small>			DIMENSÕES <small>(DIMENSION)</small>				
IDENTIFICAÇÃO <small>(SPECIMEN No.)</small>	VALOR IMPACTO <small>(IMPACT VALUES)</small>	MÉDIA <small>(AVERAGE)</small>	LOCAL DE ENTALHE <small>(NOTCH LOCATION)</small>		EXPANSÃO LATERAL <small>(LATERAL EXPANSION)</small>			
	JOULE	JOULE	CISALHAMENTO EM %	MILS	mm	mm		
-	-	-	-	-	-	-		
-	-	-	-	-	-	-		
-	-	-	-	-	-	-		
-	-	-	-	-	-	-		
OBSERVAÇÕES: <small>(REMARKS)</small>	RESULTADO <small>(RESULT)</small>	NÃO APLICÁVEL <small>(NOT APPLICABLE)</small>			CERT. Nº:	NÃO APLICÁVEL <small>(NOT APPLICABLE)</small>		
TESTE DA SOLDA EM ÂNGULO <small>(FILLET WELD TEST)</small>								
RESULTADO: <small>(RESULT)</small>	NÃO APLICÁVEL <small>(NOT APPLICABLE)</small>			PENETRAÇÃO METAL BASE: <small>(PENETRATION INTO BASE METAL)</small>		NÃO APLICÁVEL <small>(NOT APPLICABLE)</small>		
RESULTADO DA MACROGRAFIA: <small>(MACRO RESULTS)</small>	NÃO APLICÁVEL <small>(NOT APPLICABLE)</small>			NÃO APLICÁVEL <small>(NOT APPLICABLE)</small>				
OBSERVAÇÕES: <small>(REMARKS)</small>	RESULTADO <small>(RESULT)</small>	NÃO APLICÁVEL <small>(NOT APPLICABLE)</small>			CERT. Nº:	NÃO APLICÁVEL <small>(NOT APPLICABLE)</small>		
OUTROS TESTES <small>(OTHER TESTS)</small>								
INSPEÇÃO VISUAL: <small>(VISUAL INSPECTION)</small>	EMPRESA ABC	RESULTADO: <small>(RESULT)</small>	APROVADO <small>(APPROVED)</small>		CERT. Nº:	ABC/13		
TESTE RADIOGRÁFICO: <small>(RADIOGRAPHIC TESTING)</small>	EMPRESA XYZ	RESULTADO: <small>(RESULT)</small>	APROVADO <small>(APPROVED)</small>		CERT. Nº:	XYZ/13		
TESTE POR ULTRASSOM: <small>(ULTRASONIC TESTING)</small>	-	RESULTADO: <small>(RESULT)</small>	-		CERT. Nº:	-		
LIQUIDO PENETRANTE: <small>(PENETRANT LIQUID)</small>	-	RESULTADO: <small>(RESULT)</small>	-		CERT. Nº:	-		
PARTÍCULA MAGNÉTICA: <small>(MAGNETIC PARTICLE)</small>	-	RESULTADO: <small>(RESULT)</small>	-		CERT. Nº:	-		
NOME DO SOLDADOR: <small>(WELDER NAME)</small>	XXXXXXXXXX					SINETE:	S-01	
FABRICANTE: <small>(MANUFACTURER)</small>	FABRICANTE YYYY	DATA: <small>(DATE)</small>	06/05/2013		ELABORADO POR: <small>(ELABORATED BY)</small>	XXXXXXXXXXXX ZZZZZZZZZZZZ		
CERTIFICAMOS QUE OS DADOS DESTES REGISTROS SÃO CORRETOS E QUE AS SOLDAS FORAM PREPARADAS, SOLDADAS E TESTADAS DE ACORDO COM OS REQUISITOS DA NORMA AWS D1.1 EDIÇÃO 2010. <small>(WE CERTIFY THAT THE STATEMENTS IN THIS RECORD ARE CORRECT AND THAT THE TEST WELDS WERE PREPARED, WELDED AND TESTED IN ACCORDANCE WITH THE REQUIREMENTS OF THE AWS D1.1 STANDARD EDITION 2010.)</small>								
EMITIDO POR <small>(ISSUED BY)</small>			APROVADO POR <small>(APPROVED BY)</small>			CONTROLE DE QUALIDADE <small>(QUALITY CONTROL)</small>		

Fonte: Junior; Ferreira (2015)

O registro de qualificação do procedimento de soldagem deve ser certificado pela organização. Todos os seus resultados devem estar conciliados com a seção IX da norma ASME. Uma ou mais combinações de processos de soldagem podem ser utilizados, assim como outras variáveis, durante o processo de soldagem dos corpos de prova. A espessura aproximada do metal de solda depositado deve ser registrada para cada variável essencial e, suplementar, quando necessário. Cada conjunto de variáveis utilizado deve estar incluso nos testes de tensão, dobramento e de resistência, ou qualquer outro teste mecânico necessário (ASME: Seção IX, 2019).

Apenas correções editoriais e adendos são permitidos para o caso de uma alteração em um RQPS. Informação adicional pode ser incorporada no registro de qualificação do procedimento de soldagem desde que seja considerada substancial à condição de qualificação original. Todas alterações realizadas em uma RPQS demandam recertificação pela organização (ASME: Seção IX, 2019).

A informação em uma RPQS pode estar em qualquer formato desde que a mesma se adeque às necessidades da organização e apresente todas as variáveis utilizadas, além dos tipos de testes, número de testes e seus respectivos resultados. A RQPS deve estar disponível para revisão, apenas para inspetores de soldagem (ASME: Seção IX, 2019).

2.5 Norma ASME para caldeiras e vasos de pressão

A *American Society of Mechanical Engineers* (ASME) foi fundada em 1880 nos EUA por um pequeno grupo de líderes industriais. Na atualidade a associação está presente em cerca de 140 países, incluindo o Brasil e possui mais de 120.000 membros (BETHLEHEM, 2022).

Segundo a norma ASME (2019), o intuito das regras estabelecidas pelas normas é de proporcionar proteção à vida e à propriedade, além de fornecer uma margem de segurança e maior tempo de uso em serviço.

Subdividido em 37 ramos específicos, o quadro técnico da ASME possui especificação para indústria aeroespacial, nanotecnologia, transporte ferroviário, vasos de pressão, entre outros. Para o caso dos vasos de pressão, o código ASME se divide nas seguintes seções (BETHLEHEM, 2022):

- Seção I – Regras para construção de caldeiras de energia;
- Seção II – Especificação de materiais;
- Seção III – Regras para construção de componentes nucleares;
- Seção IV – Regras para construção e caldeiras de aquecimento;
- Seção V – Ensaio não destrutivo;
- Seção VI – Regras recomendadas para manutenção e operação de caldeiras;
- Seção VII – Regras recomendadas para manutenção de caldeiras;
- Seção VIII – Regras para construção de vasos de pressão;
- Seção IX – Qualificação de soldagem e brasagem;
- Seção X – Código de vasos de pressão e caldeiras – fibras – Vasos de pressão com reforçamentos plásticos;
- Seção XI – Regras para inspeção de plantas e componentes nucleares;
- Seção XII – Regras para construção de tanques transportáveis.

No presente trabalho, tem-se interesse, e dessa forma, serão abordados conceitos introdutórios das seções I, V e IX.

2.5.1 ASME seção I: Regras para construção de caldeiras de energia

As regras presentes nesta seção são para métodos de fabricação por soldagem e brasagem aplicáveis para caldeiras e seus componentes. Estas devem ser utilizadas em conjunto com as outras seções presentes na norma, além de levar em consideração o tipo de caldeira a ser fabricado (ASME: Seção I, 2019).

A responsabilidade de execução e avaliação da soldagem é do fabricante da caldeira. A pessoa responsável a produzir os procedimentos, assim como conduzir os testes adequados de qualificação dos procedimentos de soldagem utilizados na construção, pode ser um colaborador direto da empresa ou uma empresa terceirizada especializada para este tipo de serviço (ASME: Seção I, 2019).

Parâmetros dimensionais, tratamentos térmicos, preparação do metal base, além de considerações de alinhamento, dependendo do componente a ser soldado, estão devidamente referenciados dentro desta seção.

2.5.2 ASME seção V: Testes não destrutivos

Esta seção contém os requerimentos e métodos para aplicação dos testes não destrutivos. Testes como radiografia, ultrassom, líquido penetrante, partículas magnéticas e exame visual estão presentes nesta seção da norma (ASME: Seção V, 2019).

Conforme a seção V da norma ASME (2019), quando é requisitada a qualificação do procedimento do teste, uma demonstração deve ser apresentada a fim de que sejam aceitos os testes produzidos.

Ainda de acordo com a norma, o procedimento deve ser considerado qualificado quando um inspetor de nível 2, estiver satisfeito com o resultado apresentado pelo soldador. O teste deve ser registrado com as identidades e assinaturas de ambos.

O inspetor pode ser um funcionário da própria empresa, desde que este seja qualificado segundo um Organismo de Certificação de Pessoas (OCP) vigente (ASME: Seção V, 2019).

2.5.3 ASME seção IX: Padrões de qualificação para procedimento de soldagem, brasagem e fusão

Conforme o artigo I da seção IX da norma ASME (2019), são apresentados os requerimentos gerais para preparação da EPS e para sua qualificação. A responsabilidade do controle de produção operacional utilizado pela organização, deve estar de acordo o padrão de especificação do procedimento de soldagem conforme a Sociedade Americana de Solda (AWS), listados no apêndice E da norma ASME (2019) para caldeiras e vasos de pressão.

No preparo da EPS pela organização, esta deve apresentar ambas as variáveis essenciais e não essenciais para cada processo de soldagem a ser utilizado. Variáveis essenciais são aquelas nas quais uma mudança é suficiente para afetar as propriedades mecânicas da solda e, quando alteradas, uma requalificação da EPS faz-se necessário (ASME: Seção IX, 2019).

Ainda conforme a seção IX da norma ASME (2019), quando um teste de resistência for requerido, as variáveis suplementares devem ser levadas em consideração na EPS. As variáveis essenciais, não essenciais e suplementares para

cada processo de soldagem estão representadas dentro do artigo II da seção IX da norma ASME (2019).

Afim de otimizar o número de qualificação dos procedimentos de soldagem, foram elaborados os agrupamentos de metais base e metais de adição. O agrupamento dos metais base é identificado pela letra “P”, seguido de um número. Por exemplo, os metais base definidos como P-Nº.5A são distintos dos P-Nº.5B. Essa classificação é baseada na comparação de características como composição, soldabilidade e propriedades mecânicas (ASME: Seção IX, 2019). O quadro 5 apresenta as classificações de vários grupos de ligas, conforme os números P.

As tabelas completas de classificação conforme os números P, estão devidamente apresentadas no artigo 5 da seção IX da norma ASME para caldeiras e vasos de pressão.

Quadro 5 - Classificação de grupos de ligas conforme P-Nº

METAL BASE	SOLDAGEM
Aço e suas ligas	P-Nº1 até P-Nº15F
Alumínio e ligas a base de alumínio	P-Nº.21 até P-Nº.26
Cobre e ligas a base de cobre	P-Nº.31 até P-Nº.35
Níquel e ligas a base de níquel	P-Nº.31 até P-Nº.49
Titânio e ligas a base de titânio	P-Nº.51 até P-Nº.53
Zircônio e ligas a base de zircônio	P-Nº.61 até P-Nº.62

Fonte: ASME: Seção IX (2019)

Ainda conforme a seção IX da norma ASME (2019), o agrupamento de metais de adição é identificado pela letra “F”, seguido de um número. Sua classificação é baseada de acordo com suas características de uso, o qual permite determinar a qualidade técnica dos soldadores referente a um determinado metal de adição.

As tabelas completas de classificação conforme os números F, estão devidamente apresentadas no artigo 5 da seção IX da norma ASME para caldeiras e vasos de pressão.

2.6 Ensaaios não destrutivos

Os métodos de testes não destrutivos são capazes de detectar defeitos superficiais e internos nos materiais, soldas, partes fabricadas e componentes. Alguns dos principais métodos são: inspeção visual, inspeção por líquido penetrante, inspeção por partícula magnética e inspeção por ultrassom (ASME: Seção V, 2019).

Podendo ser utilizada como um guia de uma forma geral, o quadro 6 apresenta defeitos de soldagem comuns sendo relacionados com alguns dos métodos de exames não destrutivos, onde estes são classificados conforme a sua capacidade de detectar tal defeito (ASME: Seção V, 2019).

Quadro 6 - Relação de defeitos de soldagem com tipos de métodos de exames não destrutivos

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

Fonte: ASME: Seção V (2019) – adaptado

Legenda:

IV: Inspeção visual;

ILP: Inspeção por líquido penetrante;

IPM: Inspeção por partícula magnética;

IU: Inspeção por ultrassom

Os números das classificações para cada defeito conforme o método não destrutivo representam o grau de dificuldade na detecção do defeito:

1: Todas, ou a maioria das técnicas vão detectar o defeito, dentro de qualquer condição;

2: Uma ou mais técnicas vão detectar o defeito, dentro de certas condições;

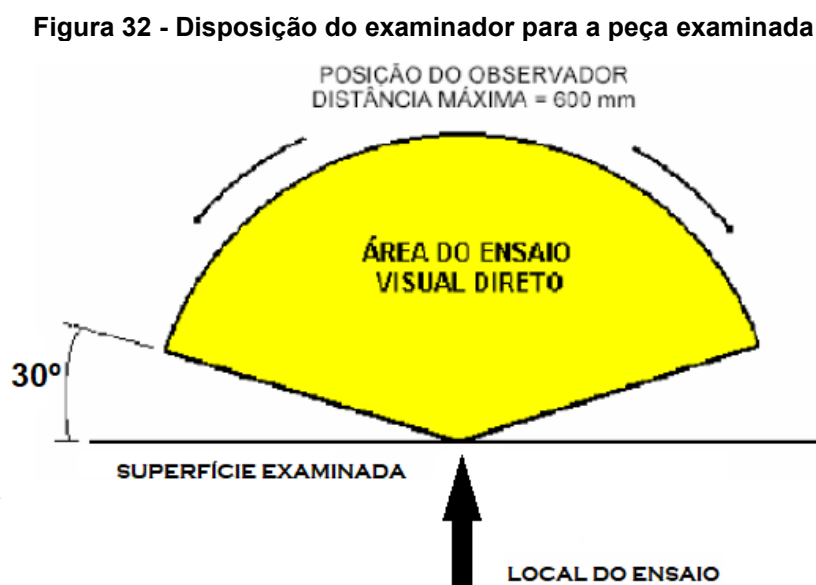
3: Técnicas e condições especiais vão detectar o defeito, além do requisito de uma boa qualificação do profissional.

2.6.1 Inspeção Visual

O exame visual é um importante parte do sistema de controle de qualidade. É o primeiro meio de inspeção utilizado para diversos tipos de máquinas, materiais e soldas. Algumas das vezes, a inspeção visual acaba sendo a única inspeção realizada. Em sua grande maioria, é pré-requisito antes da aplicação de uma outra inspeção (SINGH,2012).

Para a soldagem, a inspeção visual requer um certo nível de experiência e treinamento. É esperado que o profissional a realizar a inspeção não tenha nenhuma limitação física, afim de ser apto a alcançar diferentes posições da solda a ser avaliada. Além disso, o mesmo deve apresentar-se familiarizado com máquinas, materiais, especificações e normas (SINGH,2012).

A inspeção visual pode ser classificada em: exame direto, remoto e translúcido. O exame visual direto é realizado quando o acesso visual ao material é suficiente para que se possa ficar a uma distância igual ou menor que 600mm e a uma angulação não menor que 30° em relação à superfície a ser examinada, conforme ilustrado na figura 32 (SAMPAIO, 2009).



Fonte: Sampaio (2009)

Ainda segundo Sampaio (2009), o exame visual remoto acontece quando os componentes a serem examinados encontram-se inacessíveis para realização do exame visual direto. Assim, este exame utiliza-se de ferramentas auxiliares como espelhos, boroscópios, fibras óticas e câmeras, sendo alguns exemplificados na figura

33. Por fim, o exame visual translúcido é um suplemento do exame visual direto que utiliza o auxílio da iluminação artificial como um iluminador que produza luz direcional.

Figura 33 - Boróscopio e fibroscópio



Fonte: Direct Industry (2022)

2.6.2 Inspeção por líquido penetrante

A finalidade do ensaio por líquido penetrante é detectar descontinuidades superficiais e que sejam abertas na superfície, assim como trincas, poros, dobras, entre outros. O ensaio pode ser aplicado em todos materiais sólidos, que não sejam porosos e não possuam superfície muito grossa (ANDREUCCI,2014).

Trata-se de um método muito efetivo, capaz de expor aberturas e descontinuidades na superfície até mesmo para uma inspeção visual. O processo atua muito bem tanto em materiais não magnéticos, quanto em materiais magnéticos, sendo capaz de identificar facilmente pequenas imperfeições (SINGH,2012).

De acordo com norma da Petrobras N-2370, os materiais utilizados para execução do ensaio por líquido penetrante são:

- i. Emulsificador: Agente líquido que, quando combinado com um líquido penetrante insolúvel em água, comporta-se como um penetrante solúvel, permitindo sua remoção por água. Pode ser de base aquosa (hidrofílico) ou de base oleosa (lipofílico), sendo que sua cor deve ser diferente da cor do líquido penetrante;
- ii. Penetrante: Líquido de alta capacidade de penetração por capilaridade, permitindo a detecção de descontinuidades abertas à superfície em materiais não porosos. Pode ser colorido, de cor vermelho ou violeta, o qual propicia contraste com o revelador sob luz visível ou pode ser fluorescente, o qual emite luz visível quando

exposto à luz negra, cor esta que deve ser amarelo-esverdeado ou verde;

- iii. Removedor: Produto empregado na remoção do excesso do penetrante antes da revelação. Dependendo do tipo do penetrante empregado, pode ser composto de água ou produto químico (solvente);
- iv. Solvente: Produto químico utilizado na limpeza da superfície, capaz de dissolver substâncias como óleo e graxa na região de inspeção;
- v. Revelador: Produto com a propriedade de absorver o líquido penetrante que se alojou na descontinuidade, revelando-a através de um fundo de contraste.

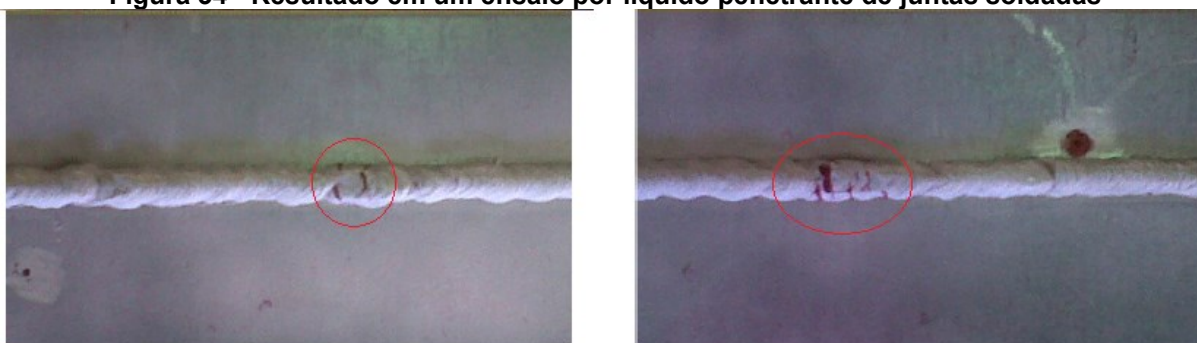
De acordo com Andreucci (2014), o método baseia-se em seis etapas principais. Primeiramente acontece a limpeza da superfície, onde não devem existir água, óleo ou outro contaminante. É indicado a utilização do removedor do mesmo fabricante dos produtos penetrantes, e o uso de desengraxamento por vapor para remoção de óleo ou graxa. Os processos de lixamento e jateamento devem ser evitados pois podem bloquear as aberturas das superfícies e impedir a penetração do produto.

Em seguida, aplica-se um líquido chamado de penetrante, geralmente de cor avermelhada, formando um filme sobre a superfície, onde um evento de capilaridade acontece, fazendo com que o mesmo penetre na descontinuidade (ANDREUCCI, 2014).

Após um certo tempo de aplicação do líquido, faz-se a remoção do excesso de penetrante da superfície. Essa remoção acontece com a utilização de panos secos ou umedecidos em solvente, tomando cuidado para que não seja aplicado em excesso para não retirar o líquido penetrante das descontinuidades. Quando o tipo de penetrante é lavável em água, um jato de água é satisfatório (ANDREUCCI, 2014).

Na sequência, acontece a aplicação de um filme uniforme de revelador sobre a superfície, sendo usualmente um pó branco. Este, age absorvendo o penetrante das descontinuidades e revelando-as, conforme indicado na figura 34.

Figura 34 - Resultado em um ensaio por líquido penetrante de juntas soldadas

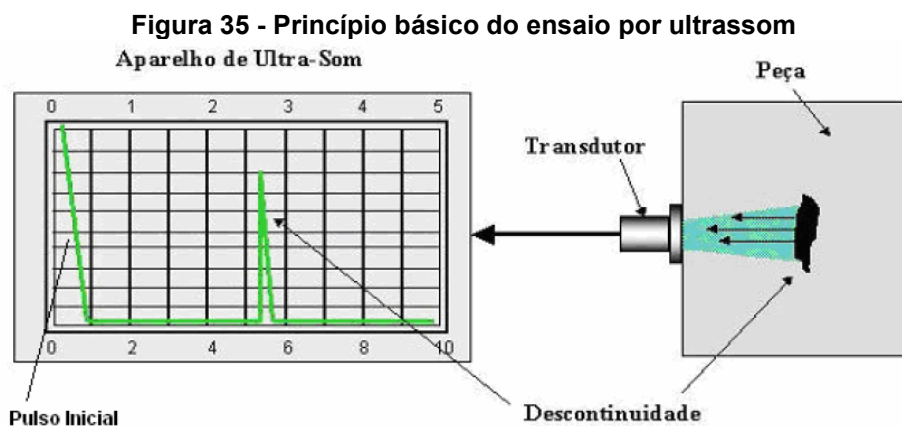


Fonte: Andreucci (2014)

Ainda conforme Andreucci (2014), após o processo de aplicação do revelador, as indicações começam a ser observadas, por meio das manchas causadas pela absorção do penetrante contido nas aberturas. Tal inspeção deve ser feita sob boas condições de luminosidade, conforme o tipo de penetrante. Por fim, a última etapa consiste na limpeza de todos os resíduos de produtos que possam prejudicar uma etapa posterior de trabalho da peça.

2.6.3 Inspeção por ultrassom

O ensaio por ultrassom tem por objetivo a detecção de defeitos ou descontinuidades internas, presentes em diversos tipos de formas e materiais ferrosos ou não ferrosos. A inspeção baseia-se na introdução de feixes de ondas sonoras de alta frequência em materiais, com intuito de detecção de descontinuidades internas no material. As ondas sonoras viajam através do material, com perdas de energia e são refletidas em interfaces, conforme observado na figura 35. Então, são analisadas para definir a presença e a localização das descontinuidades (SAMPAIO, 2009).



Fonte: Sampaio (2009)

O aparelho de ultrassom funciona como uma ferramenta capaz de visualizar um sinal elétrico na forma de um gráfico. Ele deve ser capaz de aferir o tempo de percurso do som na peça ensaiada através da relação apresentada na equação 7, onde o espaço percorrido (S) é proporcional ao tempo (T) e a velocidade de propagação (V) no material (ANDREUCCI, 2014).

$$S = V * T \quad [7]$$

Onde:

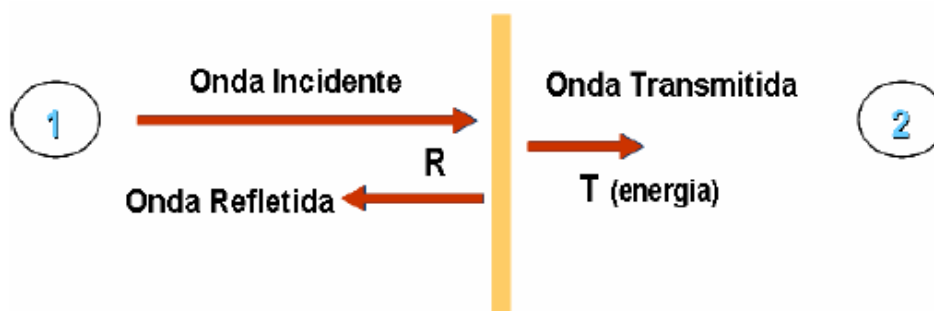
S = espaço percorrido [m]

V = velocidade de propagação [m/s]

T = tempo [s]

As ondas ultrassônicas são introduzidas no material por um emissor que vibra com uma certa frequência. Este emissor recebe o nome de transdutor ou cabeçote. No acoplamento do transdutor à superfície da peça, cria-se uma camada de ar que impede as vibrações mecânicas de se propagarem do transdutor para a peça, em razão das diferenças de impedâncias acústicas dos materiais, assim como representado na figura 36 ANDREUCCI, 2014).

Figura 36 - Interpretação da diferença de impedância acústica



Fonte: Andreucci (2014)

Por esta razão, deve-se utilizar um acoplante, localizado entre transdutor e a superfície da peça durante o contato dos dois. Sua função é justamente reduzir essa diferença de impedância acústica. Estes, são escolhidos conforme o acabamento superficial da peça e condições técnicas (ANDREUCCI, 2014).

O funcionamento dos transdutores é baseado no efeito de cristais piezelétricos. Este, por sua vez, pode transformar energia elétrica alternada

em oscilação mecânica e transformar a energia mecânica em elétrica (ANDREUCCI, 2014).

Ainda de acordo com Andreucci (2014), os sinais captados pelos cristais são mostrados na tela do aparelho de ultrassom em forma de pulsos luminosos denominados “ecos”. Existem três formas pelas quais a seção da peça inspecionada pode ser apresentada:

→ A-scan

A apresentação da tela neste tipo mostra os ecos de reflexão, o que seria a forma mais tradicional de visualização, conforme apresentado na figura 37.

Figura 37 - Representação de uma imagem em A-scan

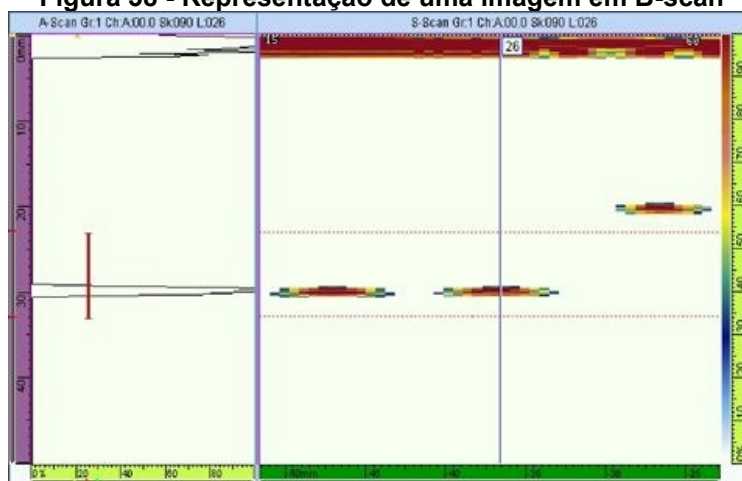


Fonte: Olympus (2022)

→ B-scan

A tela do aparelho mostra a seção transversal da peça, portanto a sua visualização é feita em cortes, conforme apresentado na figura 38. Este tipo de representação é muito útil para análise de corrosão, pois o perfil da espessura é visto diretamente.

Figura 38 - Representação de uma imagem em B-scan

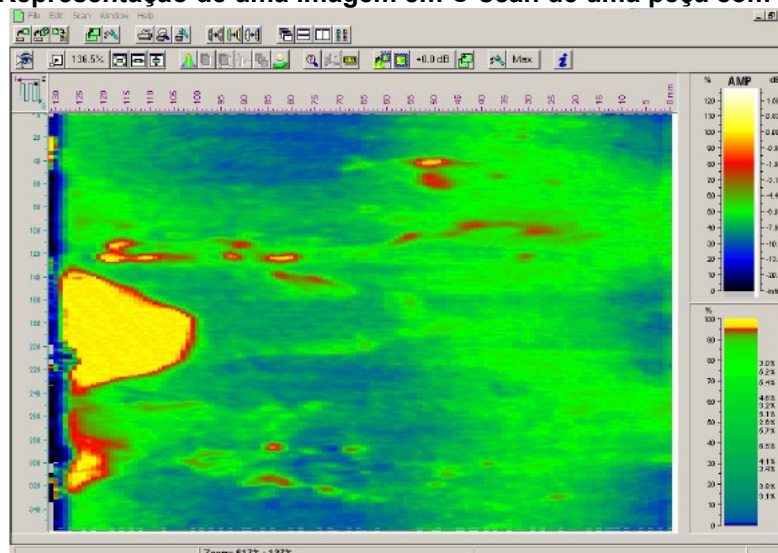


Fonte: Olympus (2022)

→ C-scan

Neste tipo de representação, a imagem mostra a vista de cima da peça, no sentido “planta”. Na figura 39, é possível observar um exemplo de uma imagem em C-scan de uma peça com revestimento. Percebe-se nas áreas em amarelo, a indicação da total falta de aderência do material de revestimento.

Figura 39 - Representação de uma imagem em C-scan de uma peça com revestimento



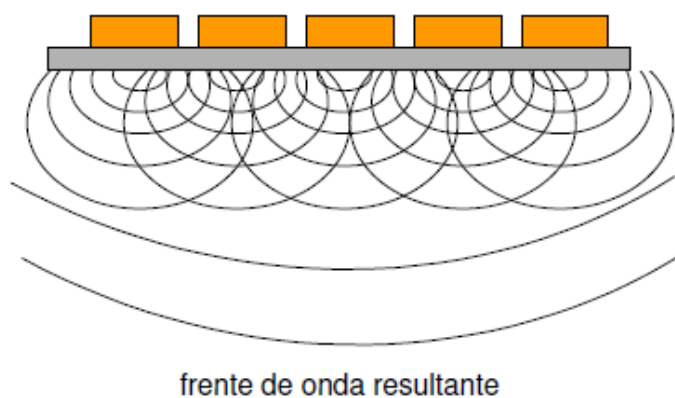
Fonte: Andreucci (2014)

Os cristais piezelétricos são montados em uma base de suporte e junto com eletrodos, constituem os transdutores. Estes geram ondas mecânicas de frequência na faixa de 1 a 25 MHz. Existem diversos métodos usuais de para realização de inspeção por ultrassom, sendo os mais recentes os métodos: phased array e TOFD (ANDREUCCI, 2014).

2.6.3.1 Método de inspeção por ultrassom *phased array*

Ainda conforme Andreucci (2014), o transdutor *phased array* opera com dezenas de pequenos cristais, cada um ligado a circuitos independentes capazes de controlar o tempo de excitação independentemente um dos outros. Como pode ser observado na figura 40, o aparelho de ultrassom executa a excitação dos cristais todos ao mesmo tempo, ou seja, todos operando em uma mesma fase, onde o resultado é uma onda perpendicular à superfície.

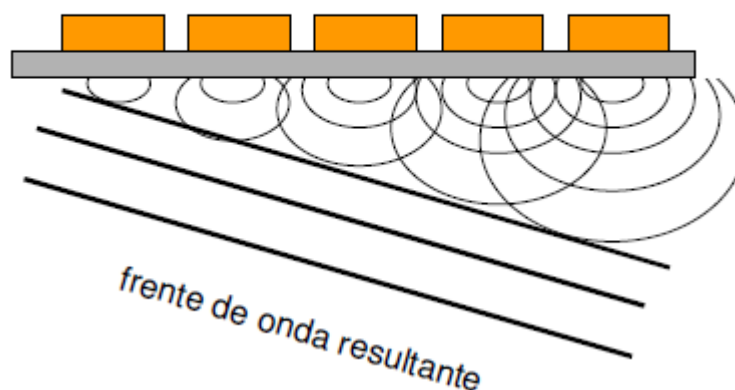
Figura 40 - Conjunto de cristais operando em fase
cristais com sinal em fase



Fonte: Andreucci (2014)

Quando o aparelho de ultrassom executa a excitação de uma forma defasada, o resultado é uma frente de onda angular à superfície, conforme ilustrado na figura 41. Por consequência do modo operante deste transdutor, fica possível em uma única varredura inspecionar o material com vários ângulos de refração diferentes (ANDREUCCI, 2014).

Figura 41 - Conjunto de cristais operando defasados
cristais com sinal defasado no tempo

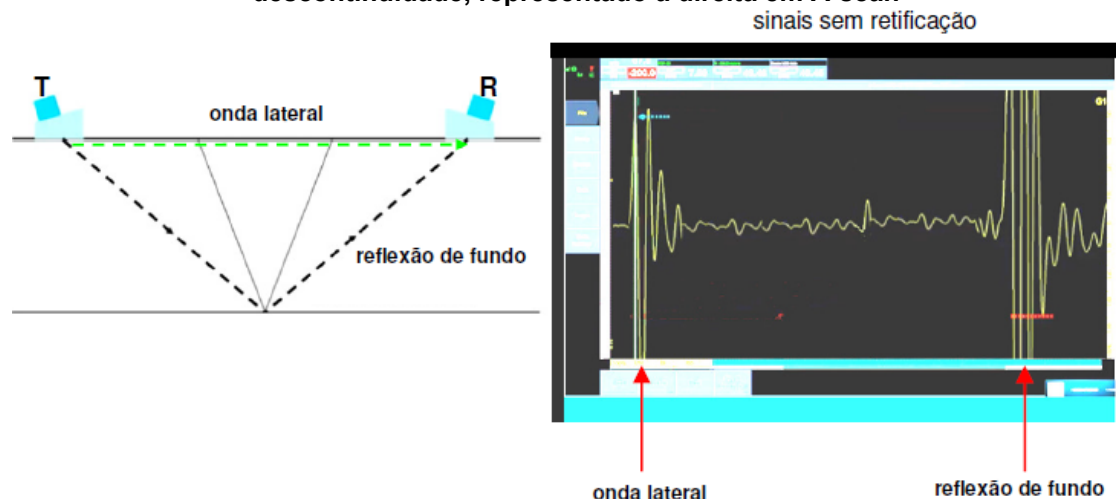


Fonte: Andreucci (2014)

2.6.3.2 Método de inspeção por ultrassom TOFD

O método *time of flight diffraction* (TOFD) é um método avançado de inspeção ultrassônica, capaz de detectar e delimitar o tamanho das indicações. Neste método, o dimensionamento das descontinuidades é baseado na medição do sinal de chegada, capaz de prover impressões digitais reproduzíveis. A técnica utiliza dois transdutores simétricos, sendo um funcionando como transmissor e o outro receptor. A percepção de profundidade da trinca acontece conforme o intervalo de tempo decorrido entre a saída do pulso do cabeçote transmissor e a sua chegada até o receptor, como representado na figura 42 (SAMPAIO, 2009).

Figura 42 - Exemplo de leitura do método de inspeção TOFD em um cordão de solda sem descontinuidade, representado a direita em A-scan

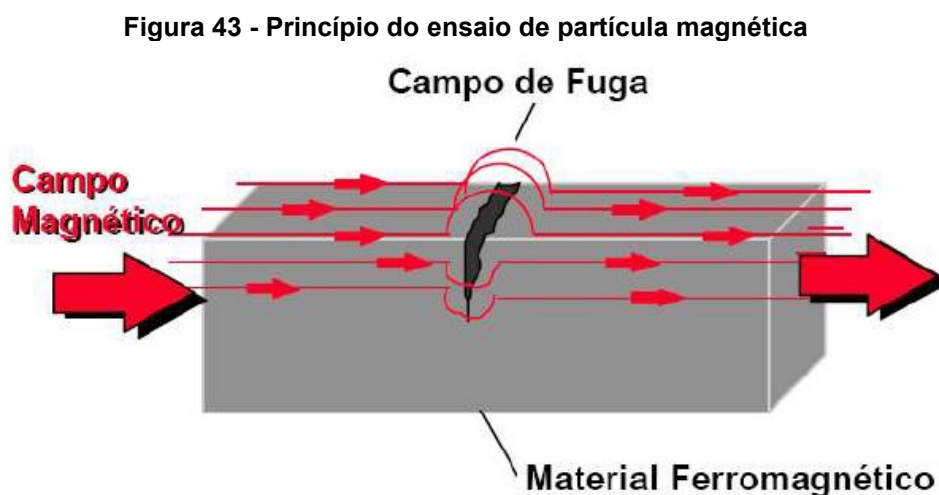


Fonte: Andreucci (2014)

2.6.4 Inspeção por partícula magnética

O exame de partícula magnética é um teste não destrutivo capaz de detectar descontinuidades que estão levemente abaixo da superfície do material ou ainda, defeitos de abertura que não são visíveis a olho nu. O método é limitado a matérias ferro magnéticos (SINGH,2012).

O seu funcionamento baseia-se na magnetização da peça ou material, cria-se um campo magnético homogêneo. As linhas de fluxo magnético criadas através desse campo, são distorcidas quando encontram com uma descontinuidade, geralmente em uma direção transversal a do campo magnético (SAMPAIO, 2009).



A figura 43 ilustra o campo de fuga, o que seria a distorção nas linhas de fluxo magnético, causada pela descontinuidade presente na peça. Sua visualização é possível através da utilização de partículas ferromagnéticas aplicadas na forma de pó ou pasta sobre a superfície. Estas, por sua vez, ficam aglomeradas e mantidas na região de campo de fuga. Esta aglomeração indica a localização, tamanho e forma da descontinuidade (SAMPAIO, 2009).

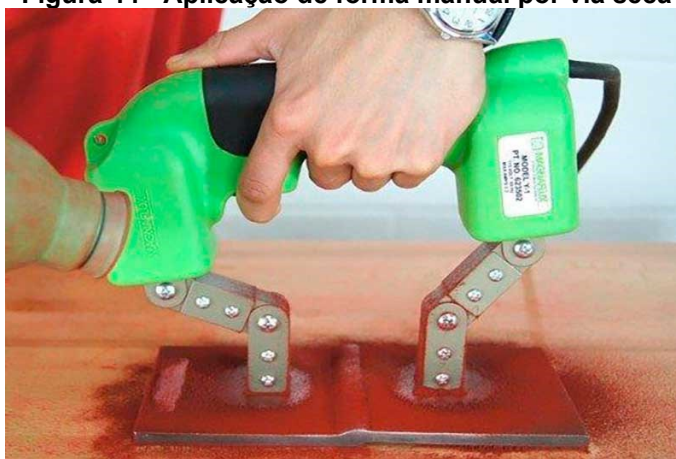
As partículas magnéticas são compostas de um pó ferromagnético, com dimensões, densidades e cores adequados ao exame. As mesmas são disponibilizadas na forma de pó, pasta ou dispersa em líquido (ANDREUCCI, 2009).

- Via seca:

Na aplicação por via seca, os aplicadores de pó utilizados manualmente ou através de bombas aspersoras, sendo a sua via de condução o próprio ar. A

conservação dessas partículas deve ser em lugares secos. É de grande importância que a granulometria seja adequada desse pó, afim de que seja aplicada uniformemente sobre a região a ser inspecionada. A figura 44 mostra um exemplo de aplicação de forma manual (ANDREUCCI, 2009).

Figura 44 - Aplicação de forma manual por via seca



Fonte: Metaltec (2022)

Em relação ao método de aplicação por via úmida, a utilização de partículas via seca é mais sensível na identificação de descontinuidade próximas à superfície, contudo é menos eficaz para detecção de descontinuidades pequenas. Além disso, é possível a reutilização dessas partículas, caso o local permita e que não estejam contaminadas (ANDREUCCI, 2009).

- Via úmida:

Na aplicação por via úmida, as partículas ferromagnéticas situam-se dispersas em um líquido, podendo ser água, querosene ou óleo. A granulometria das partículas é muito fina, sendo possível a identificação de descontinuidades pequenas, como trincas de fadiga. Neste método a dispersão é maior do que a aplicação por via seca. Os aplicadores podem ser manuais do tipo borrifadores, ou na forma de chuveiros, para o caso de máquinas estacionárias. A figura 45 apresenta um exemplo de aplicação das partículas magnéticas por via úmida (ANDREUCCI, 2009).

Figura 45 - Aplicação de forma manual por via úmida



Fonte: Metaltec (2022)

Afim de garantir uma homogeneidade das partículas para aplicação na região a ser ensaiada, o método por via úmida demanda uma agitação constante da mistura. A concentração para preparação da mistura é estabelecida por norma (ANDREUCCI, 2009).

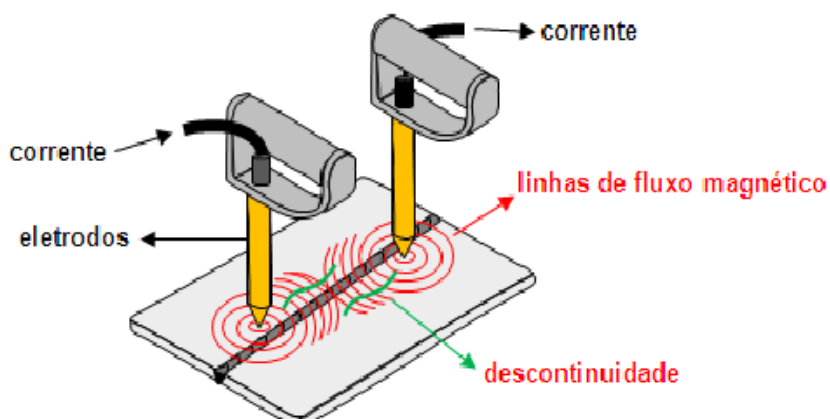
É importante a utilização de uma corrente elétrica adequada. Uma corrente pequena, produz um campo magnético que pode não ser capaz de identificar todas as possíveis descontinuidades. Já uma corrente muito elevada, produz um campo magnético muito forte, que pode mascarar as pequenas falhas. Por isso, a intensidade da corrente elétrica deve ser estabelecida por norma e especificações, afim de que se produza um teste mais refinado (SINGH,2012).

De acordo com a seção 5 da norma ASME (2019), algumas das técnicas de magnetização a serem utilizadas são: magnetização por eletrodos, magnetização circular e magnetização por yoke.

2.6.4.1 Técnica de magnetização por eletrodos

A técnica de magnetização por eletrodos consiste na geração de um campo magnético circular estabelecido pelo contato de eletrodos elétricos pressionados na área da superfície a ser examinada (World of NDT, 2021), como ilustrado na figura 46.

Figura 46 - Técnica de ensaio com magnetização por eletrodos



Fonte: Sancovicei (2019)

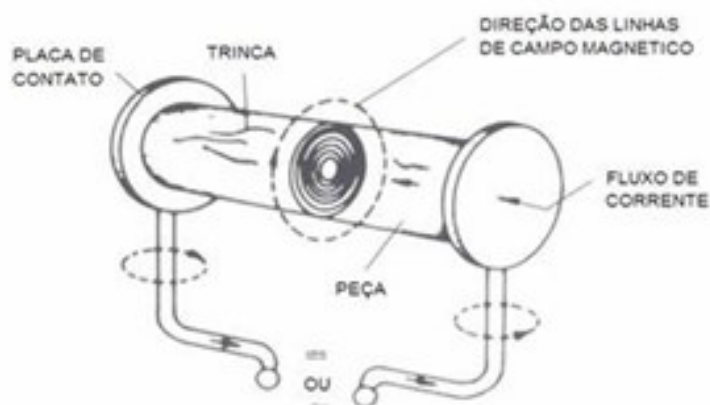
O aquecimento da peça nos locais de contato com os eletrodos deve ser minimizado, já que este pode provocar queimaduras na superfície da peça, contaminação do material e micro trincas. Pode ser utilizado tanto corrente contínua, quanto corrente alternada, com variação de 1500 a 6000 amperes (SERV-END, 2020).

2.6.4.2 Técnica de magnetização circular

Existem duas formas distintas para aplicação desta técnica. A primeira seria a aplicação por contato direto, o qual baseia-se na aplicação de corrente elétrica (alternada ou contínua) através de duas placas de contato de máquinas estacionárias, gerando assim um campo circular o qual é perpendicular a direção do campo magnético formado (SERV-END, 2020), conforme ilustrado na figura 47.

O equipamento estacionário horizontal é mais comumente utilizado, conforme ilustrado na figura 48, e a corrente de magnetização pode variar de 1500 a 4000 amperes, sendo aplicável o teste em peças de pequeno e médio porte (SERV-END, 2020).

Figura 47 - Técnica de ensaio por magnetização circular direta



Fonte: SERV-END (2020)

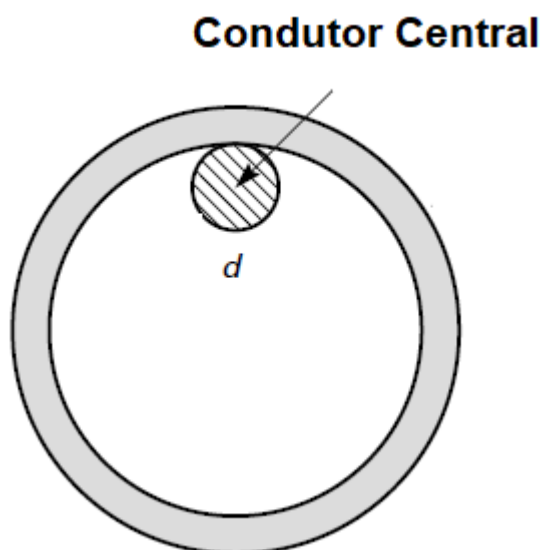
Figura 48 - Equipamento estacionário horizontal para utilizado para aplicação da técnica de ensaio por magnetização circular direta



Fonte: SERV-END (2020)

A segunda aplicação da técnica de magnetização circular é através da utilização de um condutor central. Este é utilizado para analisar a superfície interna de componentes cilíndricos, também podendo ser utilizada para examinar a superfície externa. O condutor central é posicionado perto da superfície interna do cilindro e não centralizado. Assim, a circunferência do cilindro é examinada por partes, conforme ilustrado na figura 49.

Figura 49 - Posicionamento na técnica de magnetização circular por condutor central



Fonte: ASME: Seção V (2019) – adaptado

2.6.4.3 Técnica de magnetização yoke

Esta técnica utiliza-se um aparelho denominado yoke, que contém em seu interior uma bobina e gera um campo magnético longitudinal entre suas “pernas”, quando em contato com a peça, como ilustrado pela figura 50. Este pode trabalhar com corrente alternada ou contínua. O yoke é deslocado etapa por etapa pelo cordão de solda, mudando a direção de aplicação em 90° para que seja possível a detecção de descontinuidades transversais e longitudinais em relação a solda. Não há aquecimento nos pontos de contato (SERV-END, 2020).

Figura 50 - Representação de um aparelho yoke



Fonte: SERV-END (2020)

2.6.4.4 Desmagnetização

O processo de desmagnetização acontece devido às propriedades magnéticas de alguns materiais, capazes de reter magnetismo mesmo após a interrupção da força magnetizante. Esse magnetismo residual pode causar interferências de usinagem, soldagem ou de medição. A interferência nos processos de usinagem pode causar a magnetização das ferramentas de corte, provocando a retenção de limalhas, afetando o acabamento da peça (ANDREUCCI, 2009).

A interferência nos processos de soldagem pode causar a deflexão do arco elétrico, redirecionando o mesmo da região de solda, prejudicando a qualidade da solda. Por fim, a interferência com os instrumentos de medição acontece com a obstrução da leitura obtida pelo mesmo, já que muitas das vezes esses equipamentos apresentam uma sensibilidade maior (ANDREUCCI, 2009).

Uma forma de desmagnetização acontece quando as peças são submetidas a campos magnéticos alternados e decrescentes, geralmente com a utilização de bobinas magnetizadas. Além disso, quando a peça passa por um tratamento térmico, ela é elevada a uma certa temperatura capaz de remover o magnetismo residual da mesma (ANDREUCCI, 2009).

2.7 Caldeiras

Nome popular dado aos equipamentos geradores de vapor, as caldeiras possuem ampla aplicação no meio industrial e também na geração de energia elétrica. As caldeiras operam com pressões acima da pressão atmosférica, sendo até 20 vezes maior nas aplicações industriais e de 60 a 100 vezes maior nas aplicações de produção de energia elétrica (ALTAFINI, 2002)

De acordo com a NR-13, as caldeiras são destinadas a produzir e acumular vapor sob pressão superior à atmosférica, utilizando de qualquer fonte de energia, executando refeedores e similares, projetados conforme códigos pertinentes. Além disso, as caldeiras podem ser classificadas em duas categorias, A e B:

- Categoria A: são aquelas cuja pressão de operação é igual ou superior à 1960 kPa, com volume superior à 100 litros;

- Categoria B: são aquelas cuja pressão de operação deve é maior que 60 kPa e inferior a 1960 kPa e seu volume interno é superior a 100 litros e o produto entre a pressão de operação em kPa e o volume interno em m³ seja superior a 6.

Segundo Altafini (2002), existem diversos tipos de caldeiras, as quais podem ser classificadas segundo diversos critérios. De uma forma mais genérica, as caldeiras se classificam em flamotubulares e aquatubulares.

2.7.1 Caldeiras flamotubulares

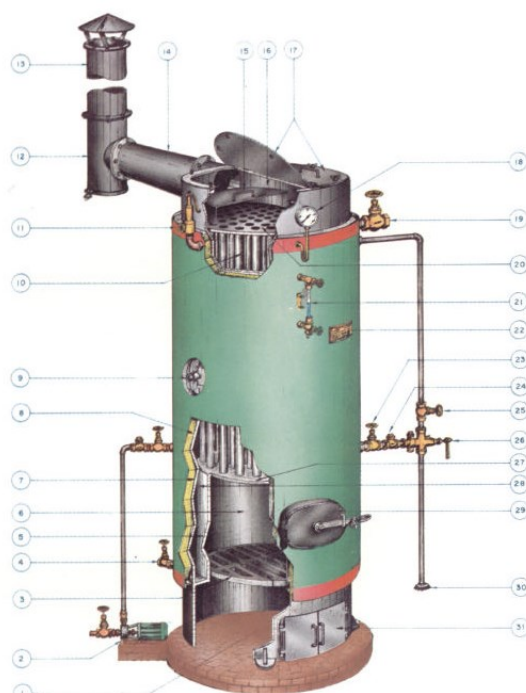
São aquelas em que os gases quentes da combustão passam por dentro dos tubos, os quais são circundados pela água. Feitas para operarem em pressões limitadas, uma vez que o vaso submetido à pressão é relativamente grande, inviabilizando a utilização de chapas de espessuras maiores (GYURKOVITS, 2004).

Existem várias formas de classificação para caldeiras flamotubulares, que pode ser de acordo com o seu uso, sua capacidade, sua pressão, a posição dos tubos, entre outros. Uma destas formas consiste em dividi-las em verticais e horizontais (MARTINELLI JR, 2002).

→ Caldeiras flamotubulares verticais

Conforme Martinelli Jr (2002), as caldeiras flamotubulares verticais são do tipo monobloco, conforme ilustrada na figura 51, compostas por um corpo cilíndrico fechado nas extremidades por placas planas (espelhos). Por apresentarem tamanhos menores e ocuparem um pequeno espaço, são facilmente transportadas, exigindo pequenas fundações. São construídas de 2 a 30 m² e possuem capacidade de produzirem de 15 a 16 Kg de vapor por m² de superfície de aquecimento.

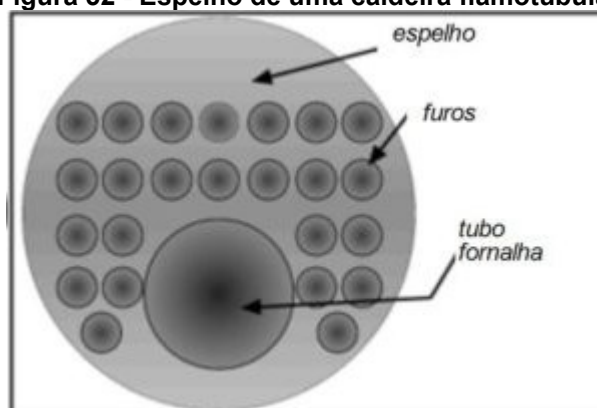
Figura 51 - Caldeira flamotubular vertical



Fonte: Martinelli Jr (2002)

Nas caldeiras flamotubulares, a fornalha e os tubos ficam circundados de água e são ancorados nos espelhos, discos externos, por processo de soldagem ou mandrilhamento. Os espelhos, conforme ilustrado na figura 52, estão submetidos à pressão interna do vapor e os tubos e fornalha estão submetidos à pressão externa (ALTAFINI, 2002).

Figura 52 - Espelho de uma caldeira flamotubular



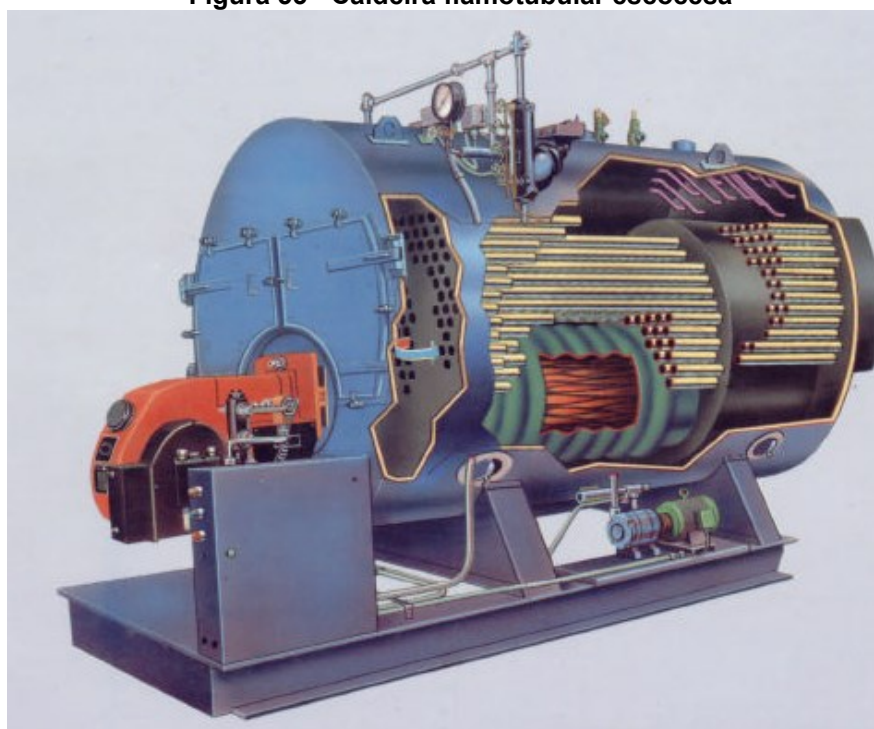
Fonte: Togawa (2017)

→ Caldeiras flamotubulares horizontais

As caldeiras flamotubulares horizontais podem ser divididas em diversos tipos. O mais comum entre elas, são as caldeiras escocesas, conforme figura 53. Este tipo de caldeira conta com um corpo cilíndrico que contém um tubulão sobre o qual

encontra-se um conjunto de tubos de pequenos diâmetros. Possui uma câmara de combustão feita de tijolos refratários em sua parte posterior, que recebe os gases produtos da combustão e os conduz para o espelho traseiro. Além disso, possui máxima produção de 10 toneladas por hora, podendo alcançar um elevado rendimento térmico de 83% e sua vaporização específica atinge valores da ordem de 30 a 40 Kg de vapor por m² (MARTINELLI JR, 2002).

Figura 53 - Caldeira flamotubular escocesa



Fonte: Martinelli Jr (2002)

2.7.2 Caldeiras aquatubulares

As caldeiras aquatubulares são caracterizadas pela circulação externa dos gases de combustão, onde os tubos conduzem massa de água e vapor. Sendo assim, o volume de água é distribuído por um grande número de tubos os quais são submetidos, externamente, ao contato com os gases de combustão. Afim de garantir uma maior eficiência da circulação da água em ebulição, os tubos podem apresentar formatos retos ou curvados (ALTAFINI, 2002).

São empregadas quando há o interesse em se obter elevadas pressões e altos rendimentos. Isto é possível graças aos esforços de tração desenvolvidos nos tubos ao invés de compressão, como acontece nas caldeiras flamotubulares, além do

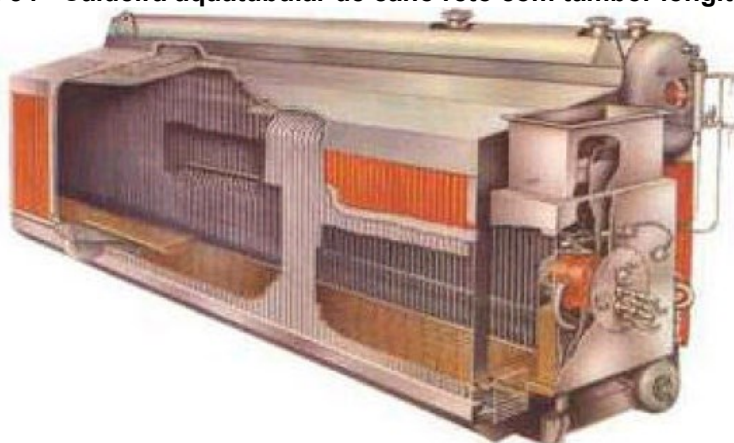
aumento das superfícies de aquecimento, devido ao fato de os tubos estarem fora do corpo da caldeira (MARTINELLI JR, 2002).

Ainda conforme Martinelli Jr (2002), as caldeiras aquatubulares podem ser classificadas em: caldeiras de tubos retos e caldeiras de tubos curvos

→ Caldeiras de tubos retos

Podem possuir tambor transversal ou longitudinal, apresentando várias vantagens como fácil manutenção, devido à sua facilidade de acesso aos tubos, pequenas perdas de carga, além da baixa necessidade de formas especiais já que os tubos principais são todos iguais. A figura 54 mostra um exemplo de caldeira aquatubular de tubos retos com tambor longitudinal (MARTINELLI JR, 2002).

Figura 54 - Caldeira aquatubular de cano reto com tambor longitudinal



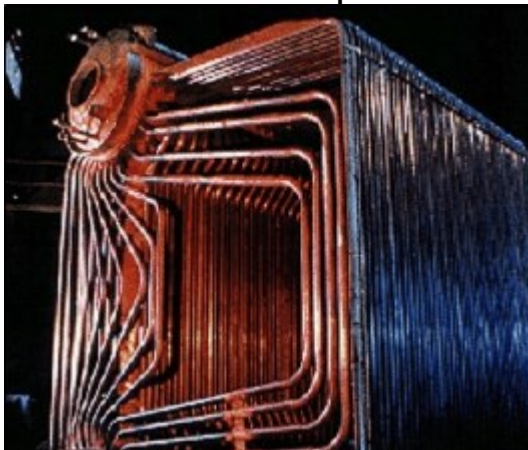
Fonte: Martinelli Jr (2002)

A superfície de contato dessas caldeiras pode variar de 67 a 1350 m², com pressões de até 45 Kgf/m² e vaporização específica da ordem de 20 a 25 Kg de vapor por m² (MARTINELLI JR, 2002).

→ Caldeiras de tubos curvos

Para casos de necessidade de grandes capacidades de produção, as caldeiras aquatubulares de tubos curvos são a solução, sendo o tipo que atinge maiores valores de vaporização específica com valores de 28 a 30 Kg de vapor por m² em instalações normais e até 50 Kg de vapor por m² para caldeiras de tiragem forçada. No entanto exige-se um controle especial da água de alimentação, o que pode provocar uma certa recusa comercial, a figura 55 é representa o interior de uma caldeira aquatubular de tubos curvos (MARTINELLI JR, 2002).

Figura 55 - Interior de uma caldeira aquatubular de tubos curvos



Fonte: Brunhara (2020)

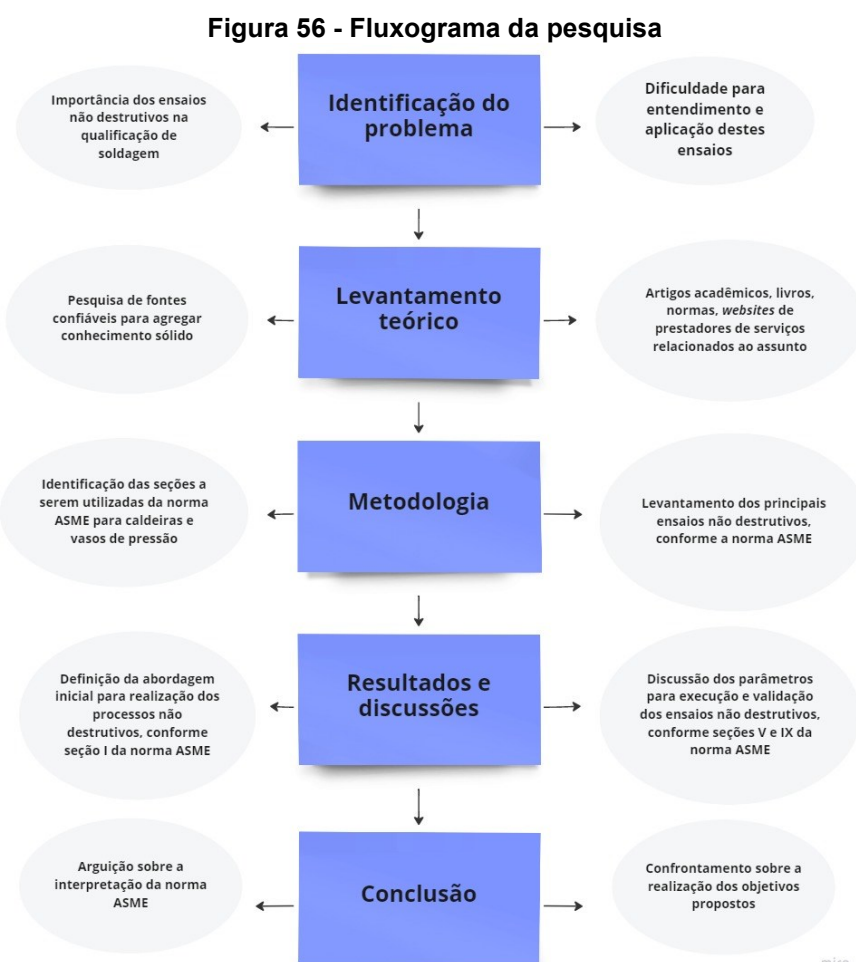
A tiragem é o processo que retira os gases queimados e possibilita a entrada de nova quantidade de ar e combustível, processo esse que acontece através da diferenciação de pressão na fornalha. A tiragem natural acontece quando estes gases saem unicamente pela aspiração da chaminé. A tiragem forçada acontece com a utilização de ventiladores para remover os gases queimados (ALTAFINI, 2002).

3 METODOLOGIA (MATERIAIS E MÉTODOS)

O conhecimento teórico e o levantamento de dados para uma pesquisa, devem ser fundamentados objetivamente ao assunto relacionado ao problema inicial. Estudos de caráter qualitativo são ricos em informações técnicas e apresentam um plano aberto e flexível, focando a realidade de forma complexa e contextualizada (LUDKE; ANDRÉ, 1986).

Estudos qualitativos apresentam a análise documental como uma importante ferramenta, capaz de adquirir dados com base em informações em documentos como livros, regulamentos, jornais e outros. As informações coletadas são em sua maioria descritivas. Sendo este material de pesquisa, rico em descrições de pessoas, situações ou acontecimentos (LUDKE; ANDRÉ, 1986).

A figura 56 mostra o fluxograma da pesquisa.



Fonte: Autor (2022)

Para a presente pesquisa, primeiro foi realizado um levantamento teórico sobre os componentes presente na soldagem de uma forma geral, como técnicas diferentes de soldagem, propriedades da metalurgia da soldagem, um breve levantamento sobre as caldeiras e os principais defeitos de solda presentes em caldeiras e vasos de pressão. Para esta primeira etapa da pesquisa, serão coletados dados de normas, livros, artigos acadêmicos e *websites*, na maioria, de empresas que prestam esse serviço de qualificação de soldagem.

Na sequência, será realizado um levantamento sobre as normas regulamentadoras vigentes no nosso país, assim como os devidos cursos de qualificação para aprimoramento profissional e autoridade para elaborar e aprovar procedimentos de qualidade da soldagem para caldeiras e vasos de pressão.

Por fim, para elaboração dos procedimentos a serem seguidos, os dados a serem coletados serão, em grande parte, da norma *ASME* de 2019 para caldeiras e vasos de pressão, mais especificamente as seções I, V e IX. Também serão utilizados artigos técnicos de profissionais da área de qualificação de soldagem. Mais especificamente, serão abordados quatro ensaios não destrutivos para soldas de caldeiras e vasos de pressão, sendo estes: ensaio por inspeção visual, ensaio por líquido penetrante, ensaio por partículas magnéticas e ensaio por ultrassom.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Conforme o artigo 1 da seção V da norma ASME (2019), para a realização dos exames não destrutivos, os procedimentos escritos devem ser disponibilizados ao inspetor quando requisitado. Ao menos, uma cópia de cada procedimento deve estar prontamente disponível para consulta e utilização.

Ainda de acordo com o artigo previamente citado, quando a qualificação do procedimento escrito for requisitada, uma demonstração da qualificação deve ser realizada afim de que os exames de produção sejam aceitos. A demonstração de qualificação deve ser desempenhada por um soldador, o qual deve ser qualificado e certificado para a realização do método, o qual deve ser presenciada e avaliada por um inspetor de nível 2.

O procedimento é considerado qualificado quando, tanto o soldador quanto o inspetor, estiverem satisfeitos pelos indicadores produzidos pela demonstração do procedimento. Indicadores estes que devem revelar o tamanho, a localização, a orientação, a quantidade e a caracterização das falhas presentes no exame do corpo de prova, caso existam.

No geral, os registros dos procedimentos não destrutivos devem conter no mínimo as seguintes informações:

- a) Data de realização do procedimento;
- b) Identificação e nível de certificação dos responsáveis pela realização do procedimento;
- c) Identificação da solda, o componente examinado e um número de série ou algum outro identificador;
- d) Método utilizado para realização do exame;
- e) Resultados.

4.1 Ensaio por inspeção visual

A inspeção visual é o primeiro ensaio a ser realizado por ser o mais simples e prático, já na maioria dos casos, não é necessário equipamento, apenas uma boa visão do inspetor. Salvo em apenas em alguns casos, onde equipamentos são necessários para se alcançar regiões de difícil acesso para o inspetor.

As recomendações do procedimento de inspeção visual são baseadas no artigo 9 da seção 5 da norma ASME (2019). O registro da inspeção visual deve conter as seguintes informações:

- a) Data da inspeção;
- b) Identificação e revisão do procedimento utilizados;
- c) Técnica utilizada;
- d) Resultados da inspeção;
- e) Identificação e nível de qualificação do inspetor;
- f) Identificação do componente examinado.

O quadro 7 identifica as variáveis essenciais e não essenciais para aplicação do exame visual. Qualquer alteração em uma variável considerada essencial, requer a requalificação do procedimento registrado, através de uma demonstração.

Quadro 7 - Requerimentos para aplicação do exame visual

Requerimento	Variável Essencial	Variável não essencial
Alteração na técnica utilizada		
Alteração direta de ou para translúcido	x	
Auxílio visual remoto	x	
Requerimentos de performance pessoal		x
Concentração de emulsificadores hidrofílicos ou lipofílicos e o seu tempo de atuação em tanques de imersão e o tempo de agitação para emulsificadores hidrofílicos	x	
Intensidade de iluminação (somente redução)	x	
Formas dos produtos do material base e as configurações a serem examinadas		x
Equipamento de iluminação		x
Métodos ou ferramentas utilizados para preparação da superfície		x
Equipamentos ou dispositivos utilizados para uma técnica direta		x
Sequência de exames		x
Requisitos de qualificação pessoal		x

Fonte: ASME: Seção V, artigo 9 (2019)

O procedimento deve conter ou referenciar um registro do que foi utilizado afim de demonstrar que o procedimento de inspeção foi adequado. No geral, uma fina linha de 0,8 mm ou menos de largura localizada na superfície ou em uma superfície similar a ser examinada, pode ser considerada um método de demonstração do procedimento.

Sobre a qualificação do da pessoa a realizar o exame, este pode ter uma certificação para cada produto ou vários produtos, dependendo da sua área de atuação na empresa. Além disso, pelo menos uma vez ao ano esta pessoa deve realizar um exame de vista para garantir a precisão para a vista de perto.

Conforme o artigo 9 da seção 5 da norma ASME (2019), as técnicas utilizadas para aplicação do ensaio visual são três: inspeção visual direta, inspeção visual remota e inspeção visual translúcida.

4.1.1 Inspeção visual direta

A inspeção visual direta usualmente é utilizada quando o acesso aos olhos é de pelo menos 600 mm da superfície a ser examinada, a um ângulo maior ou igual que 30° em relação à superfície a ser examinada, conforme exemplo da figura 57. Espelhos podem ser utilizados para aumentar o ângulo de visão, assim como de lentes de ampliação.

Figura 57 - Inspeção visual direta em um espelho de uma caldeira



Fonte: Montagens industriais ALD (2020)

A iluminação (natural ou suplementar de luz branca) para a inspeção da superfície é obrigatória para a peça ou seção específica. A intensidade de luz mínima deve ser de 1076 lux. Esta intensidade deve ser mensurada antes da inspeção,

através de um medidor de luz branca. Essa mensuração deve ser demonstrada uma única vez e devidamente registrada.

4.1.2 Inspeção visual remota

Em casos nos quais a área a ser examinada é inacessível para a inspeção visual direta, a inspeção visual remota é utilizada, conforme ilustrado na figura 58. Esta, consiste em uma técnica que utiliza de um acessório para auxílio visual, como espelhos, fibroscópios, boróscopios, fibras óticas, câmeras e outros instrumentos. Tais aparelhos, devem apresentar uma boa resolução uma intensidade de luz equivalente ao obtido na inspeção visual direta.

Figura 58 - Inspeção visual remota com a utilização de um boroscópio



Fonte: UTMAAX (2022)

4.1.3 Inspeção visual translúcida

Essa técnica fundamenta-se na utilização de uma luz artificial. Esta luz deve ter intensidade suficiente para iluminar toda a região a ser examinada e possibilitar ver as variações translúcidas da sua espessura laminar. A luz ambiente deve ser mais fraca do que a luz artificial e adequada para que não haja brilho ou reflexo na superfície.

4.1.4 Critérios de aceitação

Na inspeção de uma seção transversal do corpo de prova a inspeção visual deve confirmar uma fusão completa do metal de adição e o metal base, livre de trincas e não deve haver uma diferença maior que 3 mm entre as extremidades dos filetes.

4.2 Ensaio por líquido penetrante

As recomendações de procedimento do ensaio por líquido penetrante têm por base o artigo 6 da seção 5 da norma ASME (2019), além das normas N-1596 e N-2370 da Petrobras.

Conforme a norma N-1596 da Petrobras, cada teste de líquido penetrante realizado deve registrar as seguintes informações:

- a) Os requerimentos gerais para realização de cada procedimento não destrutivo, conforme artigo 1 da seção V da ASME 2019;
- b) Objetivo;
- c) Normas de referência;
- d) Tipo de forma e processo de fabricação do material a ser ensaiado (por exemplo: alumínio fundido, aço carbono forjado);
- e) Materiais penetrantes: o fabricante, a marca e a família dos materiais penetrantes;
- f) Método de preparação da superfície;
- g) Modo e tempo de secagem na limpeza prévia da superfície;
- h) Modo de aplicação do líquido penetrante e tempo de permanência;
- i) Faixa de temperatura permissível para a superfície de ensaio e para o líquido penetrante;
- j) Modo de remoção do excesso de líquido penetrante;
- k) Modo e tempo de secagem, antes da aplicação do revelador;
- l) Modo e tempo máximo de aplicação do revelador;
- m) Aplicação da limpeza final;
- n) Sistemática de registro de resultados (localização de indicações);
- o) Relatório de registro de resultados.

Conforme a seção V da norma ASME (2019), os requerimentos contemplados previamente conforme a norma N-1596 da Petrobras, são

representados, através de variáveis essenciais, no quadro 8. Qualquer alteração em uma variável considerada essencial, resulta em uma requalificação do procedimento.

Quadro 8 - Requerimentos para aplicação do procedimento de líquido penetrante

Requerimento	Variável Essencial	Variável não essencial
Identificação de qualquer mudança no tipo ou grupo de família dos materiais penetrantes	x	
Preparação da superfície	x	
Método de aplicação do penetrante	x	
Método de remoção do excesso de penetrante da superfície	x	
Concentração de emulsificadores hidrofílicos ou lipofílicos e o seu tempo de atuação em tanques de imersão e o tempo de agitação para emulsificadores hidrofílicos	x	
Concentração de emulsificadores hidrofílicos em aplicações em spray	x	
Método de aplicação do revelador	x	
Períodos de tempos máximos e mínimos entre os passes e a secagem	x	
Redução no tempo de atuação da penetração	x	
Aumento no tempo de atuação do revelador	x	
Mínimo de intensidade de luz	x	
Faixa de temperatura de superfície externa entre 5 e 52°C	x	
Requisitos de qualificação pessoal		x
Exame após aplicação da técnica de limpeza		x

Fonte: ASME: Seção V, artigo 6 (2019)

4.2.1 Preparação da superfície

Primeiramente acontece a preparação da superfície. A utilização de retificação, usinagem ou outros métodos podem ser necessários quando as irregularidades da superfície podem mascarar as indicações. A superfície examinada e a área adjacente a ela, de pelo menos 25 mm, devem estar secos e livres de qualquer tipo de sujeira, graxa, fiapos, escalas, respingos de solda, tinta, óleo e outros materiais que possam esconder as aberturas da superfície.

Usualmente, os materiais utilizados para limpeza da superfície são detergentes, solventes orgânicos, soluções de descalcificação e removedores de tinta. Métodos desengordurantes também podem ser utilizados.

Depois de limpa a superfície, a sua secagem deve acontecer de forma natural por evaporação, ou forçadamente com a utilização de ar quente. Um mínimo período de tempo deve ser estabelecido para garantir a evaporação da solução de limpeza, antes da aplicação do líquido penetrante. O padrão de temperatura durante toda a realização do procedimento deve ser na faixa de 5°C à 52°C, para o líquido penetrante e para a superfície a ser aplicada.

4.2.2 Aplicação do líquido penetrante

Para aplicação do líquido penetrante, os métodos de pincelagem, pulverização ou imersão, podem ser utilizados, como ilustra a figura 59. No entanto, quando utilizado o método de pulverização utilizando aparelhos de ar comprimido, os filtros devem ser posicionados próximos a entrada de ar, no intuito de evitar contaminação do penetrante por óleo, água, sujeira ou outros sedimentos que podem ter se acumulados nas linhas.

Figura 59 - Aplicação por líquido penetrante em espelho de caldeira flamotubular



Fonte: END Inspeções, (2010)

Sobre o tempo de permanência do líquido penetrante, os parâmetros apresentados no quadro 9 abaixo, devem ser respeitados. O tempo máximo de permanência do líquido não deve exceder duas horas. Independentemente do tempo de permanência, o líquido penetrante não deve secar. Se por ventura ele secar, o procedimento deve ser repetido, iniciando-se a partir da limpeza da superfície.

Quadro 9 - Tempo mínimo de permanência para líquidos penetrantes

Material	Forma de fabricação	Tipo de descontinuidade	Tempo de permanência do líquido penetrante (minutos)*
Alumínio, magnésio, aço, latão e bronze, titânio e ligas de alta temperatura	Fundição e soldagem	Porosidade, falta de fusão e trincas (todas as formas)	5
	Materiais forjados	Sobreposição, trincas	10
Ferramentas com ponta de carboneto	Brasagem ou soldagem	Falta de fusão, porosidade, trincas	5
Plástico	Todas	Trincas	5
Vidro	Todas	Trincas	5
Cerâmico	Todas	Trincas	5

*Valores para temperaturas na faixa de 10°C à 52°C. Para temperaturas de 5°C à 10°C, o tempo mínimo de permanência para os líquidos penetrantes deve ser o dobro dos valores listados.

Fonte: ASME: Seção V, artigo 6 (2019)

4.2.3 Remoção do excesso do líquido penetrante

Após o término do tempo de permanência especificado para o líquido penetrante, acontece a remoção do excesso de penetrante da superfície. De acordo com a seção V da norma ASME (2019), essa remoção pode acontecer de três formas distintas, dependendo do tipo de penetrante aplicado.

A primeira acontece quando o líquido penetrante é do tipo lavável com água. O excesso desse tipo de penetrante pode ser removido com pulverização de água, onde a pressão da água não deve exceder 350kPa e sua temperatura deve estar no máximo à 43°C.

Outro procedimento para remoção do excesso de líquido penetrante é quando o mesmo é do tipo pós emulsificante. Então, a remoção acontece por emulsificadores, podendo estes serem hidrofílicos ou lipofílicos. No caso de emulsificadores lipofílicos, acontece a imersão da superfície no emulsificador. O tempo de permanência vai depender do tipo de emulsificador e da condição da superfície. Em seguida a mistura deve ser removida, enxaguando a superfície com água, onde a sua pressão e temperatura devem ser recomendados pelo fabricante do produto.

Quando o emulsificador é do tipo hidrofílico, deve-se previamente lavar a superfície, pulverizando-a com uma mistura de água e emulsificador. A concentração

de emulsificador não deve ser maior do que 5%. Na sequência, realiza-se uma pulverização com água, para remover o penetrante da superfície. Todos os tempos de permanência devem ser mantidos no mínimo, e não devem exceder mais do que dois minutos.

Um último procedimento para a remoção, seria através da utilização de solventes, também indicados para penetrantes não solúveis em água. O processo acontece através da limpeza da superfície com um pano limpo sem fiapos ou um papel absorvente limpo. Os traços remanescentes na superfície, devem ser removidos com pano ou papel absorvente levemente umedecidos com solvente.

Para os processos de secagem da superfície após a remoção do excesso de líquido penetrante, são indicadas duas formas. A primeira para o caso de penetrantes do tipo lavável com água ou pós emulsificantes. Para esse caso, a superfície deve ser seca utilizando um circulador de ar, cuidando para que a temperatura da mesma não ultrapasse 52°C. No segundo caso, para a remoção do penetrante com solvente, a superfície deve ser seca naturalmente por evaporação ou com a utilização de um jato de ar.

4.2.4 Aplicação do revelador

A aplicação do revelador deve acontecer assim que acabar o processo de remoção do excedente de líquido penetrante. A camada de aplicação deve ser precisa, não podendo ser muito fina a ponto de não possuir espessura suficiente para revelar o penetrante das discontinuidades e também não ser muito espessa para mascarar o penetrante das discontinuidades.

Para penetrantes de contraste colorido, apenas reveladores líquidos devem ser utilizados. Para penetrantes fluorescentes, reveladores líquidos ou secos podem ser utilizados. Os reveladores a seco devem ser aplicados apenas em superfícies secas, com a utilização de uma escova macia ou outros meios, desde que o pó seja espalhado uniformemente sobre toda a superfície a ser examinada.

Para os reveladores líquidos, antes da aplicação deve-se agitar o revelador para garantir a dispersão de partículas suspensas. Podem ser utilizados dois tipos de reveladores líquidos para aplicação, à base de água e os não aquosos. Os reveladores aquosos podem ser aplicados tanto em superfícies molhadas quanto em superfícies secas. As formas de aplicação podem ser por imersão, pincelagem ou pulverização,

desde que um fino revestimento seja obtido em toda a superfície a ser examinada. A escovação não é permitida para aplicação deste tipo de revelador.

Os reveladores não aquosos devem ser aplicados por pulverização, ou por escovação, quando necessário. Para penetrantes laváveis com água ou do tipo pós emulsificantes, o revelador deve ser aplicado em superfícies secas. Para o caso da utilização de solventes para remoção do penetrante, o revelador deve ser aplicado o logo após o processo de remoção do excesso. Sua secagem deve acontecer naturalmente por evaporação.

Sobre o tempo de atuação para interpretação dos resultados da aplicação do revelador, deve-se ter início logo após a secagem da superfície, independentemente do tipo de revelador utilizado. Para o caso dos reveladores aquosos, um secador a base de ar pode ser utilizado para secagem da superfície, desde de que a superfície não ultrapasse a temperatura de 52°C.

4.2.5 Registro de resultados

Para o registro de resultados, depois de todos os requerimentos previamente descritos serem completados, a interpretação final deve respeitar um tempo mínimo de 10 minutos para início do procedimento e, não mais que 60 minutos.

Em relação ao penetrante de cor contrastante, o revelador forma um revestimento branco uniforme na superfície. As discontinuidades são indicadas por marcações do penetrante, o que normalmente é representado por uma cor avermelhada. A iluminação para o exame da superfície deve ter intensidade de luz de no mínimo 1076 lux. A intensidade da luz, natural ou luz branca suplementar, deve ser mensurada por um medidor de luz branca antes da avaliação dos indicadores.

Por fim, um registro dos indicadores deve ser realizado, contemplando indicadores rejeitáveis e não rejeitáveis, abordando os tipos de indicações (lineares ou arredondados), localização e sua extensão (comprimento ou diâmetro). Após a avaliação do exame e o registro da documentação, é requisitado a limpeza da peça, utilizando um processo que não prejudique a peça.

4.2.6 Critérios de aceitação

Os testes examinados por líquidos penetrantes, devem ser considerados inaceitáveis quando os indicadores apresentarem em excesso referente aos limites especificados:

- a. Indicações lineares relevantes;
- b. Indicações arredondadas relevantes, maiores que 5 mm;
- c. 4 ou mais indicações arredondadas em linha, separadas por 1,5 mm ou menos.

São consideradas indicações relevantes aquelas com dimensões maiores que 1,5 mm. As indicações lineares devem apresentar comprimento maior que 3 vezes a sua largura. E, por fim, as indicações arredondadas são caracterizadas pelo formato circular ou elíptico com o comprimento igual ou menos que 3 vezes a sua largura.

4.3 Ensaio por partículas magnéticas

Conforme o artigo 7 da seção V da norma ASME (2019), o ensaio por partículas magnéticas deve documentar as seguintes informações:

- a) Os requerimentos gerais para realização de cada procedimento não destrutivo, conforme artigo 1 da seção V da ASME 2019;
- b) Equipamento de magnetização das partículas e o tipo de corrente;
- c) As partículas magnéticas (visíveis ou fluorescentes, úmidas ou secas);
- d) Registro dos indicadores (aceitáveis e rejeitáveis);
- e) Material e sua espessura;
- f) Equipamento de iluminação.

A fim de que o ensaio seja performado conforme as exigências anteriores, os requerimentos listados no quadro 10 devem ser atendidos, estabelecendo-se um único valor ou um intervalo de valores para cada requisição.

Quadro 10 - Requerimentos para o procedimento do ensaio por partículas magnéticas

Requerimento	Variável Essencial	Variável não essencial
Técnica de magnetização	x	
Tipo de corrente ou amperagem fora da faixa previamente estabelecida por este artigo ou anteriormente utilizada	x	
Preparação da superfície	x	
Partículas magnéticas (fluorescentes ou visíveis, coloridas, tamanho das partículas, úmidas ou secas)	x	
Método de aplicação das partículas	x	
Método de remoção do excesso de partículas	x	
Intensidade mínima de luminosidade	x	
Presença de revestimento com espessura maior do que a demonstrada	x	
Demonstração de performance, quando requisitada	x	
Temperatura da superfície a ser examinada fora da faixa recomendada pelo fabricante das partículas ou da utilizada anteriormente	x	
Mesmo tipo de equipamento		x
Formato ou tamanho do objeto a ser analisado		x
Técnica de desmagnetização		x
Técnica de limpeza pós exame		x
Requerimentos de qualificação pessoal		x

Fonte: ASME: Seção V, artigo 7 (2019)

4.3.1 Preparação da superfície

Dependendo do nível de irregularidades presentes na superfície a ser examinada, um processo de esmerilhamento ou usinagem são requisitados para preparação da superfície. Além disso, a superfície a ser examinada além de uma região de pelo menos 25 mm ao redor dela, deve ser seco e limpo de qualquer sujeira como óleos, fiapos e qualquer outra matéria que possa interferir no resultando do ensaio.

A limpeza pode ser realizada através de detergentes, solventes orgânicos, soluções de descalcificação, removedores de tinta, jateamento de areia ou desengordurantes a vapor.

4.3.2 Técnicas

Uma ou mais das técnicas apresentadas a seguir devem ser utilizadas:

- a) Técnica por eletrodos (*Prod Technique*);
- b) Técnica de magnetização circular;
- c) Técnica yoke;

4.3.2.1 Técnica por eletrodos (*Prod Technique*)

Para esse procedimento, a magnetização acontece por tipos de eletrodo portáteis, que são pressionados sobre a superfície da área a ser examinada. Para evitar a criação de um arco elétrico, os eletrodos devem ser acionados depois de devidamente posicionados.

A corrente de magnetização deve estar em uma faixa de 4 A/mm até 5 A/mm, com espaçamento entre os eletrodos de pelo menos 19 mm por seção. Para seções menores que 19 mm, a corrente deve estar na faixa de 3,6 A/mm até 4,4 A/mm. O espaçamento entre eletrodos não deve ultrapassar 200 mm.

4.3.2.2 Técnica de magnetização circular

4.3.2.2.1 *Técnica por contato direto*

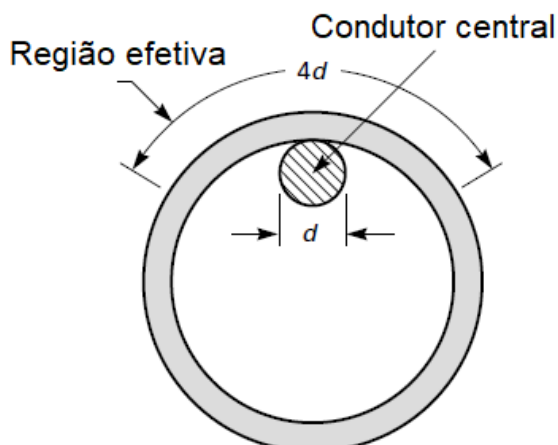
Para esta técnica, a magnetização é estabelecida através da passagem de corrente elétrica através da parte a ser examinada. Desta forma, um campo magnético circular é produzido perpendicularmente à direção de propagação da corrente. A corrente elétrica, por sua vez, deve estar dentro do intervalo de 12 A/mm até 31 A/mm em relação ao diâmetro externo.

Para o caso de peças com formatos diferentes de arredondados, a maior diagonal de uma seção transversal em um plano deve ser utilizada, em vez do diâmetro externo. Para os casos em que o nível requisitado da corrente elétrica não puder ser obtido, a máxima corrente deve ser utilizada.

4.3.2.2.2 *Técnica de condutor central*

Para esta técnica, um condutor central é utilizado para examinar a face interna de superfícies cilíndricas, podendo também ser utilizada para verificar superfícies externas em geometrias cilíndricas. O condutor é posicionado em contato com a face interna e a parte externa do cilindro que está efetivamente magnetizada é quatro vezes o tamanho do diâmetro do condutor central, conforme apresentado na figura 60. Nesses casos, o diâmetro externo utilizado para cálculo da corrente, deve ser conforme soma do diâmetro do condutor central (d) com duas vezes a espessura da parede. A figura 61 apresenta uma ilustração da detecção na prática de uma descontinuidade pela técnica do condutor central.

Figura 60 - Região efetiva de ensaio na utilização da técnica de condutor central



Fonte: ASME: Seção V (2019) - adaptado

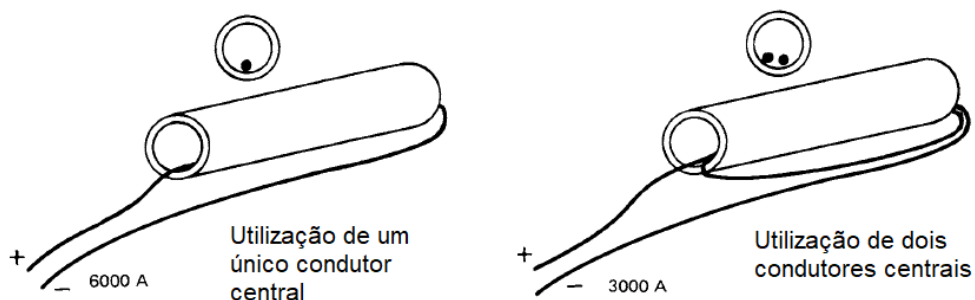
Figura 61 - Indicação de trinca detectada pela técnica do condutor central



Fonte: Andreucci (2009)

O campo magnético do ensaio é proporcional ao número de vezes que o condutor central passa pela região oca da peça. Por exemplo, se uma corrente de 6000 A é requisitada para um único condutor central, então 3000 A podem ser utilizados para o caso de dois condutores centrais, conforme apresentado na figura 62.

Figura 62 - Técnica de condutor central com a utilização de um e dois condutores centrais



Fonte: ASME: Seção V (2019) - adaptado

4.3.2.3 Técnica yoke

Para esta técnica, yokes eletromagnéticos de corrente alternada ou contínua podem ser utilizados. A magnetização dos yokes deve ser verificada todos os dias em que o mesmo for utilizado e quando apresentar danos.

Cada yoke que utilizar corrente alternada, deve ser apto a levantar pelo menos 4,5 kg, considerando o contato similar ao utilizado durante o exame. Já os yokes de corrente contínua, devem ser aptos a levantar pelo menos 18 kg.

4.3.3 Calibração

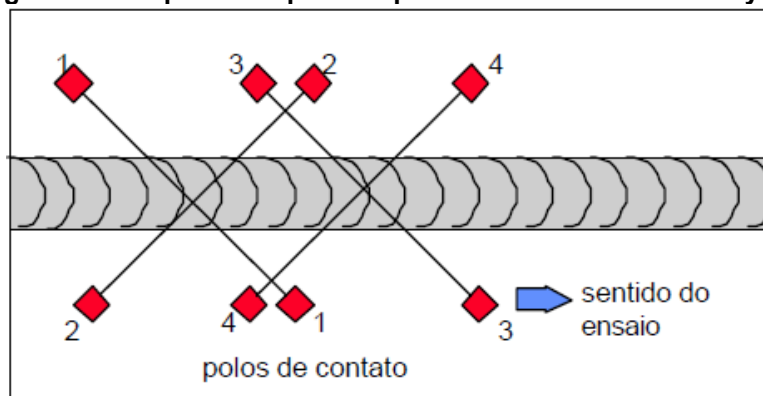
Os equipamentos de magnetização devem ser calibrados com um amperímetro pelo menos uma vez ao ano, ou quando o mesmo tiver passado por reparos. Quando o equipamento não for utilizado por pelo menos um ano, deve ser feito a calibragem antes da utilização.

A precisão dos equipamentos de medição deve ser verificada anualmente. Deve ser aplicado um comparativo com pelo menos três leituras diferentes, abrangendo o intervalo usualmente utilizado. O desvio entre as leituras deve ficar no intervalo de até 10%.

4.3.4 Adequação e direção do campo magnético

Uma vez escolhida a técnica de magnetização a ser utilizada para o ensaio, é importante esquematizar como será o campo magnético formado, se longitudinal ou circular. Como a orientação das descontinuidades não são conhecidas, é preciso realizar uma varredura de cerca de 90° do eixo anterior na mesma região, afim de garantir que a inspeção foi adequada. A figura 63 apresenta um esquemático da varredura.

Figura 63 - Esquema sequencial para técnica de eletrodos e yoke



Fonte: Andreucci (2009)

O campo magnético produzido deve ter força suficiente para produzir indicações satisfatórias, mas não tão forte a ponto de mascarar os indicadores relevantes. Fatores como tamanho, formato e permeabilidade do material influenciam na intensidade requerida do campo magnético. A técnica utilizada para magnetizar também é influenciadora do campo magnético. Devido a isso, uma devida adequação da intensidade do campo magnético deve ser realizada, conforme ilustrado a seguir.

4.3.4.1 Indicador de campo de partícula magnética "formato de torta"

O instrumento, conforme indicado na figura 64, deve ser posicionado na superfície a ser ensaiada, de forma que o suporte não tenha contato com a mesma, apenas o indicador.

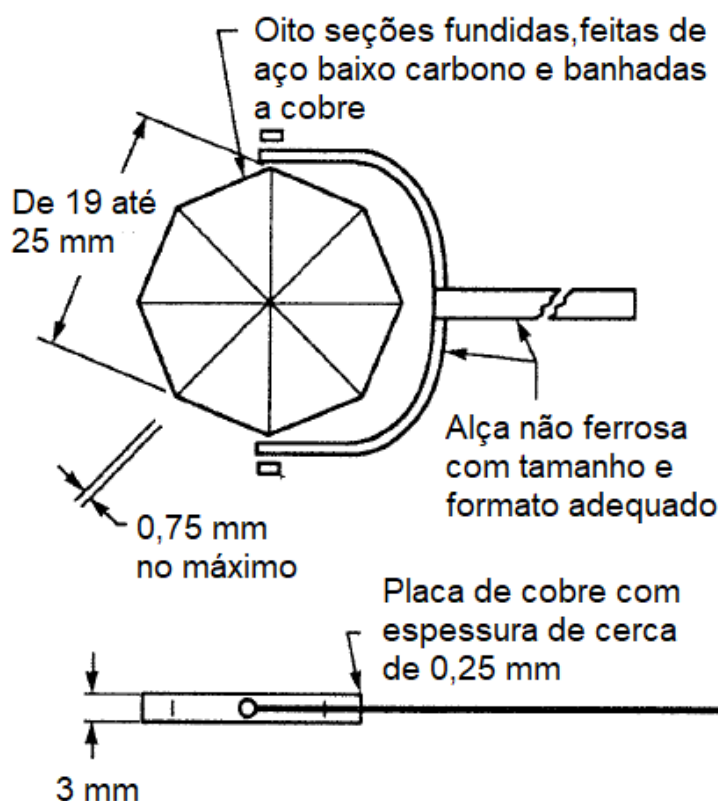
Figura 64 - Instrumento denominado "formato de torta"



Fonte: Andreucci (2009)

A figura 65 especifica conforme a norma ASME, os componentes desta ferramenta.

Figura 65 - Componentes da ferramenta “formato de torta”



Fonte: ASME: Seção V (2019) - adaptado

Linhas de campo magnético são minuciosamente indicados através das linhas demarcadas na superfície banhada a cobre, quando as partículas magnéticas são aplicadas simultaneamente com o campo magnético. Quando as linhas de partículas não são claramente definidas, a técnica de magnetização deve ser alterada conforme a necessidade. Este tipo de indicador é melhor utilizado com partículas de via seca.

4.3.5 Concentração e contaminação de partículas por via úmida

A concentração é preparada através de uma centrífuga com tubos de 1 mL (com divisões de 0,05 mL) para partículas fluorescentes e tubos de 1,5 mL (com divisões de 0,1 mL) para não fluorescentes. Antes de utilizar, a mistura deve permanecer por pelo menos 30 minutos na centrífuga afim de garantir que a mesma fique homogênea.

O volume para partículas fluorescentes é no intervalo de 0,1 até 0,4 mL a cada 100 mL de mistura. Já para as partículas não fluorescentes, o volume é de 1,2 até 2,4 mL para cada 100 mL de mistura. Os valores podem ser alterados caso

especificado pelo fabricante. As concentrações devem ser verificadas a cada 8 horas pelo menos.

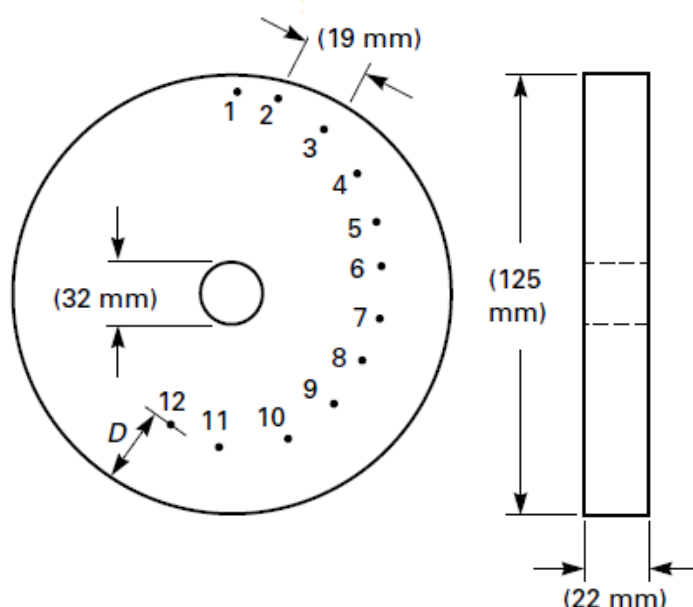
Uma verificação periódica deve ser realizada para ambos os casos, no intuito de remover contaminantes como sujeira, óleo, fiapos, pigmentos fluorescentes soltos e partículas aglomerantes, que podem afetar negativamente a performance do ensaio por partículas magnéticas. Este teste deve ser realizado em uma frequência de pelo menos uma vez na semana.

4.3.6 Anel de teste de Ketos

O anel de teste de Ketos é utilizado para avaliar e comparar a performance e sensibilidade de ambas as técnicas de partículas magnéticas, fluorescentes e não fluorescentes, utilizando um condutor magnético.

O anel é feito de aço ANSI 01 e deve ser recozido a uma temperatura de 900°C, resfriado a uma frequência de 28°C por hora até 540°C e depois resfriado a temperatura ambiente. As dimensões do anel e suas características são representadas conforme a figura 66.

Figura 66 - Anel de teste de Ketos



Fonte: ASME: Seção V (2019) - adaptado

O anel é magnetizado circularmente com corrente alternada retificada de onda completa através da técnica do condutor central, com um diâmetro de 25 a 32 mm. As correntes utilizadas devem ser de 1400 A, 2500 A e 3400 A, sendo que o

número mínimo de furos a serem indicados devem ser respectivamente, três, cinco e seis.

A extremidade do anel deve ser analisada com luz negra ou luz branca visível, dependendo do tipo de partículas envolvido. Para o caso do teste não revelar o número mínimo requerido de furos, o equipamento deve ser removido para uso até que a causa da perda de sensibilidade seja determinada e corrigida. Este teste de calibração por anel de Ketos deve ser realizado pelo menos uma vez por semana.

4.3.7 Método de ensaio

As partículas ferromagnéticas utilizadas no ensaio podem ser de via seca ou úmida, além de poderem ser fluorescentes ou não. Os ensaios devem ser realizados pelo método contínuo.

Para as partículas de via seca, a corrente de magnetização deve permanecer ligada enquanto o ensaio estiver sendo aplicado e enquanto qualquer excesso é removido. Já para as partículas de via úmida, a corrente de magnetização deve ser ligada após a aplicação das partículas. O fluxo das partículas deve parar quando aplicada a corrente.

O excesso de partículas por via seca, devem ser removidos com uma fonte de ar seco de baixa pressão. A corrente do campo magnético deve permanecer ligada, enquanto acontece a remoção do excesso das partículas.

4.3.8 Interpretação

A interpretação deve indicar se uma indicação é falsa, relevante ou irrelevante. Indicações falsas ou não relevantes devem ser provadas, conforme critérios de aceitação, identificados na seção 9 da norma ASME 2019.

4.3.8.1 Critérios de aceitação para o ensaio de partículas magnéticas

Uma indicação é uma evidência de uma imperfeição mecânica. Para ser considerada relevante, uma indicação deve ter dimensões maiores que 1,5 mm. As indicações podem ser do tipo linear e arredondada. Uma indicação linear é aquela que apresenta o comprimento três vezes maior que a largura.

Já uma indicação do tipo arredondada, é aquela que possui forma circular ou elíptica com comprimento maior ou igual que três vezes a sua largura. Qualquer

indicação que seja considerada questionável, deve ser reexaminada para definir se as são ou não relevantes.

Para o ensaio não destrutivo de partículas magnéticas, as superfícies não devem apresentar indicações relevantes lineares, nem indicações relevantes arredondadas maiores que 5 mm. Além disso, também não podem apresentar quatro ou mais indicações relevantes arredondadas em linha, separadas por 1,5 mm ou menos cada.

4.3.8.2 Partículas magnéticas visíveis (contraste colorido)

As discontinuidades da superfície são indicadas pela acumulação de partículas magnéticas que devem contrastar com a superfície. A cor das partículas deve ser diferente com a cor da superfície. A iluminação da superfície ensaiada deve ter intensidade de pelo menos 1076 lux. A intensidade da luz, natural ou luz branca suplementar, deve ser mensurada por um medidor de luz branca antes da avaliação dos indicadores.

4.3.8.3 Partículas magnéticas fluorescentes

O ensaio deve acontecer em uma área escura, com uma iluminação ambiente de no máximo 21,5 lux. Os examinadores devem estar no ambiente escuro por pelo menos 5 minutos, afim de que os seus olhos se adaptem ao ambiente. Óculos e lentes não devem ser fotossensíveis.

A região deve ser iluminada com luzes ultra violeta (UV) que operam em uma faixa de 320 à 400 nm. As luzes UV devem alcançar pelo menos 1000 μ W/cm² na superfície a ser examinada, durante todo o procedimento. Refletores, vidros e lentes devem ser verificados e limpos antes do uso. No caso de algum desses itens estar quebrado, a troca deve ocorrer.

4.3.9 Desmagnetização

Quando acontece do magnetismo residual, proveniente do ensaio, ter a possibilidade de interferir em um uso subsequente da peça, um processo de desmagnetização deve acontecer.

Figura 67 - Gaussímetro



Fonte: Andreucci (2009)

Para auxiliar no processo, um aparelho para avaliação do campo magnético residual deve ser utilizado, como o gaussímetro, conforme apresentado na figura 67.

4.4 Ensaio por ultrassom

Conforme o artigo 4 da seção V da norma ASME (2019), o ensaio por ultrassom deve documentar as seguintes informações:

- a) Identificação do instrumento de ultrassom (incluindo número de série do fabricante);
- b) Identificação da(s) unidade(s) transdutora (frequência e tamanho);
- c) Angulação da(s) onda(s) utilizadas;
- d) Nome da marca e tipo de acoplante utilizado;
- e) Equipamento especial quando utilizado;
- f) Identificação do programa computacional utilizado;
- g) Identificação do bloco de calibração;
- h) Dados de calibração;
- i) Dados de correlação de blocos de simulação e simuladores eletrônicos, quando utilizados, com a calibração inicial;
- j) Referência de ganho do aparelho de ultrassom;
- k) Identificação e localização da solda escaneada;

- l) A(s) superfície(s) que foi (foram) utilizada(s) no ensaio, incluindo a(s) suas(s) condição(ões);
- m) Mapeamento ou registro de indicadores rejeitados;
- n) Áreas de acesso restrito ou soldas inacessíveis.

Afim de que se qualificar o procedimento de soldagem, o quadro 11 deve aplicado para a prática do ensaio, onde estão presentes todas as variáveis essenciais e não essenciais do ensaio de uma forma geral.

Quadro 11 - Requerimentos gerais para o procedimento do ensaio por ultrassom

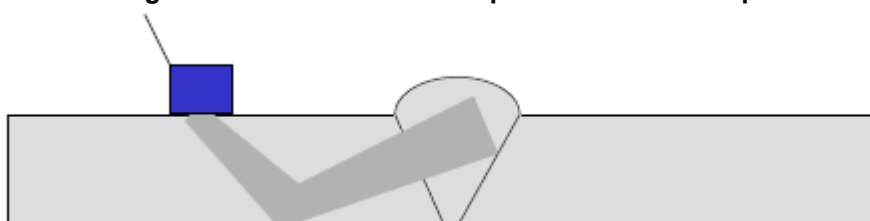
Requerimento	Variável Essencial	Variável não essencial
Configurações da solda a ser examinada, incluindo as dimensões de espessuras e a forma do material base (tubo, chapa, etc)	x	
As superfícies nas quais o exame será executado	x	
Técnica(s) utilizada(s) (ondas longitudinais, ondas transversais, contato ou imersão)	x	
Angulo(s) e tipo(s) de propagação de ondas no material	x	
Tipos de transdutor(es) e frequência(s)	x	
Instrumento(s) de ultrassom utilizado(s)	x	
Bloco(s) de calibração e técnicas(s)	x	
Direções e extensão de escaneamento	x	
Escaneamento (automático ou manual)	x	
Aquisição de dados aprimorados por computador, quando utilizados	x	
Método para distinguir as indicações de falhas geométricas	x	
Metodologia para indicação de tamanhos	x	
Requerimento de desempenho pessoal, quando requerido	x	
Certificação de qualificação pessoal		x
Condição da superfície		x
Marca ou tipo de acoplante		x
Técnica de limpeza pós procedimento de examinação		x
Equipamento automático de alarme ou gravação		x
Registros, incluindo dados mínimos de calibração a serem registrados		x

Fonte: ASME: Seção V, artigo 4 (2019)

A região de inspeção acontece na superfície do metal base adjacente à solda, em uma região paralela ao cordão de solda, denominada área de varredura,

conforme indicado pela figura 68. Na utilização para ensaios de soldas, ondas angulares são mais comumente utilizadas.

Figura 68. Área de varredura pra uma solda de topo



Fonte: Andreucci (2009)

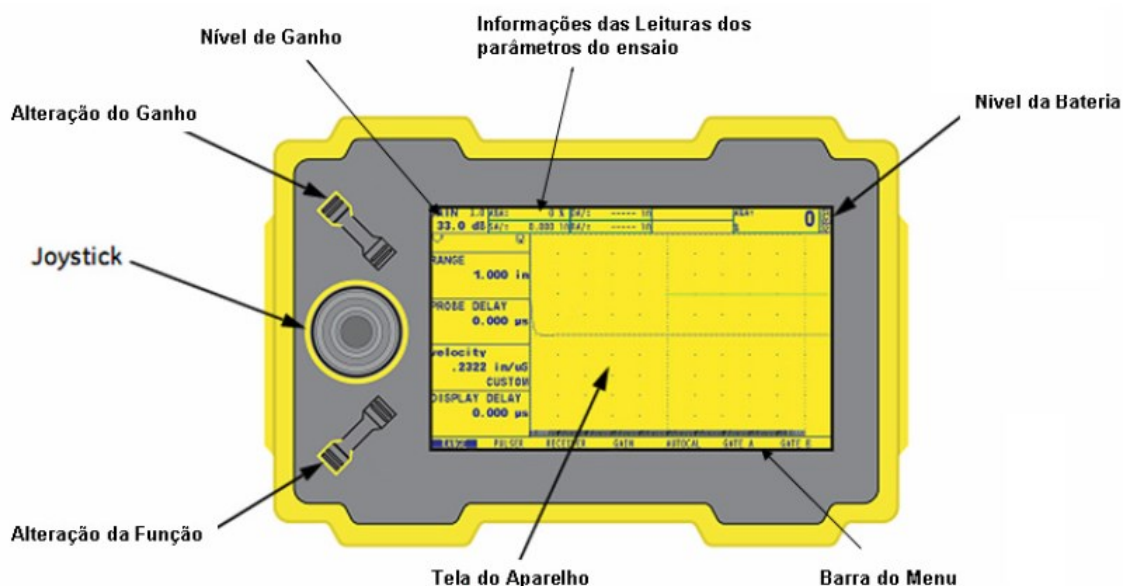
A superfície deve estar limpa de tintas, óxidos, pó e qualquer coisa que possa mascarar ou impedir a penetração do feixe sônico. A temperatura da peça também deve ser levada em consideração, limitando-se à 60°C para que não danifique os transdutores.

4.4.1 Instrumentação

Um tipo eco pulsante de instrumento ultrassônico deve ser utilizado. Tal instrumento deve ser capaz de operar em frequências de pelo menos 1 até 5 MHz e deve ser equipado com um controle de ganho escalonado de 2.0 dB ou menos.

O ganho aqui descrito representa a amplitude do sinal ou a amplificação do sinal recebido pelo cristal. Como ilustrado na figura 69, os aparelhos em geral apresentam controles básicos mínimos, como a alteração do nível de ganho ou função, que seria alteração no tipo de entrada dos conectores (com procedência norte americana ou alemã).

Figura 69 - Aparelho de ultrassom digital da marca GE Mod



Fonte: Andreucci (2014)

Em relação aos transdutores, mais comumente utilizados, o tipo *phased array*, ilustrado na figura 70, apresenta maior velocidade de inspeção, já que em uma única varredura é possível inspecionar o material por vários ângulos de refração diferentes.

Figura 70 - Transdutor tipo phased array com 60 cristais, da marca Olympus



Fonte: Andreucci (2014)

A norma ressalta a utilização de transdutores com frequência nominal da faixa de 1 a 5 MHz, além de utilizar sapatas de contorno de contato. Os ensaios realizados em componentes curvos, tendo um diâmetro menor que 350 mm devem ser realizados utilizando uma sapata de contorno, afim de garantir uma melhor adesão enquanto o transdutor se move pela circunferência.

A equação 8 mostra o cálculo para o diâmetro da sapata do transdutor conforme o seu comprimento.

$$D \leq \left[\frac{(A * A)}{2.87} \right] \quad [8]$$

Onde:

D = diâmetro da sapata do transdutor [mm]

A = comprimento do transdutor [mm]

4.4.2 Acoplantes

Conforme o artigo 4 da seção V da norma ASME 2019, os acoplantes não devem prejudicar o material a ser examinado. Além disso, para a utilização em materiais de ligas a base de níquel, o acoplante não deve conter em sua composição mais do que uma proporção de 250 partes por milhão de enxofre. A tabela 3 traz os valores de impedância, velocidade da onda longitudinal e densidade de alguns dos principais acoplantes utilizados.

Para utilização em aços inoxidáveis austeníticos ou titânio, não deve conter em sua composição mais do que 250 partes por milhão de haletos (cloretos mais fluoretos). As equações 9, 10 e 11 representam o cálculo para determinar o valor de impedância acústica, o valor de energia refletida e energia transmitida, respectivamente.

$$Z = \rho * V \quad [9]$$

$$R = \left[\frac{(Z_2 - Z_1)^2}{(Z_2 + Z_1)^2} \right] \quad [10]$$

$$T = 1 - R \quad [11]$$

Onde:

Z = impedância acústica [g/cm².s]

ρ = densidade do meio [g/cm³]

V = velocidade da onda longitudinal [m/s]

R = Energia refletida

T = Energia transmitida

Tabela 3 - Impedância acústica de alguns materiais e acoplantes

Acoplante	Densidade (g/cm ³)	Veloc da onda longitudinal (m/s)	Impedância acústica (g/cm ² .s)
Óleo (SAE 30)	0,9	1700	1,5*10 ⁵
Água	1	1480	1,48*10 ⁵
Glicerina	1,26	1920	2,4*10 ⁵
Carbox Metil Celulose	1,2	2300	2,76*10 ⁵
Aço	7,8	5900	46*10 ⁵
Ar ou Gas	0,0013	330	0,00043*10 ⁵
Aço Inoxidável	7,8	5800	45,4*10 ⁵
Alumínio	2,7	6300	17,1*10 ⁵
Acrílico	1,18	2700	3,1*10 ⁵
Cobre	8,9	4700	41,6*10 ⁵
Borracha	1,1	1800	2*10 ⁵
Titânio	4,5	6100	27,3*10 ⁵
Magnésio	1,74	5800	10*10 ⁵
Vidro	2,5	5700	14,2*10 ⁵

Fonte: Andreucci (2014)

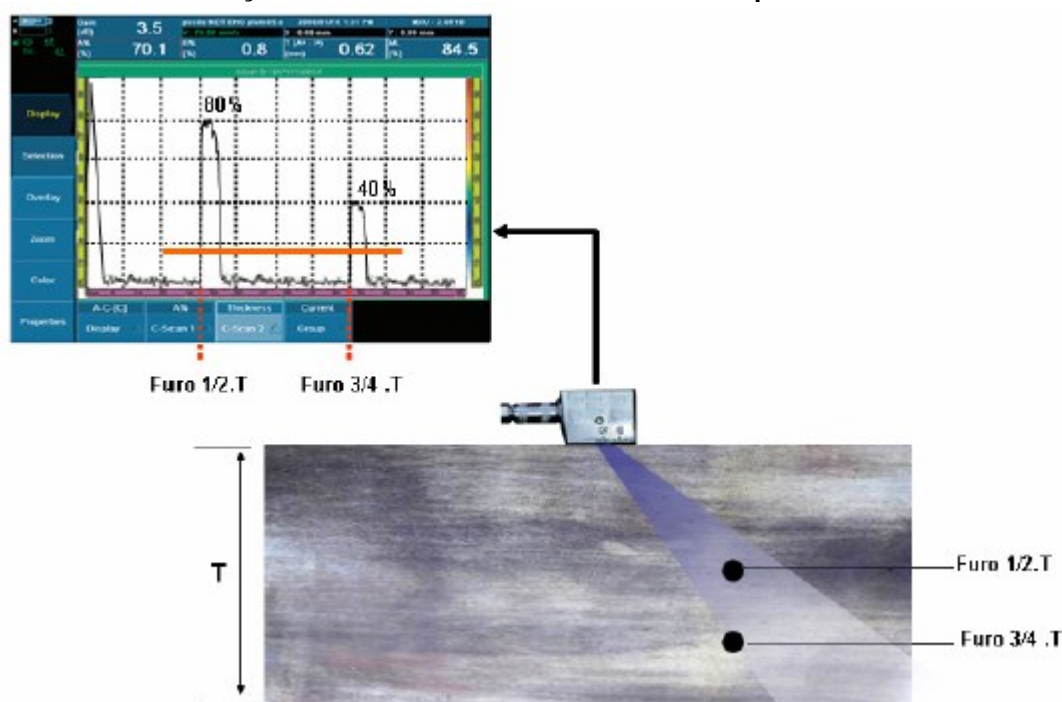
4.4.3 Calibração

O período de espaçamento entre calibrações não deve exceder 3 meses para aparelhos analógico e um ano para aparelhos digitais.

4.4.3.1 Calibração da linearidade vertical e controle de amplitude do aparelho

A verificação da linearidade em altura da tela é realizada com um transdutor angular devidamente posicionado sobre o bloco básico de calibração, com a saída do feixe angular dirigida para os cilindros do bloco, ajustando a escala do aparelho para se obter ecos de referência bem definidos resultantes dos furos de $\frac{1}{2}$ e $\frac{3}{4}$ de T, conforme ilustrado na figura 71. O aparelho de ultrassom deve projetar imagens do tipo A-scan.

Figura 71 - Bloco de verificação de linearidade em altura da tela do aparelho de ultrassom



Fonte: ASME: Seção V, artigo 4 (2019)

O ajuste do controle de ganho e o posicionamento do transdutor devem ser de forma a obter na tela do aparelho dois ecos em uma relação de 2:1 em termos de amplitude, sendo o maior com uma amplitude de 80% do valor da tela.

Sem mover o transdutor, o controle de ganho deve ser reduzido sucessivamente em incrementos de 10% até que o maior eco esteja a 20% da altura da tela, realizando uma leitura do valor do menor eco a cada decréscimo. A tabela 4 indica a faixa de leitura do eco de menor valor, conforme o decréscimo de ganho. A leitura da menor indicação deve sempre estar a 50% de altura da maior indicação.

Tabela 4 - Verificação de linearidade em amplitude da tela do aparelho de ultrassom

Ajuste da indicação na altura total da tela (%)	Ajuste do controle de ganho (dB)	Limites aceitáveis da altura da menor indicação (%)
80	-6	35 a 45
80	-12	15 a 25
40	6	65 a 95
20	12	65 a 95

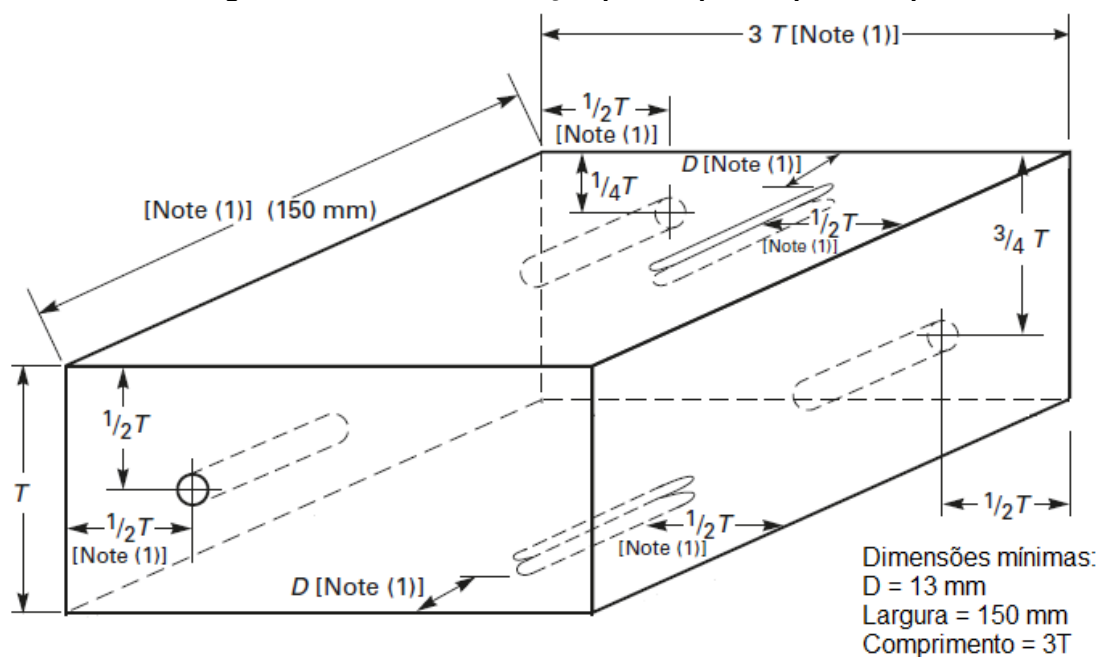
Fonte: ASME: Seção V, artigo 4 (2019)

4.4.3.2 Blocos de calibração

A escala do aparelho de ultrassom deve ser calibrada através dos blocos de calibração padrão, no caso conforme ilustrado pela figura 72, o bloco padrão referenciado é válido para superfícies planas ou com curvaturas maiores que 500 mm de diâmetro. O material no qual o bloco de calibração é fabricado, deve ser o mesmo do material a ser examinado ou de um mesmo P-número. O bloco ainda, deve ter o mesmo acabamento superficial do que a região de varredura.

As tabelas 5 e 6 são referentes aos valores da espessura do cordão de solda (t) e das dimensões dos entalhes, respectivamente. A espessura (T) do bloco de calibração e os diâmetros dos furos, variam conforme o tamanho da espessura do cordão de solda.

Figura 72 - Bloco de calibração padrão para superfícies planas



Notas: (1) a menor dimensão (por exemplo o comprimento, se o valor de $3T$ corresponder a um valor menor que 150 mm, deve-se utilizar o menor valor).

(2) os furos devem ter profundidade mínima de 38 mm e devem ser paralelos à superfície de ensaio.

(3) a tolerância para os diâmetros dos furos deve ser de mais ou menos 0,8 mm e para a distância dos mesmos em relação à superfície mais ou menos 3 mm

Fonte: ASME: Seção V, artigo 4 (2019)

Tabela 5 - Parâmetros do bloco de calibração para superfícies planas

Espessura do cordão de solda (t) (mm)	Espessura do bloco de calibração (T) (mm)	Diâmetro dos furos (mm)
25 ou menor	19 ou t	2,5
Acima de 25 até 50	38 ou t	3
Acima de 50 até 100	75 ou t	5
Acimda de 100	t ± 25	Nota (1) *

Notas: (1) para cada incremento na espessura de soldagem (t) em 50 mm ou uma fração de até 100 mm, os diâmetros dos furos devem aumentar em 1,5 mm.

Fonte: ASME: Seção V, artigo 4 (2019)

Tabela 6 - Parâmetros de dimensões dos entalhes no bloco de calibração

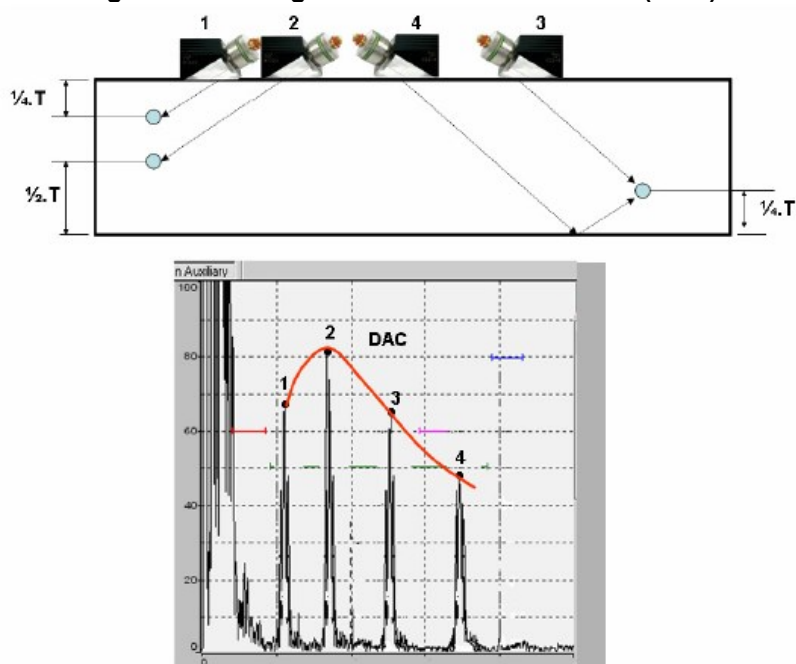
Dimensões dos entalhes	Tamanho (mm)
Comprimento	mínimo de 25
Largura	máximo de 6
Profundidade	1,6% de T até 2,2% de T

Fonte: ASME: Seção V, artigo 4 (2019)

4.4.3.3 Obtenção da curva de referência *distance amplitude correction* (DAC) e aplicação de correção

Primeiramente deve-se posicionar o transdutor sobre o bloco padrão, do modo que se obtenha resposta do furo com maior amplitude. Em seguida, ajustar essa amplitude à 80% da altura da tela, sendo este ganho denominado “ganho primário” da curva de referência DAC. Por fim, para completar a curva, sem alterar o ganho, deve-se posicionar o transdutor para obter os ecos dos demais furos do bloco padrão, como apresentado na figura 73.

Figura 73 - Plotagem da curva de referência (DAC)

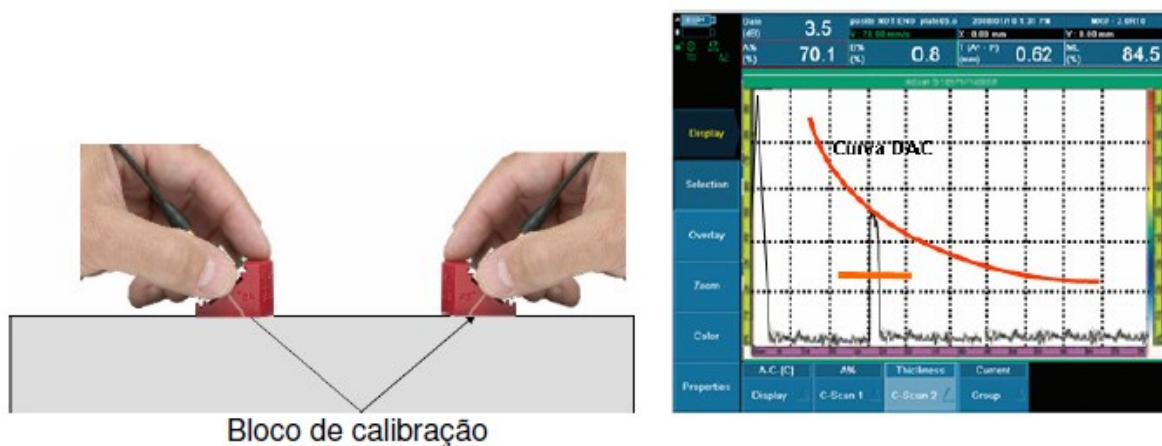


Fonte: Andreucci (2014)

A partir daí, registra-se o ganho do aparelho, o qual deve ser mantido até o final da inspeção, sendo verificado em caso de troca de operador. Para o caso de um acabamento superficial acentuado entre o bloco e a peça a ser ensaiada, um procedimento de transferência de ganho do bloco para a peça deverá ser aplicado.

A correção da perda por transferência, quando necessária, pode ser realizada utilizando a própria curva DAC. Uma vez já plotada a curva DAC, dois transdutores são posicionados no bloco de calibração, realizando o ajuste do ganho para que o eco atinja a curva DAC, conforme ilustrado na figura 74.

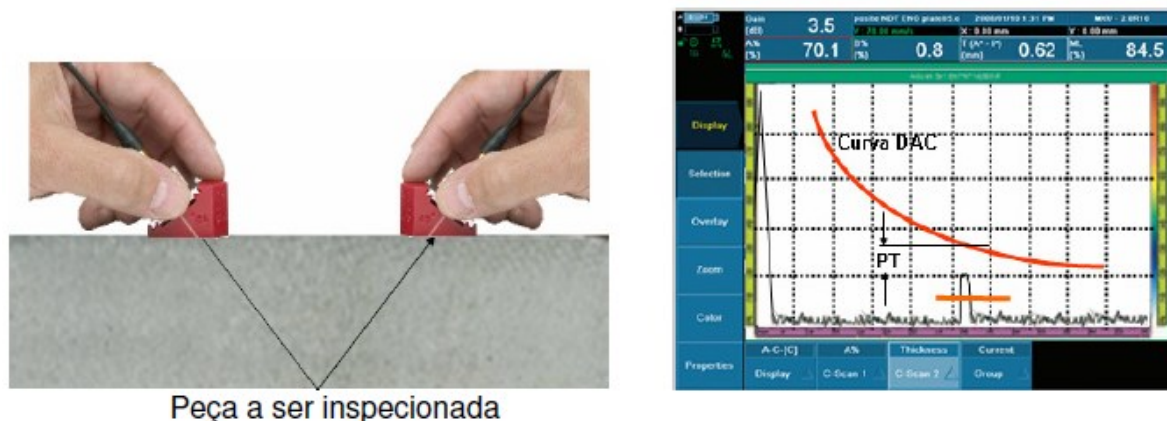
Figura 74 - Ajuste de ganho no bloco de calibração para alcançar o valor da curva DAC



Fonte: Andreucci (2014)

Em seguida, os mesmos transdutores são posicionados na superfície da peça a ser ensaiada, cuja espessura pode ser diferente em relação ao bloco padrão. Através da altura do eco obtido em relação a curva DAC, é realizada a correção em dB necessária para que o eco atinja o valor da curva DAC, conforme ilustrado na figura 75.

Figura 75 - Correção aplicada à peça a ser inspecionada, através da curva DAC

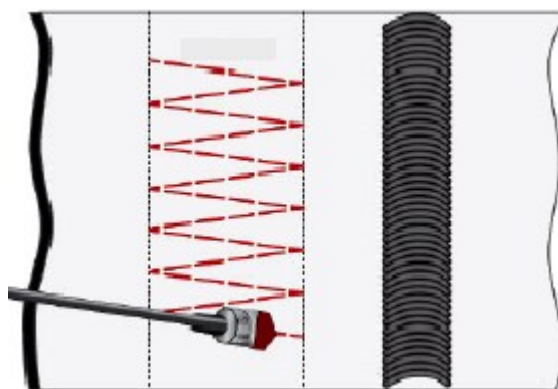


Fonte: Andreucci (2014)

4.4.4 Realização da inspeção

De uma forma geral, o movimento do transdutor sobre a peça deve ser realizado com o feixe ultrassônico voltado perpendicularmente à região de solda, para que o volume da solda seja totalmente atravessado pelas ondas, conforme ilustrado na figura 76.

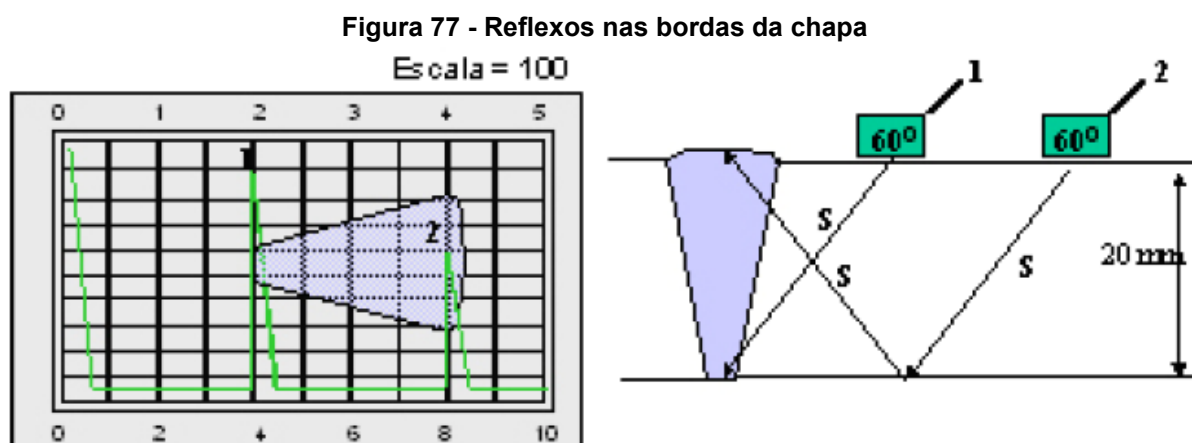
Figura 76 - Caminho realizado pelo transdutor



Fonte: Andreucci (2014)

Primeiramente, deve-se levar em consideração o posicionamento do transdutor pra que durante o monitoramento da tela, nenhuma descontinuidade passe despercebido. Andreucci (2014) descreve uma técnica mais prática para determinar a área da tela que deve ser observada durante a inspeção da solda.

Por meio do posicionamento de um transdutor angular em 60° sobre uma chapa de 20 mm de espessura, direciona-se o seu feixe para o canto inferior da chapa, conforme a posição 1 na figura 77. O monitor apresenta seus eixos para comprimento e decibéis, na horizontal e na vertical, respectivamente. Percebe-se então, a marcação no eixo horizontal de 40 mm, plotado com número 1 na tela. Esse valor corresponde à relação trigonométrica formada entre o cosseno do ângulo de 60° e a espessura de 20 mm.



Fonte: Andreucci (2014)

Em seguida, direciona-se o feixe para a posição da borda superior da chapa, o equivalente de leitura do eco de 80 mm, representado pelo número 2 na tela. Assim, obtêm-se os limites de início e fim do cordão de solda. Qualquer descontinuidade presente dentro dessa região entre 40 e 80 mm, poderá ser visualizada pelo efeito do ultrassom.

4.4.5 Critérios para validação dos resultados

As indicações que excederem 3 mm em seu comprimento são consideradas relevantes, no entanto são inaceitáveis quando seu comprimento exceder:

- a. 3 mm para uma espessura de solda (t) até 10 mm;
- b. $\frac{1}{3}$ de t para quando t varia de 10 a 57 mm;
- c. 19 mm para t acima de 57 mm.

5 CONCLUSÃO

A implementação de uma boa qualificação requer uma exaustiva interpretação da norma e profissionais qualificados, como foi apresentado no presente trabalho, no levantamento e discussão sobre a norma ASME para caldeiras e vasos de pressão de 2019.

Ainda, através da própria norma, trabalhos acadêmicos e *websites* relacionados à qualificação da soldagem para caldeiras, foi evidenciado a importância dos ensaios não destrutivos para identificação de possíveis discontinuidades na soldagem de uma forma eficiente.

Através das discussões relacionadas as seções V e IX da norma ASME para caldeiras e vasos de pressão, foram identificados os requisitos de qualificação dos principais procedimentos não destrutivos, bem como as variáveis essenciais e não essenciais para cada ensaio abordado. Assim também como outras normas utilizadas para qualificação pessoal de soldadores e inspetores.

A grande dificuldade, no entanto, foi a interpretação da norma ASME. Não só pelos problemas na tradução, mas também para identificar certas restrições e instruções. Talvez pela ausência da prática também, mas de fato, demanda -se tempo e dedicação para total compreensão da mesma.

Uma interessante sugestão para trabalhos futuros seria sobre a abordagem da qualificação das técnicas de soldagem, como soldagem por eletrodo revestido, TIG, MIG/MAG, por exemplo.

REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 14842**: critérios para qualificação e certificação de inspetores de soldagem. Rio de Janeiro: ABNT, 2003

ALCAN, Alumínio do Brasil. **Manual de Soldagem**. [S. l.: s. n.], 2001. Disponível em: http://www.soldaautomatica.com.br/index_arquivos/Arquivos/MANUAL%20DE%20SOLDAGEM%20ALCAN.pdf. Acesso em: 25 ago. 2021.

ALD, Montagens industriais. **Manutenção de caldeiras**, 13 out. 2020. Disponível em: <https://ald.ind.br/noticias/detalhes/manutencao-de-caldeiras-saiba-porque-e-importante-fazer...> Acesso em: 28 out. 2022.

ALTAFINI, Carlos Roberto. **Apostila sobre caldeiras**: Disciplina de máquinas térmicas. [S. l.: s. n.], 2002.

AMERICAN SOCIETY OF MECHANICAL ENGINEERS. ASME Seção I: Rules for Construction of Power Boilers. Nova Iorque: ASME, 2019

AMERICAN SOCIETY OF MECHANICAL ENGINEERS. ASME Seção V: Boiler and Pressure Vessel Code: Nondestructive Examination. Nova Iorque: ASME, 2019

AMERICAN SOCIETY OF MECHANICAL ENGINEERS. ASME Seção IX: Boiler and Pressure Vessel Code: Qualification Standards for Welding, Brazing and Fusing Procedures; Welders; Brazers; and Welding, Brazing and Fusing Operators. Nova Iorque: ASME, 2019

ANDREUCCI, Ricardo. **Líquidos penetrantes**. [S. l.]: Abende, 2014. Disponível em: <https://infosolda.com.br/wp-content/uploads/Downloads/andreucci/LP-2014.PDF>. Acesso em: 16 setembro 2022.

ANDREUCCI, Ricardo. **Partículas magnéticas**. [S. l.]: Abende, 2009. Disponível em: <https://www.infosolda.com.br/images/Downloads/andreucci/PM-2009.PDF> . Acesso em: 22 setembro 2022.

ANDREUCCI, Ricardo. **Ensaio por ultrassom**. [S. l.: s. n.], 2014. Disponível em: <https://infosolda.com.br/796-end-ensaios-nao-destrutivos-conheca-a-nova-edicao-do-livro-digital-do-professor-ricardo-andreucci/>. Acesso em: 3 out. 2022.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR ISO 9000: **Sistema de Qualidade: Fundamentos e Vocabulário**. Rio de Janeiro, 2000.

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

BETHLEHEM, Xh Mar. **ASME: Sua história e suas normas.** [S. l.], 2022. Disponível em: <https://xhmarbethlehem.com.br/blog/asme-conheca-sua-historia-e-as-principais-normas/#:~:text=Pequeno%20hist%C3%B3rico%20da%20cria%C3%A7%C3%A3o%20da,industrializa%C3%A7%C3%A3o%20em%20todo%20o%20mundo>. Acesso em: 3 out. 2022.

BRANCHINI, Odécio J. G. Garantia de Qualidade na Soldagem. In: WAINER, Emílio; BRANDI, Sérgio Duarte; MELLO, Fábio Décourt Homem de. **Soldagem: Processos e Metalurgia.** [S. l.: s. n.], 2004.

BRANDI, Sérgio D. Classificação dos Processos de Soldagem. In: WAINER, Emílio; BRANDI, Sérgio Duarte; MELLO, Fábio Décourt Homem de. **Soldagem: Processos e Metalurgia.** [S. l.: s. n.], 2004.

BRUNHARA, José Luiz. **Caldeiras.** [S. l.], 2020. Disponível em: <https://www.aguavivatec.com.br/caldeiras/>. Acesso em: 1 nov. 2022.

CONGRESSO DE ENGENHARIA DA UFSJ, 2018, Universidade Federal de São João del Rei. **Aplicabilidade, normas e projetos de vasos de pressão - uma revisão [...].** [S. l.: s. n.], 2018.

DE LUCA, Rogerio. Descontinuidades na Soldagem. **Infosolda**, [S. l.], p. 1-18, 24 maio 2014. Disponível em: <https://infosolda.com.br/wp-content/uploads/Downloads/Artigos/metal/Descontinuidadesnasoldagem.pdf>. Acesso em: 26 abr. 2022.

END, Inspeção de equipamentos. **Caldeira flamotubular**, 30 jan. 2010. Disponível em: <http://endinspecao.blogspot.com/2010/01/ensaio-por-liquido-penetrante-em.html>. Acesso em: 28 out. 2022.

FELIZARDO, Ivanilza. **Apostila: Tecnologia da Soldagem.** CEFET-MG, [s. l.], 2016.

FBTS, Fundação Brasileira de Tecnologia da Soldagem. **Inspetor de soldagem nível 1 e nível 2.**, 2022. Disponível em: <http://www.fbts.org.br/CertificacaoQualidade/InspetorSoldagem>. Acesso em: 3 out. 2022.

GARCIA, Amauri; SPIM, Jaime Alvares; DOS SANTOS, Carlos Alexandre. **Ensaio dos materiais**. 2. ed. [S. l.]: LTC, 2012.

GOV - MINISTÉRIO DO TRABALHO. **NR 13**. [S. l.], 2018. Disponível em: <<https://www.gov.br/trabalho-e-previdencia/pt-br/composicao/orgaos-especificos/secretaria-de-trabalho/inspecao/seguranca-e-saude-no-trabalho/normas-regulamentadoras/nr-13.pdf>>. Acesso em: 17 maio 2022.

GYURKOVITS, Jose Luiz. **Caldeiras**. [S. l.: s. n.], 2004.

HOULDCROFT, P. T. – **Welding Process Technology**. Cambridge University Press, London, 1979.

INDUSTRY, Direct. **Fibrosópio flexível**, 2022. Disponível em: <https://www.directindustry.com/pt/prod/usa-borescopes/product-162501-1902570.html>. Acesso em: 28 out. 2022.

INDUSTRY, Direct. **Flexible boroscope**, 2022. Disponível em: <https://www.directindustry.com/prod/ht/product-18971-2334449.html>. Acesso em: 28 out. 2022.

INSPESSOLDA, Website. **Importância do certificado de qualificação de soldador (CQS)**. [S. l.], 2022. Disponível em: <https://inspesolda.com/certificado-de-qualificacao-de-soldador/>. Acesso em: 4 nov. 2022.

INTERNATIONAL ORGANIZATION OF STANDARDIZATION. **ISO 15609-1: Specification and qualification of welding procedures for metallic materials – Part 1**. 2004

JACOB, Felipe. **6 Defeitos Comuns em Soldas de Eletrodo Revestido e Como Evitá-los**. [S. l.], 2017. Disponível em: <http://calculistadeaco.com.br/6-defeitos-comuns-em-soldas-de-eletrodo-revestido-e-como-evita-las/>. Acesso em: 1 abr. 2022.

JOHANSSON, Curt. Non-destructive testing. *In*: WEMAN, Klas. **Welding processes handbook**. 2. ed. [S. l.: s. n.], 2012.

JUNIOR, Luiz Gimenes; FERREIRA, Leandro. Como reduzir custos fixos em soldagem. **Infosolda**, [s. l.], 1 jun. 2015.

LINCOLN, Electric Company. **The Procedure Handbook of Arc Welding**. 13. ed. [S. l.: s. n.], 1994. Disponível em: file:///C:/Users/cinth/Downloads/pdfcookie.com_lincoln-procedure-handbook-of-arc-welding.pdf. Acesso em: 2 nov. 2021.

LUDKE, Menga; MARLI, André. **Pesquisa em educação: Abordagens qualitativas.** [S. l.: s. n.], 1986.

MARTINELLI JR, Luiz Carlos. **Geradores de vapor.** [S. l.: s. n.], 2002.

METALTEC, Ebe. **Ensaio por partículas magnéticas via seca**, 2022. Disponível em: <https://www.metaltecnicaodestruativos.com.br/ensaio-por-particulas-magneticas>. Acesso em: 1 nov. 2022.

METALTEC, Ebe. **Ensaio por partículas magnéticas via úmida**, 2022. Disponível em: <https://www.metaltecnicaodestruativos.com.br/ensaio-por-particulas-magneticas-via-umida>. Acesso em: 1 nov. 2022.

MINISTÉRIO DE ESTADO DO TRABALHO E PREVIDÊNCIA. Norma regulamentadora nº13. **NR-13: CALDEIRAS, VASOS DE PRESSÃO, TUBULAÇÕES E TANQUES METÁLICOS DE ARMAZENAMENTO**, [S. l.], 2022. Disponível em: <https://www.gov.br/trabalho-e-previdencia/pt-br/composicao/orgaos-especificos/secretaria-de-trabalho/inspecao/seguranca-e-saude-no-trabalho/sst-portarias/2022/portaria-ndeg-1-846-nova-nr-13.pdf>. Acesso em: 4 nov. 2022.

MODENESI, Paulo J. **Terminologia usual de soldagem e símbolos de soldagem.** [S. l.: s. n.], 2008.

MODENESI, Paulo J. **Soldabilidade dos aços transformáveis.** [S. l.: s. n.], 2012.

MODENESI, Paulo J. **Soldagem 1: Descontinuidades e inspeção em juntas soldas.** [S. l.: s. n.], 2001.

MODENESI, Paulo J. **Soldagem 1: Normas e qualificação em soldagem.** [S. l.: s. n.], 2005.

MODENESI, Paulo J.; MARQUES, Paulo V.; SANTOS, Dagoberto B. **Introdução à Metalurgia da Soldagem.** [S. l.: s. n.], 2012.

NDT, World of. **Magnetization Techniques in MT**, 19 maio 2021. Disponível em: <https://worldofndt.com/magnetization-techniques-in-mt/>. Acesso em: 6 out. 2022.

NETO, Rubelmar Maia de Azevedo Cruz. **Taxa de resfriamento na soldagem: Um novo entendimento.** 2018. Tese (Doutorado em engenharia metalúrgica e de materiais) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, [S. l.], 2018.

OGAWA, Yoji. Visual Analysis of Welding Processes. In: KOVACEVIC, Radovan. **Welding Processes**. [S. l.: s. n.], 2012. Disponível em: <https://www.intechopen.com/books/2504>. Acesso em: 28 set. 2021.

OLYMPUS, Evident. **Introduction to Phased Array Ultrasonic Testing**. [S. l.], 2022. Disponível em: <https://www.olympus-ims.com/en/ndt-tutorials/intro/ut/>. Acesso em: 10 out. 2022.

PAREDES, Ramón S. C. **Introdução a metalurgia da soldagem**. [S. l.: s. n.], 2008.

PEREIRA, Bruno Domingues. **Inspeção de Juntas Soldadas**. 2020. Dissertação (Mestrado em Engenharia Metalúrgica e de Materiais) - Faculdade de Engenharia da Universidade de Porto, [S. l.], 2020.

PARANHOS, Ronaldo Pinheiro da Rocha. Soldagem Com Arco Submerso. In: WAINER, Emílio; BRANDI, Sérgio Duarte; MELLO, Fábio Décourt Homem de. **Soldagem: Processos e Metalurgia**. [S. l.: s. n.], 2004.

PEIXOTO, Arildomá L. **Soldagem**. Belém:IFPA;Santa Maria: UFMS,2012.

PETROBRAS. 2003. **N-1596**: Ensaio não destrutivo - líquido penetrante, [S. l.], 2003.

PETROBRAS. 2003. **N-2370**: Líquido penetrante, [S. l.], 2003.

SAMPAIO, Marcus Vinicius Cruz. **Aplicação da inspeção não intrusiva em equipamentos do sistema de dessulfurização de gás natural da plataforma de Pampo**. 2009. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, [S. l.], 2009. Disponível em: <https://www.lume.ufrgs.br/bitstream/handle/10183/21400/000737176.pdf?sequence>. Acesso em: 16 maio 2022.

SERV-END, Indústria e comércio LTDA. **Método de inspeção por partículas magnéticas: Técnica dos eletrodos**, 2020. Disponível em: <http://www.servend.com.br/metodo-de-inspecao-por-particulas-magneticas/tecnica-dos-eletrodos>. Acesso em: 6 out. 2022.

SINGH, Ramesh. **Applied Welding Engineering: Process, Codes and Standarts**. [S. l.]: Elsevier, 2012.

TANIGUCHI, Célio. Transferência de Calor na Soldagem. In: WAINER, Emílio; BRANDI, Sérgio Duarte; MELLO, Fábio Décourt Homem de. **Soldagem: Processos e Metalurgia**. [S. l.: s. n.], 2004.

TECCO, Dorival G. Processos de Soldagem com Eletrodo Revestido. In: WAINER, Emílio; BRANDI, Sérgio Duarte; MELLO, Fábio Décourt Homem de. **Soldagem: Processos e Metalurgia**. [S. l.: s. n.], 2004.

TIBURI, Fabio. **Dossiê Técnico: Qualidade em Soldagem**. [S. l.], 2007. Disponível em: https://www.senairs.org.br/sites/default/files/documents/qualidade_em_soldagem.pdf. Acesso em: 2 nov. 2021.

TOGAWA, Victor. **Caldeiras - Classificação Geral**. [S. l.], 2017. Disponível em: <https://togawaengenharia.com.br/blog/caldeiras-classificacao-geral/>. Acesso em: 17 maio 2022.

UTMAAX, Inspeções. **Boroscopia industrial**. [S. l.], 2022. Disponível em: <https://www.utmaax.com.br/boroscopia-industrial>. Acesso em: 3 out. 2022

WEBINAR, 2019, não presencial. Fundamentos dos ENDS convencionais. **Taxa de resfriamento na soldagem**: Um novo entendimento. [S. l.]: Abendi, 2019. Disponível em:

<http://www.abendici.org.br/universidades/imagens/Webinar2019FundamentosdosENDsConvencionais.pdf>. Acesso em: 26 set. 2022.

WEGLOWSKI, Marek Stanislaw. Monitoring of Arc Welding Process Based on Arc Light Emission. In: KOVACEVIC, Radovan. **Welding Processes**. [S. l.: s. n.], 2012. Disponível em: <https://www.intechopen.com/books/2504>. Acesso em: 28 set. 2021.

**APÊNDICE A - Variáveis das especificações do procedimento de soldagem
MIG/MAG**

Quadro 12 - Variáveis essenciais, suplementares e não essenciais para o processo de soldagem MIG/MAG

(continua)

Grupo	Variável	Essencial	Suplementar Essencial	Não Essencial
Juntas Soldadas	Alteração no tipo de junta			x
	Remoção do apoio			x
	Espaçamento da raiz			x
	Adição ou remoção de retentores			x
Metais Base	Alteração do agrupamento segundo P-número ¹		x	
	O limite de espessura da peça (T) deve ser no mínimo conforme o corpo de prova ou 16mm, o que for menor		x	
	Alteração da espessura do metal base, conforme sua qualificação ²	x		
	Espessura do passe (t) maior que 13mm, requer um aumento na espessura do metal base de pelo menos 1.1 vezes	x		
	Para uma espessura (T) de até 13mm para o modo de transferência de curto circuito, requer um aumento na espessura de 1.1 vezes. Quando maior que 13mm, consultar tabela ²	x		
	Alteração na qualificação do P-número ³	x		
Metais de Adição	Alteração do F-número ⁴	x		
	Alteração do A-número ⁵	x		
	Alteração no diâmetro do eletrodo			x
	Alteração na classificação do metal de adição ⁶		x	
	Alteração na forma do metal de adição (nu, fluxo em núcleo, fluxo revestido e pó)	x		
	Redução, aumento ou alteração de mais de 10% no volume do metal de adição suplementar	x		
	Alteração nos elementos de liga do metal de adição	x		
	Alteração na espessura do cordão de solda depositado ²	x		
	Para o processo de curto circuito com baixa voltagem, quando o cordão de	x		

	solda do metal de adição for menor que 13mm, um incremento de 1.1 vezes no próprio cordão deve ser adicionado. Quando maior que 13mm, consultar classificação ⁷			
Posições	Adição de posição, além das que já estão qualificadas			x
	Alteração no sentido do passe vertical, seja de cima pra baixo ou de baixo pra cima			x
Pré Aquecimento	Um decréscimo de mais de 55°C na temperatura de pré aquecimento ⁸	x		
	Uma alteração na manutenção do pré aquecimento até a conclusão do processo de soldagem, antes de qualquer tratamento no pós soldagem			x
	Um aumento maior que 55°C na temperatura máxima do interpasse registrado no RQPS		x	
Pós Aquecimento	Alteração sobre as condições de aplicação do tratamento térmico pós soldagem, conforme recomendado ⁹	x		
	Alteração nos parâmetros de temperatura e duração no procedimento térmico pós soldagem, conforme recomendado ⁹		x	
Gás	Adição ou remoção do gás de proteção ou alteração em sua composição			x
	Alteração de um único gás de proteção pra um outro, ou de uma mistura de gases pra um único (ou vice versa), ou na porcentagem da composição da mistura ou ainda, uma adição ou omissão do gás de proteção	x		
	Alteração na vazão do gás de proteção			x
	Adição ou remoção de um gás de apoio ou uma alteração em sua composição, ou uma alteração em sua vazão			x
		x		

	Remoção do gás de apoio ou uma alteração em sua composição nominal, conforme especificado ¹⁰			
	Remoção do gás de proteção ou alteração em sua composição nominal, conforme especificado ¹¹	x		
Características Elétricas	Aumento no aporte de calor ¹²		x	
	Alteração entre os modos de transferências: globular, aerosol e curto circuito	x		
	Alteração na corrente elétrica ou polaridade		x	x
	Alteração no alcance da amperagem			x
Técnica	Alteração na técnica do cordão de solda			x
	Alteração nos métodos de limpeza inicial ou entre os passes			x
	Alteração no tamanho de copo, orifício ou bocal			x
	Alteração no método de goiva			x
	Alteração de mais ou menos 10% na profundidade, frequência ou tempo de permanência na técnica de oscilação			x
	Alteração no tubo de contato em relação à distância de trabalho			x
	Alteração de múltiplos passes para um único passe por lado		x	x
	Alteração de um único eletrodo para múltiplos eletrodos, ou vice versa, apenas para casos de soldagem automática		x	x
	Alteração no espaçamento de múltiplos eletrodos, para casos de soldagem automática			x
	Alteração da soldagem manual para automática ou vice versa			x
	A adição ou remoção de processos de trabalho à frio, no intuito de aliviar as tensões após a soldagem			x
Uso de processos térmicos para preparação do cordão de solda	x			

¹ O tipo de grupo se refere ao agrupamento de metais base (P-Número), conforme a tabela QW/QB-422 da seção IX da ASME 2019

² conforme referenciado na tabela QW-451 da seção IX da ASME 2019

³ conforme tabela QW-424 da seção IX da ASME 2019

⁴ O tipo de grupo se refere ao agrupamento de materiais de adição (F-Número), conforme a tabela QW-432 da seção IX da ASME 2019

⁵ referente à classificação dos metais de adição ferrosos, de acordo com a sua composição química, conforme a tabela QW-442 da seção IX da ASME 2019

⁶ referente à alteração da classificação do metal de adição conforme a especificação dos metais de adição da ASME (SFA)

⁷consultar tabelas QW-451.1, QW-451.2, QW-451.1(a) ou QW-451.1(b), conforme aplicável

⁸ A temperatura mínima de soldagem deve ser especificada na EPS

⁹ conforme referenciado em QW-407.1 da seção IX da ASME 2019

¹⁰conforme referenciado em QW-408.9 da seção IX da ASME 2019

¹¹conforme referenciado em QW-408.10 da seção IX da ASME 2019

¹²conforme referenciado em QW-409.1 da seção IX da ASME 2019

Fonte: ASME: Seção IX, artigo 2; adaptado (2019)