

Faculdade de Tecnologia de Pindamonhangaba

**PROJETO E FABRICAÇÃO DE VASO DE
PRESSÃO COM USO DE SUPORTE
CERÂMICO**

Aço ASTM A516

Lucas de Souza Martins

**Pindamonhangaba - SP
2021**

Faculdade de Tecnologia de Pindamonhangaba

**PROJETO E FABRICAÇÃO DE VASO DE
PRESSÃO COM USO DE SUPORTE
CERÂMICO**

Aço ASTM A516

Lucas de Souza Martins

Monografia apresentada à Faculdade de
Tecnologia de Pindamonhangaba para
graduação, no Curso Superior de
Tecnologia em Processos de Soldagem.

Área de Concentração: Processos de Soldagem

Orientador(a): Ma. Lúcia de Almeida Ribeiro

**Pindamonhangaba - SP
2021**

M366p Martins, Lucas de Souza.
Projeto e Fabricação de Vaso de Pressão com uso de Suporte
Cerâmico: Aço ASTM A516 / Lucas de Souza Martins / FATEC
Pindamonhangaba, 2021.
116f.; il.

Orientadora: Professora Lucia de Almeida Ribeiro
Monografia (Graduação) – FATEC – Faculdade de Tecnologia
de Pindamonhangaba. 2021

1. Aço. 2. ASTM A-516. 3. Vasos de Pressão. 4. Suportes
Cerâmicos. 5. Processos de Soldagem. I. Martins, Lucas de Souza.
II. Ribeiro, Lucia de Almeida. III. Título.

CDD 669

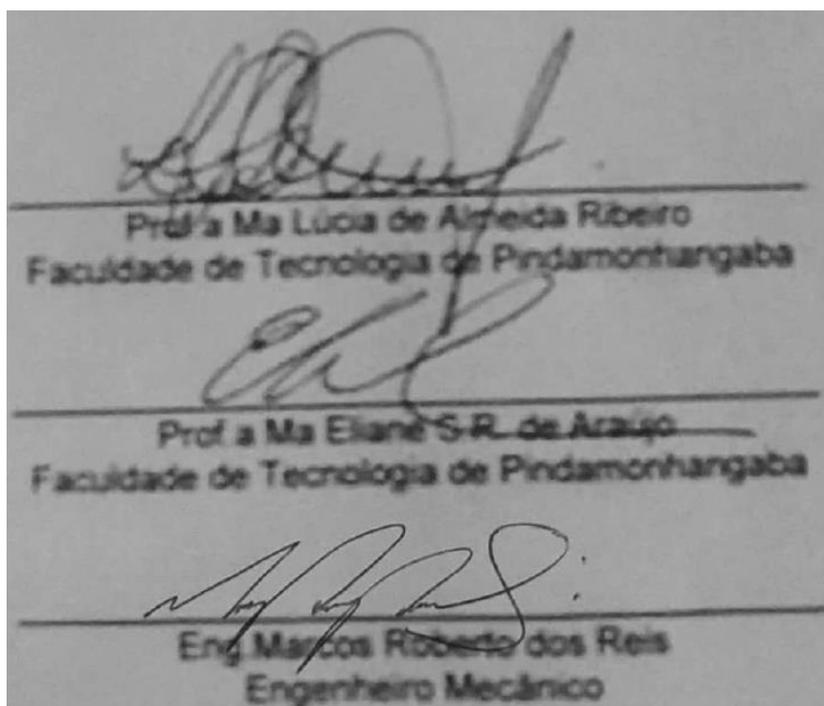
Faculdade de Tecnologia de Pindamonhangaba

**PROJETO E FABRICAÇÃO DE VASO DE
PRESSÃO COM USO DE SUPORTE
CERÂMICO**

Aço ASTM A516

Lucas de Souza Martins

Monografia apresentada à Faculdade de
Tecnologia de Pindamonhangaba para
graduação, no Curso Superior de
Tecnologia em Processos de Soldagem.



Pindamonhangaba, 21 de junho de 2021

DEDICATÓRIA

Lucas de Souza Martins

À professora e amiga Lúcia de Almeida Ribeiro, à minha família e amigos, e a todos os companheiros de classe com quem compartilhei experiências de vida e ensino durante esse período que levarei comigo nessa trajetória.

AGRADECIMENTO

Lucas de Souza Martins

Primeiramente agradeço a DEUS por me permitir chegar ao fim de mais essa batalha vitorioso, mesmo o caminho sendo difícil me deu forças para continuar lutando cada dia mais.

A todos os professores que contribuíram para meu desenvolvimento acadêmico e que me permitiram desfrutar de seus conhecimentos e suas experiências de vida.

Aos meus pais Antônio Romeu Martins e Maria Aparecida de Souza Martins, meus irmãos William de Souza Martins e Camila de Souza Martins, que tanto me apoiaram durante essa caminhada longa e difícil.

A minha namorada Isabela Aparecida dos Santos Rosa, que permaneceu me dando apoio em todos os momentos.

A professora Lúcia de Almeida Ribeiro por todo apoio na orientação deste trabalho, onde não mediu esforços para que essa batalha fosse vencida.

E por fim, aos colegas de classe com quem nesses anos de estudo tive a felicidade de compartilhar horas de estudos e trocar conhecimentos que levarei comigo para o resto da vida.

“Cuidado com gente que não tem dúvida. Gente que não tem dúvida não é capaz de inovar, de reinventar, não é capaz de fazer de outro modo. Gente que não tem dúvida só é capaz de repetir”.

Mario Sergio Cortella

MARTINS, L. S. **Projeto e fabricação de vaso de pressão com uso de suporte cerâmico – Aço ASTM A516**. 2021. 116p. Trabalho de Graduação no Curso de Tecnologia em Processos de Soldagem. Faculdade de Tecnologia de Pindamonhangaba. Pindamonhangaba. 2021.

RESUMO

No momento atual, onde as empresas buscam incessantemente por novas tecnologias a fim de otimizar seus processos produtivos, encontra-se a necessidade de se criar novos métodos de fabricação e novos materiais para atender aos rigorosos requisitos de fabricação predispostos nas normas vigentes para fabricação de vasos de pressão. Este trabalho parte do intuito de se estudar o comportamento do aço ASTM A516 diante dos requisitos encontrados nas normas de fabricação para estes equipamentos, e analisar quais parâmetros se adequam de melhor maneira para os processos de soldagem que serão utilizados para a união das juntas do vaso de pressão. Partindo desse conceito, será avaliado também a usabilidade de suportes cerâmicos para a execução de passes de raiz nas juntas soldadas a fim de aumentar a produtividade e reduzir custos durante esse projeto de fabricação. As EPS's elaboradas para o vaso de pressão com o aço ASTM A516 ficarão à disposição da FATEC de Pindamonhangaba para futuros estudos e análises sobre o comportamento desse material.

Palavras-chave: Aço. ASTM A-516. Vasos de pressão. Suportes Cerâmicos. Processos de Soldagem.

MARTINS, L.S. **Design and Manufacture of Pressure Vessel using ceramic support – ASTM A516 steel**. 2021. 116p. Graduation Project (Welding Processes Course). Faculdade de Tecnologia de Pindamonhangaba. Pindamonhangaba. 2021.

ABSTRACT

At the present time, where companies are constantly looking for new technologies in order to optimize their production processes, there is a need to create new manufacturing methods and new materials to meet the rigorous manufacturing requirements predisposed in current standards for the manufacture of vases depression. This work is based on the intention of studying the behavior of ASTM A516 steel in view of the requirements found in the manufacturing standards for these equipments, and analyzing which parameters are best suited for the welding processes that will be used to join the vessel joints depression. Based on this concept, the use of ceramic supports for the execution of root passes in welded joints will also be evaluated in order to increase productivity and reduce costs during this manufacturing project. The EPS's elaborated for the pressure vessel with ASTM A516 steel will be available to FATEC of Pindamonhangaba for future studies and analyzes on the behavior of this material.

Keywords: Steel. ASTM A-516. Pressure vessel. Ceramic supports. Welding Processes.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Evolução dos processos de soldagem.....	20
Figura 2: Processo de soldagem MIG/MAG	21
Figura 3: Processo de soldagem TIG (tungsten inert gas)	24
Figura 4: Tocha TIG	26
Figura 5: Efeito do tipo de corrente e polaridade na soldagem TIG (esquemática)	29
Figura 6: Especificações AWS para metais de adição adequados à soldagem TIG	30
Figura 7: Processo de soldagem com Arame Tubular com proteção gasosa (FCAW).....	32
Figura 8: Tipos de transferências metálicas.	35
Figura 9: Ensaio não destrutivo por ultrassom	38
Figura 10: Esquematização do ensaio não destrutivo por ultrassom	39
Figura 11: Ondas longitudinais (ondas de compressão).....	41
Figura 12: Ondas transversais (ondas de cisalhamento).....	42
Figura 13: Faixas de frequência das ondas sonoras.....	44
Figura 14: Bloco de calibração V1.....	46
Figura 15: Bloco de calibração V2.....	46
Figura 16: Etapas do ensaio de Líquido Penetrante.....	50
Figura 17: Ensaio de Radiografia	51
Figura 18: Vaso de pressão horizontal	54
Figura 19: Preparação da junta para utilização de suporte cerâmico.....	68
Figura 20: Colagem do suporte cerâmico na junta.	68
Figura 21: Soldagem da junta com o suporte cerâmico.....	69
Figura 22: Remoção do suporte cerâmico e limpeza da junta.....	69
Figura 23: Suporte cerâmico côncavo.	70
Figura 24: Suporte cerâmico retangular.	71
Figura 25: Suporte cerâmico cilíndrico.	71
Figura 26: Croqui do Vaso de Pressão.....	73
Figura 27: Legenda do desenho do Vaso de Pressão.	74
Figura 28: Suporte cerâmico retangular.	76
Figura 29: Espessura dos corpos de prova.	77
Figura 30: Preparação das chapas.	78
Figura 31: Junta protótipo 1.....	78
Figura 32: Junta protótipo número 2.	79
Figura 33: Abertura de raiz.	79
Figura 34: Espessura do nariz da junta.	80
Figura 35: Travamento dos corpos de prova.	80
Figura 36: Passe de raiz com suporte cerâmico.	81
Figura 37: Junta número 1 finalizada.....	82
Figura 38: Passe de selagem.....	83
Figura 39: Junta número 2 (lado 1).	84
Figura 40: Descontinuidades no passe de selagem.....	85
Figura 41: Goivagem da junta número 2.	86
Figura 42: Monitoramento da temperatura para ensaio de LP.	87
Figura 43: Aplicação do Líquido Penetrante.....	88

Figura 44: Aplicação do revelador	89
Figura 45: Laudo final do ensaio de LP	90
Figura 46: Contra solda	91
Figura 47: Passe de raiz com uso do suporte cerâmico	92
Figura 48: Pesagem do consumível durante a soldagem.....	95
Figura 49: Comparação entre contra solda e raiz com suporte.....	96

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ASTM – *American Society for Testing and Materials* (Sociedade Americana para Testes e Materiais)

FCAW- *Flux Cored Arc Welding* (Soldagem a Arco com Arame Tubular)

GMAW- *Gas Metal Arc Welding* (Soldagem a Arco de metal a Gás)

GTAW- *Gas Tungsten Arc Welding* (Soldagem a Gás com Eletrodo de Tungstênio)

SMAW- *Shielded Metal Arc Welding* (Soldagem a Arco com Eletrodo Revestido)

SAW- *Submerged Arc Welding* (Soldagem por Arco Submerso)

ASME- *American Society of Mechanical Engineers* (Sociedade Americana de Engenheiros mecânicos)

ABENDI – Associação Brasileira de Ensaio não Destrutivos e Inspeção

AWS- *American Welding Society* (Sociedade Americana de Soldagem)

A.C – Antes de Cristo

MIG/MAG- *Metal Inert Gas/Metal Active Gas* (Metal Inerte Gás/Metal Ativo Gás)

TIG- *Tungsten Inert Gas* (Tungstênio Inerte Gás)

Hz- Herz

AISI- *American Iron and Steel Institute* (Instituto Americano de Ferro e Aço)

SAE- *Society of Automotive Engineers* (Sociedade de Engenheiros Automotivos)

UNS- *Unified Numbering System* (Sistema de Numeração Unificado)

LP- Líquido Penetrante

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Componentes da tocha TIG	27
Tabela 2: Classificação dos eletrodos para soldagem TIG	30
Tabela 3: Velocidade das ondas sonoras nos materiais.....	42
Tabela 4: Velocidade de propagação das ondas transversais	43
Tabela 5: Classificação dos aços de acordo com o sistema SAE/AISI	58
Tabela 6: Graduações do aço ASTM A-516	63
Tabela 7: Espessura das chapas fornecidas de acordo com a norma ASTM.....	64
Tabela 8: Composição química do aço ASTM A516	65
Tabela 9: Requisitos de resistência mecânica do aço ASTM A516.....	66
Tabela 10: Comparação do tempo de soldagem.	94

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	17
1.1 PROBLEMA	17
1.2 OBJETIVOS.....	17
1.2.1 Objetivo geral	17
1.2.2 Objetivos específicos.....	17
1.3 JUSTIFICATIVA	18
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	19
2.1 SOLDAGEM	19
2.2 SOLDAGEM PELO PROCESSO MIG/MAG	20
2.2.1 Características do processo	21
2.2.2 Restrições do processo.....	22
2.3 SOLDAGEM PELO PROCESSO TIG	23
2.3.1 Equipamentos para soldagem TIG	25
2.3.1.1 Tocha TIG.....	25
2.3.1.2 Tipos de gás de proteção	27
2.3.1.3 Bocais	28
2.3.2 Características elétricas.....	28
2.3.3 Classificação e seleção de consumíveis	29
2.4 PROCESSO DE SOLDAGEM POR ARAME TUBULAR (<i>Flux Cored Arc Welding – FCAW</i>).....	31
2.4.1 Histórico do processo.....	31
2.4.2 Gases de proteção	33
2.4.3 Vantagens do processo.....	33
2.4.4 Limitações do processo	34
2.4.5 Tipos de transferência metálica	34
2.5 ENSAIOS NÃO DESTRUTIVOS	35
2.5.1 Histórico do processo.....	35
2.5.2 Ensaio Visual.....	37
2.5.2.1 Conceitos básicos do ensaio.....	37
2.5.3 Ultrassom	38
2.5.3.1 Conceitos básicos do ensaio.....	38
2.5.3.2 Finalidades do ensaio.....	39
2.5.3.3 Natureza das Ondas Ultrassônicas.....	39
2.5.3.4 Tipos de ondas ultrassônicas e suas aplicações	41

2.5.3.5	Frequência.....	44
2.5.3.6	Calibração do equipamento.....	44
2.5.3.7	Características de calibração da aparelhagem.....	47
2.5.4	Ensaio de Líquido Penetrante.....	48
2.5.4.1	Conceitos básicos do ensaio.....	48
2.5.4.2	Vantagens do ensaio.....	48
2.5.4.3	Limitações do ensaio.....	49
2.5.4.4	Aplicações do ensaio.....	49
2.5.5	Ensaio não destrutivo por Radiografia.....	51
2.5.5.1	Conceitos básicos do ensaio.....	51
2.5.5.2	Vantagens do ensaio.....	52
2.5.5.3	Limitações do ensaio.....	52
2.6	VASOS DE PRESSÃO.....	52
2.6.1	Principais formatos de vasos de pressão.....	53
2.7	AÇO.....	55
2.7.1	Tipos de aço.....	55
2.7.2	Classificação dos aços.....	56
2.8	NORMAS DE FABRICAÇÃO.....	59
2.8.1	ASME Seção VIII, Divisão 1.....	61
2.8.1.1	Tensões admissíveis segundo ASME Seção VIII, Divisão 1.....	61
2.8.2	ASME Seção VIII, Divisão 2.....	62
2.8.2.1	Tensões admissíveis segundo ASME Seção VIII, Divisão 2.....	62
2.9	ESPECIFICAÇÃO ASTM PARA AÇO A-516.....	63
2.9.1	Especificação para chapas de aço carbono destinadas principalmente para serviços em vasos de pressão soldados.....	63
2.9.1.1	Requisitos para compras de chapas ASTM A-516 de acordo com a norma.....	64
2.9.1.2	Requisitos de fabricação para chapas de aço ASTM A-516.....	64
2.9.1.3	Requisitos de tratamento térmico do aço ASTM A-516.....	64
2.9.1.4	Requisitos de composição química do aço ASTM A516.....	65
2.9.1.5	Requisitos de resistência mecânica do aço ASTM A516.....	66
2.10	SUPORTE CERÂMICO PARA SOLDAGEM.....	66
2.10.1	Tipos de suportes cerâmicos.....	70
3	MATERIAIS E MÉTODOS.....	72
4	ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS.....	92
5	CONCLUSÃO.....	97

REFERÊNCIAS	98
APÊNDICE 1 EPS	101
APÊNDICE 2 RQTS	108
APÊNDICE 3 RQPS	110

1 INTRODUÇÃO

Os vasos de pressão são equipamentos utilizados em grande escala nas indústrias em geral como refinarias de petróleo, petroquímicas e indústrias farmacêuticas, assim como indústrias alimentícias que também se beneficiam do uso de vasos de pressão. Os vasos de pressão variam de projetos muito simples como pequenos reservatórios que utilizamos no dia-a-dia (compressores, botijões de gás, extintores de incêndio), ou projetos mais complexos como reservatórios de óleo e gás, trocadores de calor e caldeiras.

1.1 PROBLEMA

O aço que será utilizado como objeto de estudo para o trabalho é o aço ASTM A516 Grau 70 que em geral é aplicado para confecção de vasos de pressão. Todas as especificações estão de acordo com a norma ASTM.

Inicialmente, os estudos mais aprofundados serão com base nos processos de soldagem e em suas características peculiares que variam de um para outro. Como existem diferentes processos de soldagem para os mais variados tipos de aplicações, os processos definidos para este estudo serão o FCAW (*Flux Cored Arc Welding*-arame tubular), cuja utilização se difundiu em grande escala nas últimas décadas por seu alto rendimento e desempenho, o processo GMAW (*Gas Metal Arc Welding*-MIG/MAG) e o processo GTAW (*Gas Tungsten Arc Welding*-TIG), capazes de proporcionar cordões de solda com alta qualidade e baixo índice de descontinuidades para passes de raiz.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo geral

Este trabalho terá como seu principal objetivo a elaboração de um projeto de vaso de pressão, cujo processo será embasado diante de todas as normas que regem este processo de fabricação, seguindo as especificações requeridas do material e dos processos de soldagem que serão utilizados, e por fim será avaliado a viabilidade do uso de suportes cerâmicos para redução de custos e prazo do projeto.

1.2.2 Objetivos específicos

Após a elaboração dos procedimentos de soldagem embasados nas EPS's, RQTS e RQPS, deverá ser definido o uso dos suportes cerâmicos para a execução das soldas do

Vaso de Pressão, respeitando as determinações recomendadas pelo fabricante. A viabilidade ou não de seu uso, irá depender do quanto isso poderá agregar no projeto em relação ao seu custo e seu tempo de fabricação.

1.3 JUSTIFICATIVA

Essa pesquisa foi elaborada com o princípio de se avaliar a complexidade de um projeto de um Vaso de Pressão, levando em consideração todos os setores que podem ser envolvidos no projeto, em específico sendo feito um estudo dentre os procedimentos de soldagem utilizados em um projeto dessa dimensão.

As empresas desse setor buscam cada vez mais o aumento da competitividade no mercado e a redução nos custos de seus projetos. Analisando este ponto, novos materiais e novos métodos de fabricação estão sendo elaborados a cada dia, e a utilização dos suportes cerâmicos para soldagem é um recurso que está sendo aproveitado com intuito de melhorar cada vez mais os procedimentos de soldagens.

Sabendo disso, este trabalho irá avaliar a viabilidade desse recurso em projetos de vasos de pressão para que futuros trabalhos possam se embasar com os resultados obtidos e dos procedimentos elaborados para as execuções das soldagens do projeto.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 SOLDAGEM

De acordo com Abendi (2012) a soldagem está intimamente ligada as mais diversas e importantes atividades industriais que existem por todo mundo moderno, como os setores de construção naval, ferroviária, aeronáutica, automobilística, caldeiraria, tubulação de aço, construção civil metálica, indústria metalúrgica, mecânica e elétrica. Isso representa uma grande proporção dentre os diversos processos de fabricação existentes no mundo moderno.

Classicamente, a soldagem é considerada como um processo de união, porém, na atualidade, muitos processos de soldagem ou variações destes são usados para a deposição de material sobre uma superfície, visando à recuperação de peças desgastadas ou para a formação de um revestimento com características especiais. Diferentes processos relacionados com a soldagem são usados para corte de peças metálicas e em muitos aspectos estas opções se assemelham a operações de soldagem (MARQUES, 2009).

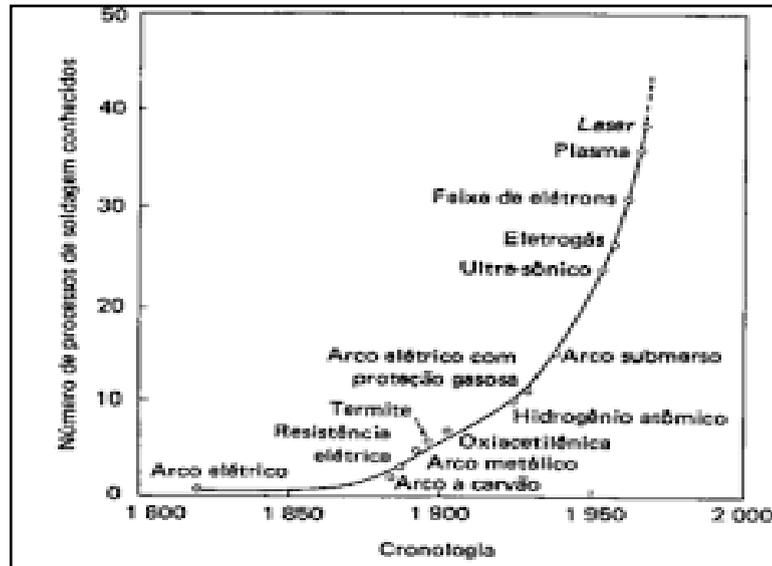
Denomina-se soldagem ao processo de união entre duas partes metálicas, usando uma fonte de calor, com ou sem aplicação de pressão. A solda é o resultado desse processo (WAINER, BRANDI, MELLO, 2015).

Para Marques et al. (2009), a soldagem é o mais importante processo de união de metais utilizado industrialmente. Este método de união pode ser considerado em conjunto com a brasagem, um dos mais importantes métodos de fabricação desde a indústria microeletrônica até a construção de navios e outras estruturas com centenas ou milhares de toneladas de peso. Portanto a soldagem pode ser utilizada na fabricação de estruturas simples, como grades e portões, assim como em componentes encontrados em aplicações com elevado grau de responsabilidade, como nas indústrias química, petrolífera e nuclear, e também na criação de peças de artesanato, joias e de outros objetos de arte.

O processo de soldagem teve seu grande impulso durante a segunda II Guerra Mundial, devido a fabricação de navios e aviões soldados, apesar de o arco elétrico ter sido desenvolvido no século XIX (WAINER, BRANDI, MELLO, 2015).

A Figura 1 mostra a evolução dos processos de soldagem ao longo do tempo.

Figura 1: Evolução dos processos de soldagem.



Fonte: (WAINER, BRANDI, MELLO, 2015)

Para Santos (2015), a descoberta da soldagem inicia-se, como vimos, no ano de 1800, porém existem relatos de que esses tipos de processos eram utilizados muito antes, por volta de 4000 A.C onde eram executadas soldagem por brasagem e forjamento.

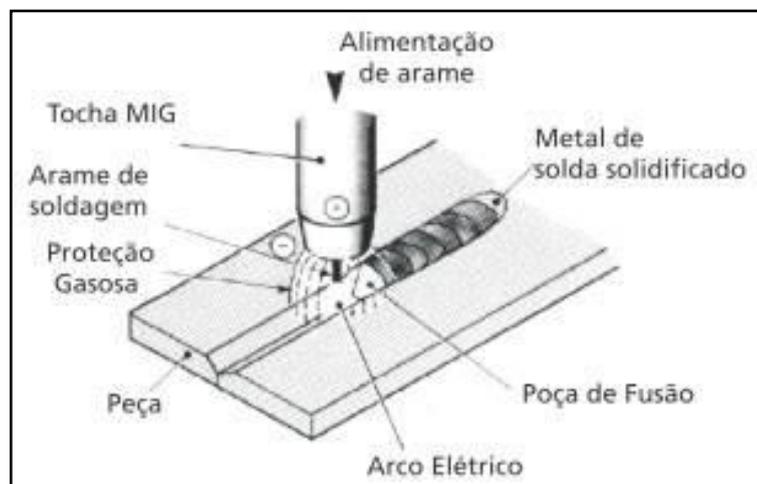
Com a descoberta do arco elétrico, o processo de soldagem ganhou um avanço muito grande em relação à chama produzida pelo oxiacetileno, que também melhorou a energia localizada para fundir o material. Essa criação utilizava um carvão fixado num suporte de eletrodo, que, ligado a um polo positivo e aproximado de um polo negativo, gerava um arco elétrico, que tinha uma temperatura muito alta e conseguia fundir o material ali colocado (SANTOS, 2015).

2.2 SOLDAGEM PELO PROCESSO MIG/MAG

Na soldagem ao arco elétrico com gás de proteção (GMAW – *Gas Metal Arc Welding*), também conhecida como soldagem MIG/MAG (MIG – *Metal Inert Gas* e MAG – *Metal Active Gas*), um arco elétrico é estabelecido entre a peça e um consumível na forma de arame. O arco funde continuamente o arame à medida que este é alimentado à poça de fusão. O metal de solda é protegido da atmosfera pelo fluxo de um gás (ou mistura de gases) inerte ou ativo.

A Figura 2 ilustra esquematicamente o processo de soldagem MIG/MAG.

Figura 2: Processo de soldagem MIG/MAG



Fonte: <https://construfacilrj.com.br/processos-de-soldagem-solda-mig-mag/>

O processo MIG/MAG pode ser aplicado de forma automática, quando o movimento da tocha é feito por uma máquina, ou semiautomática, quando a tocha é conduzida manualmente pelo operador (SCOTTI e PANOMAREV, 2008).

O processo MIG é adequado à soldagem de aços-carbono, aços de baixa, média e alta liga, aços inoxidáveis, alumínio e ligas, magnésio e ligas e cobre e ligas. O processo MAG é utilizado na soldagem de aços de baixo carbono e aços de baixa liga (WAINER; BRENDI; MELLO, 2015).

O gás de proteção tem a função de evitar contaminação do arame, das gotas de metal fundido em transferência e da poça de fusão pelos gases da atmosfera. Este gás tem também o papel de ser o meio ionizante, conferindo as propriedades de estabilidade do arco e controlando a transferência metálica, consumo do eletrodo e fusão do metal de base. Como o arame-eletrodo é energizado a partir do bico de contato no sentido da chapa, o comprimento do eletrodo é sempre curto (na prática, de 8 a 25mm). A alimentação do arame-eletrodo, embobinado em um carretel na forma mais convencional de trabalho, se dá por roletes do alimentador de arame, que o impulsiona até a saída da tocha a uma velocidade regulada e rigorosamente constante (SCOTTI e PANOMAREV, 2008).

2.2.1 Características do processo

As características principais do processo MIG/MAG se dão pela elevada taxa de fusão do arame-eletrodo, a possibilidade da variação de modos com que a transferência metálica se dá e a relativa portabilidade da tocha, podendo haver modo de transferência por curto circuito, globular ou transferência por névoa (*spray*). A possibilidade de se alterar o modo de transferência metálica permite a execução da soldagem em variadas posições. Para Scotti (2008), este processo ainda gera relativamente poucos fumos e pouca escória, comparativamente aos processos que usam a escória como meio de proteção.

O pequeno comprimento do eletrodo permite o uso de uma alta densidade de corrente sem afetar a rigidez mecânica do eletrodo por aquecimento ao longo de seu comprimento. Os seus diâmetros pequenos conferem um arco elétrico concentrado e de alto poder de fusão do metal base. Estas são as principais razões de se creditar ao processo MIG/MAG uma alta capacidade de produção. O fato de a alimentação ser contínua possibilita aumentar o ciclo de trabalho, o que confere ao MIG/MAG maior produtividade (SCOTTI e PANOMAREV, 2008).

2.2.2 Restrições do processo

As restrições mais importantes do processo seriam uma alta emissão de calor e luz, relativa dificuldade de manuseio do equipamento como um todo e a necessidade de se conhecer como se regula os parâmetros para trabalhar com estabilidade.

A regulagem da corrente, por exemplo, torna-se um fator de limitação quando a partir de um valor em que tanto o arco, quanto o modo de transferência se tornariam instáveis. Uma corrente muito baixa dificulta a manutenção do arco, principalmente pela transferência errática. Uma corrente muito alta, aplicada em proporção crescente com o diâmetro do eletrodo, faz com que as gotas sejam lançadas com componente de direção radial e em grandes velocidades, caracterizadas com grande quantidade de respingos (SCOTTI e PANOMAREV, 2008).

Outros aspectos restritivos do processo MIG/MAG relacionados com a regulagem dos parâmetros estão ligados à inter-relação deles.

De acordo com Scotti. (2008) “A corrente, fator importante na definição do modo de transferência, tem de ser compatível com a velocidade de alimentação do arame, mas é dependente do comprimento do arco e da distância bico de contato-peça”.

O comprimento do arco, que por sua vez também governa o modo de transferência, é dependente da velocidade de alimentação do arame, da corrente e da tensão de soldagem. Finalmente, a relação entre a tensão de arco e a corrente de soldagem é função também das características construtivas das fontes. Esta complexa inter-solução, é dependente da composição química e diâmetro do arame-eletrodo, do tipo de gás de proteção, assim como do metal de base e da geometria do chanfro e faz com que regulagens de parâmetros tenham que ser rigorosas o bastante para conduzirem às soldagens com qualidade satisfatória (SCOTTI e PANOMAREV, 2008).

Outras desvantagens do processo são:

- Procedimento de ajuste mais complexo do que o processo SMAW;
- Equipamento mais complexo e de maior preço;
- Apresenta limitação para soldar juntas de difícil acesso;
- A proteção do arco é sensível a correntes de ar;
- Pode gerar uma quantidade considerável de respingos se não regulada corretamente.

2.2.3 Vantagens do processo

Uma das principais vantagens do processo GMAW é a facilidade de escolha dos equipamentos, sendo que um conjunto de soldagem pode ser facilmente configurado, sendo composto por uma fonte de energia que tem como papel fornecer a corrente de soldagem para o processo GMAW. Na maioria das vezes possui curva característica de saída de tensão constante, podendo ser fabricada com diversos tipos de tecnologia para controle da tensão, como chaves comutadoras, controle tiristorizado ou através de inversores. Os inversores por sua vez possuem um melhor desempenho principalmente por seus atributos, que possibilitam baixo consumo de energia, redução de peso e dimensões e possibilidade de alterar a forma de onda de saída através da interpretação de sinais digitais.

Outras vantagens do processo são:

- Taxa de deposição maior do que o processo por Eletrodo Revestido;
- Menos emissão de gases e fumaça durante a soldagem;
- Larga escala de aplicação;
- Solda amplas faixas de espessura e uma gama diversa de materiais.

2.3 SOLDAGEM PELO PROCESSO TIG

De acordo com Abendi (2017), é o processo de soldagem a arco elétrico com eletrodo não consumível de tungstênio ou liga de tungstênio sob uma proteção gasosa de gás inerte ou mistura de gases inertes. Pode ou não ser utilizado material de adição.

Aplica-se esse processo para a soldagem de todos os tipos de juntas e chapas, principalmente de espessuras menores que 10 mm. É adequado para quase todos os tipos de metais como titânio, zircônia, ligas de alumínio e magnésio, inoxidáveis, ligas de níquel e ligas especiais. O seu processo é aplicado para soldagem de tubos, chapas e reparos, pois, com aplicação de adição de material, facilita esse procedimento (SANTOS, 2015).

O processo TIG (*tungsten inert gas*), utiliza como fonte de calor um arco elétrico gerado e mantido entre um eletrodo não consumível de tungstênio e a peça a ser soldada. A proteção da região da soldagem é feita por um fluxo constante de gás inerte sob a poça de fusão.

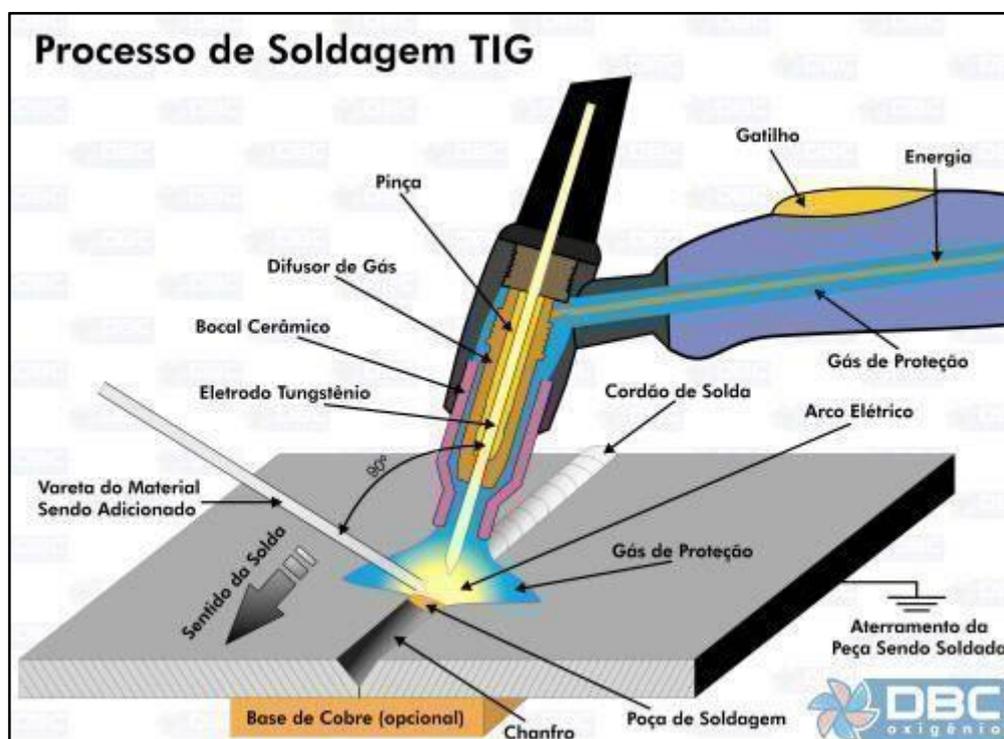
Este processo foi patenteado no fim dos anos 20, porém só foi comercialmente utilizado em 1942, nos Estados Unidos, para a soldagem em ligas de magnésio de assentos de aviões. A princípio utilizou-se o gás hélio e a corrente contínua, devido à dificuldade de estabilizar o arco, posteriormente superada (WAINER, BRANDI, MELLO, 2005).

Atualmente o processo TIG é mais utilizado na soldagem de ligas de alumínio, de magnésio, de titânio, e aços inoxidáveis, entre outros. A solda produzida é de muito boa qualidade (WAINER, BRANDI, MELLO, 2005).

A soldagem pode ser feita com ou sem metal de adição (solda autógena). Quando é feita com metal de adição, ele não é transferido através do arco, mas é fundido pelo arco, não fazendo, portanto, parte do circuito elétrico de soldagem (ABENDI, 2017).

A Figura 3 mostra esquematicamente este processo.

Figura 3: Processo de soldagem TIG (*tungsten inert gas*)



Fonte: <http://guias.oxigenio.com/processo-de-soldagem-tig>

2.3.1 Equipamentos para soldagem TIG

Os equipamentos básicos usados na soldagem TIG consistem de uma fonte de energia elétrica, uma tocha de soldagem apropriada, uma fonte de gás protetor, um dispositivo para abertura do arco, cabos e mangueiras (MARQUES, MODENESI, BRACARENSE, 2005).

Segundo Santos (2015), as fontes de energia ou fontes de soldagem são consideradas a fonte de alimentação elétrica para a alimentação do arco voltaico utilizado no processo de soldagem. As duas condições básicas de uma fonte de soldagem são:

- Produzir saída de alta corrente e baixa tensão e com características específicas para o processo;
- Permitir o controle adequado dos valores de corrente e de tensão para o controle do arco elétrico de acordo com a aplicação.

A soldagem TIG é usualmente um processo manual, mas pode ser mecanizado e até mesmo automatizado.

É sempre de corrente constante e pode ser um gerador, retificador ou transformador, dependendo do metal a ser soldado. Ela deve ter uma adaptação para soldagem manual, com um pedal para controle de corrente pelo soldador, com este recurso, o rechupe que se forma na cratera no final da soldagem é minimizado. Conforme o tipo de aplicação, a fonte de energia pode ser mais aprimorada, como o uso do arco pulsado em corrente contínua (WAINER, BRANDI, MELLO, 2005).

2.3.1.1 Tocha TIG

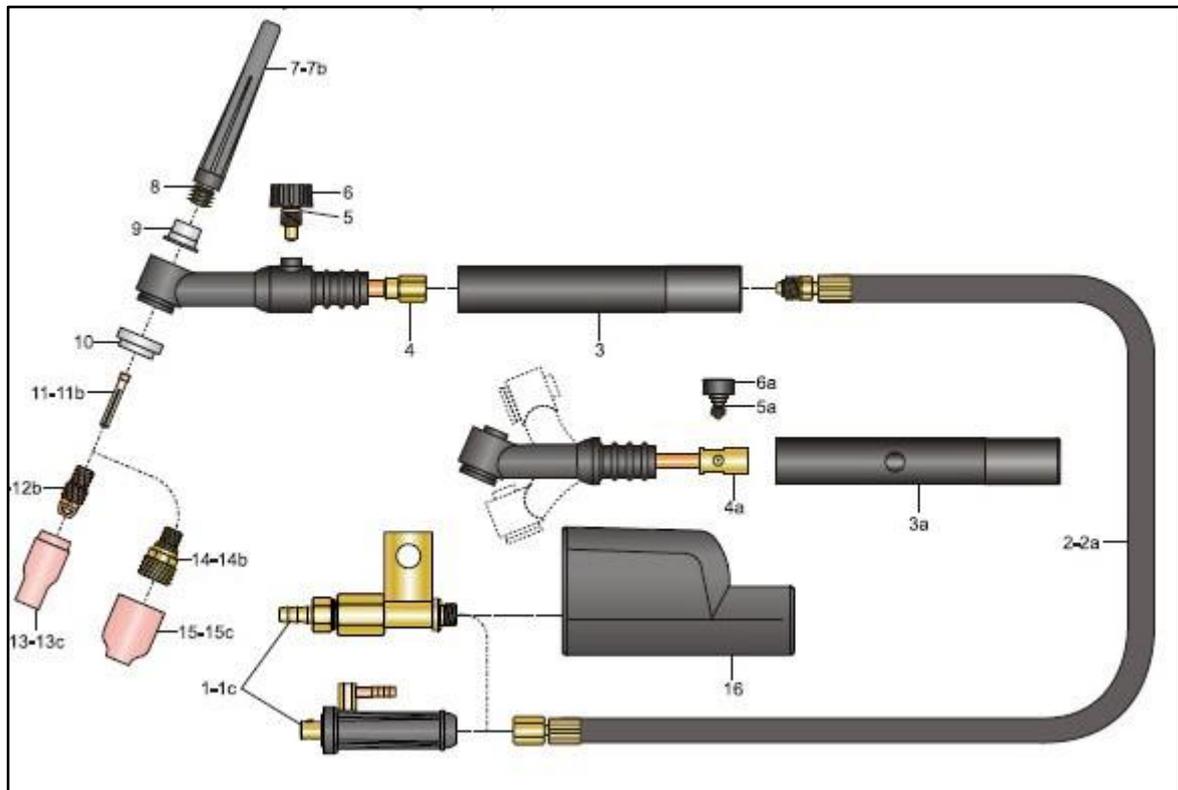
É o dispositivo que fixa o eletrodo de tungstênio, conduz a corrente elétrica e proporciona a proteção gasosa necessária à região circundante do arco elétrico e a poça de fusão. A tocha TIG para soldagem manual pode ser refrigerada por ar ou água (WAINER, BRANDI, MELLO, 2005).

A tocha de soldagem tem como função suportar o eletrodo de tungstênio e fornecer o gás de proteção de forma apropriada.

As tochas TIG possuem internamente uma pinça, que serve para segurar o eletrodo de tungstênio e fazer o contato elétrico e que deve ter um tamanho adequado para cada diâmetro do eletrodo. Elas possuem ainda bocais para direcionamento do gás, que podem ser cerâmicos ou metálicos e são fornecidos em diversos diâmetros (MARQUES, MODENESI, BRACARENSE, 2005).

A Figura 4 mostra uma tocha típica para soldagem TIG.

Figura 4: Tocha TIG



Fonte: <https://www.oxibam.com.br/index-equip-acessorios-tig-09.htm>

Na Tabela 1 poderemos observar cada componente descrito na Figura 4.

Tabela 1: Componentes da tocha TIG

Componentes				
pos.	descrição	código	pos.	descrição
Componentes básicos				
1	conector ER 9-GL.	WM 774*	5a	anel O'ring da válvula TN 12VF.
2	cabo de corrente; 3,5m.	TJ 598*	6a	válvula TN 12VF.
3	punho TIG.	TH 569*	7a	capa de eletrodo; curta.
4	corpo TN 12V.	TA 023*	7b	capa de eletrodo; média.
5	anel O'ring.	TL 723	11a	pinça 2,4mm.
6	válvula TN 12V.	TP 925*	11b	pinça 3,2mm.
7	capa de eletrodo; longa.	TF 502*	12a	corpo fixador 2,4mm.
8	anel O'ring.	TL 723	12b	corpo fixador 3,2mm.
9	inserte.	TD 404	13	bocal de cerâmica 6,5mm (nº4).
10	isolador.	TD 400	13a	bocal de cerâmica 8mm (nº5).
11	pinça 1,6mm.	TC 201*	13b	bocal de cerâmica 9,5mm (nº6).
12	corpo fixador 1,6mm.	TB 051*	16	Canopla Protetora Isolante.
13c	bocal cerâmica 11mm (nº7).	TE 423*		Componentes "Gás Lens"
Componentes opcionais				
1a	conector ER 13-GL.	WM 772		
1b	conector ER 13-GA.	WM 779		
1c	conector US.	TM 779		
2a	cabo de corrente; 7m.	TJ 599		
3a	punho TN 12VF.	TH 571		
4a	corpo TN 12VF.	TA 038		
* fornecido como padrão				
Componentes "Gás Lens"				
pos.	descrição	código	pos.	descrição
Componentes "Gás Lens" *				
14	difusor gás lens 1,6mm.	TB 100	15a	bocal de cerâmica gás lens 8mm (nº5).
14a	difusor gás lens 2,4mm.	TB 101	15b	bocal de cerâmica gás lens 9,5mm (nº6).
14b	difusor gás lens 3,2mm.	TB 102	15c	bocal de cerâmica gás lens 11mm (nº7).
15	bocal de cerâmica gás lens 6,5mm (nº4).	TE 466		

Fonte: <https://www.oxibam.com.br/index-equip-acessorios-tig-09.htm>

2.3.1.2 Tipos de gás de proteção

Os gases mais utilizados na soldagem TIG são o argônio, o hélio ou suas misturas. Qualquer que seja o gás de proteção, sua pureza deve ser 99,99%. A utilização de argônio, hélio ou a mistura de ambos vai depender do tipo de liga que se está soldando e das características de soldagem (WAINER, BRANDI, MELLO, 2005).

Os gases de proteção usados na soldagem TIG são inertes, principalmente o argônio, o hélio ou a mistura destes. Em alguns casos são usadas misturas especiais como as que contêm hidrogênio, que podem ser usadas na soldagem de aços inoxidáveis, e as que contem nitrogênio, opcionais na soldagem de cobre e suas ligas (MARQUES, MODENESI, BRACARENSE, 2005).

Segundo Abendi (2017), o argônio é muitas vezes preferido em relação ao hélio porque apresenta várias vantagens como:

- Ação do arco mais suave e sem turbulências.
- Menor tensão no arco para uma dada corrente e comprimento de arco.
- Maior ação de limpeza na soldagem de materiais como alumínio e magnésio, em corrente alternada.
- Menor custo e maior disponibilidade.
- Menor vazão de gás para uma boa proteção (na posição plana).
- Melhor resistência à corrente de ar transversal.
- Mais fácil à iniciação do arco.

2.3.1.3 Bocais

De acordo com Mello et al. (2005), os bocais tem a finalidade de direcionar o gás de proteção, portanto a escolha do bocal correto de acordo com seu diâmetro deve ser feita com cuidado, para assegurar ao gás de proteção um escoamento o mais laminar possível, para uma dada vazão.

Dispositivos especiais podem ser usados nas tochas para melhorar a eficiência da proteção gasosa em situações especiais como os “*gas lens*”, que são telas com malha bastante fina, colocada entre o eletrodo e o bocal, para garantir um fluxo de gás laminar e os “*trailing shields*”, que consistem de um segundo bocal para a saída de gás, geralmente comprido e colocado atrás da tocha, visando proteger uma área maior do cordão de solda, durante o resfriamento pós-soldagem (MARQUES, MODENESI, BRACARENSE, 2005).

Os bocais podem ser metálicos ou feitos de cerâmica (alumínio ou lava) ou quartzo fundido. De todos os tipos, o metálico é o único que tem uso restrito, não devendo ser utilizado com corrente de alta frequência (WAINER, BRANDI, MELLO, 2005).

2.3.2 Características elétricas

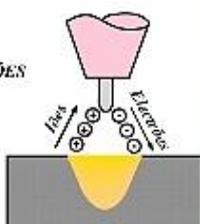
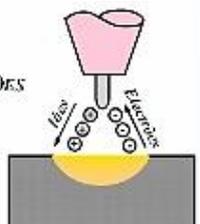
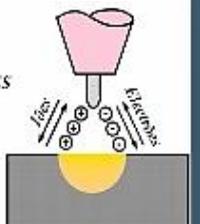
Como citado por Mello et al. (2005), no caso do uso de corrente contínua com polaridade direta (eletrodo no negativo) há um fluxo de elétrons na direção do metal-base e um fluxo de íons positivos na direção do eletrodo. Como os elétrons incidem no metal-base, este se torna mais aquecido que o eletrodo.

No caso da corrente contínua de polaridade reversa (eletrodo positivo), o fluxo de elétrons vai na direção do eletrodo e o fluxo de íons positivos na direção do metal-base. Neste caso, como os elétrons incidem no eletrodo, aquecendo-o, ele deve ter diâmetro maior do que um eletrodo na polaridade direta. Acredita-se que o fluxo de íons positivos tenha efeito de limpeza, devido ao choque deles com a camada de óxido. Como os íons de argônio são mais pesados dos que os do hélio, explica-se dessa maneira o efeito de limpeza bem maior do argônio. A penetração neste caso é pequena e larga (WAINER, BRANDI, MELLO, 2005).

Como podemos observar, a corrente de soldagem é selecionada diretamente na fonte de energia. Quanto maior a corrente, maior é a penetração e a largura do cordão.

A Figura 5 mostra algumas características da soldagem feitas com os diferentes tipos de corrente e polaridade.

Figura 5: Efeito do tipo de corrente e polaridade na soldagem TIG (esquemática)

TIPO DE CORRENTE	DC	TIPO DE CORRENTE	DC	TIPO DE CORRENTE	AC
TIPO DE POLARIDADE	Negativa	TIPO DE POLARIDADE	Positivo	TIPO DE POLARIDADE	-
ESCOAMENTO DE ÍONS E DE ELECTRÕES					
PENETRAÇÃO					
ACÇÃO DE LIMPEZA DOS ÓXIDOS	Não	Sim	Sim Em cada meio ciclo		
DISTRIBUIÇÃO DE CALOR NO ARCO	70% na Peça 30% no Electrodo	30% na Peça 70% no Electrodo	50% na Peça 50% no Electrodo		
PENETRAÇÃO	Profunda e estreita	Baixa e larga	Média		
CAPACIDADE ELÉCTRICA	Excelente (400 Amp. - 3,18 mm)	Baixa (120 Amp. - 6,35 mm)	Boa (225 Amp. - 3,18 mm)		

Fonte: <https://www.slideshare.net/zeknha/apresentao-sobre-tig-68581982>

2.3.3 Classificação e seleção de consumíveis

Segundo Abendi (2017), uma ampla variedade de metais e ligas está disponível para utilização como metais de adição no processo de soldagem TIG.

O metal de adição é muito importante, pois a escolha correta dará como resultado um cordão de solda com características ideais para o projeto calculado. Para atender essas necessidades a norma AWS A5. 18-79 traz as informações sobre os metais de adição, chamados de eletrodo nu, que pode ser fornecido em vareta ou em bobina, de acordo com o processo, seja ele manual ou automático (SANTOS, 2015).

Para Mello (2005), o processo TIG utiliza um eletrodo teoricamente não-consumível. O metal utilizado para a composição desse eletrodo é o tungstênio, que alia seu elevado ponto de fusão (341°C) a um alto poder emissor de elétrons. Já os eletrodos com adição de tória e zircônia atingem valores maiores de corrente do que o eletrodo de tungstênio puro.

Na Tabela 2 podemos observar a classificação quanto a composição química de cada eletrodo utilizado na soldagem TIG.

Tabela 2: Classificação dos eletrodos para soldagem TIG

Classificação AWS	Tungstênio % mínimo	Tório %	Zircônio %	Outros % máximo	Cor de identificação
EWP	99,5	-	-	0,5	Verde
EWTh-1	98,5	0,8-1,2	-	0,5	Amarelo
EWTh-2	97,5	1,7-2,2	-	0,5	Vermelho
EWTh-3	98,95	0,35-0,55	-	0,5	Lilás
EWZr	92,2	-	0,15-0,40	0,5	Marrom

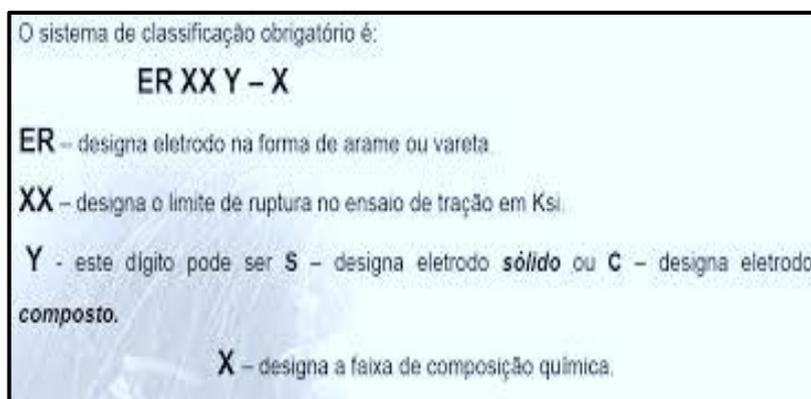
Fonte: <https://www.docsity.com/pt/apostila-senai-solda-tig/4773426/>

De acordo com Bracarense (2005), metais de adição estão disponíveis numa ampla faixa de materiais e ligas. Geralmente a composição química de metais de adição tem limites de tolerância muito inferiores aos de metal de base do mesmo tipo e custo bem mais elevado.

A escolha do metal de adição para uma determinada aplicação é feita em função da composição química e das propriedades mecânicas desejadas para a solda. Em geral se usa metal de adição similar à do metal de base, mas não necessariamente idêntica. Fatores como compatibilidade metalúrgica, adequabilidade à operação e custo também devem ser considerados (MARQUES, MODENESI, BRACARENSE, 2005).

Eles são classificados de acordo com sua composição química e com as propriedades mecânicas do metal depositado. A Figura 6 apresenta as principais normas para a classificação da AWS para metais de adição para a soldagem TIG.

Figura 6: Especificações AWS para metais de adição adequados à soldagem TIG



Fonte: https://docente.ifsc.edu.br/anderson.correia/MaterialDidatico/Eletromecanica/Modulo_2/Processos_de_Soldagem/Soldagem%20TIG.pdf

2.4 PROCESSO DE SOLDAGEM POR ARAME TUBULAR (*Flux Cored Arc Welding – FCAW*)

2.4.1 Histórico do processo

Segundo Infosolda (2020), data da década de 30 o princípio da utilização de proteção gasosa nas operações de soldagem, a fim de solucionar problemas da contaminação atmosférica nas soldas de materiais reativos (alumínio, titânio e ligas de magnésio), tendo dado origem ao processo TIG (*Tungsten Inert Gas*).

Utilizando o mesmo princípio de funcionamento do processo TIG, ou seja um arco elétrico estabelecido entre um eletrodo e a peça, envolto por uma atmosfera protetora de gás inerte, surgiu em 1948 o processo MIG, o qual difere do anterior por utilizar um eletrodo consumível de alimentação contínua.

Inicialmente este processo era utilizado para ligas altamente reativas, pois a utilização de gases inertes tornava seu custo elevado para utilização em aços carbono e baixa liga. Quando da introdução do CO₂ como gás de proteção foi descoberta, mostrou-se então um processo bem aceito para soldagem de aço carbono e baixa liga, uma vez que barateou o custo do procedimento. No início apenas arame sólido era utilizado e somente por volta dos anos 50 foi introduzido o uso de Arame Tubular com proteção gasosa.

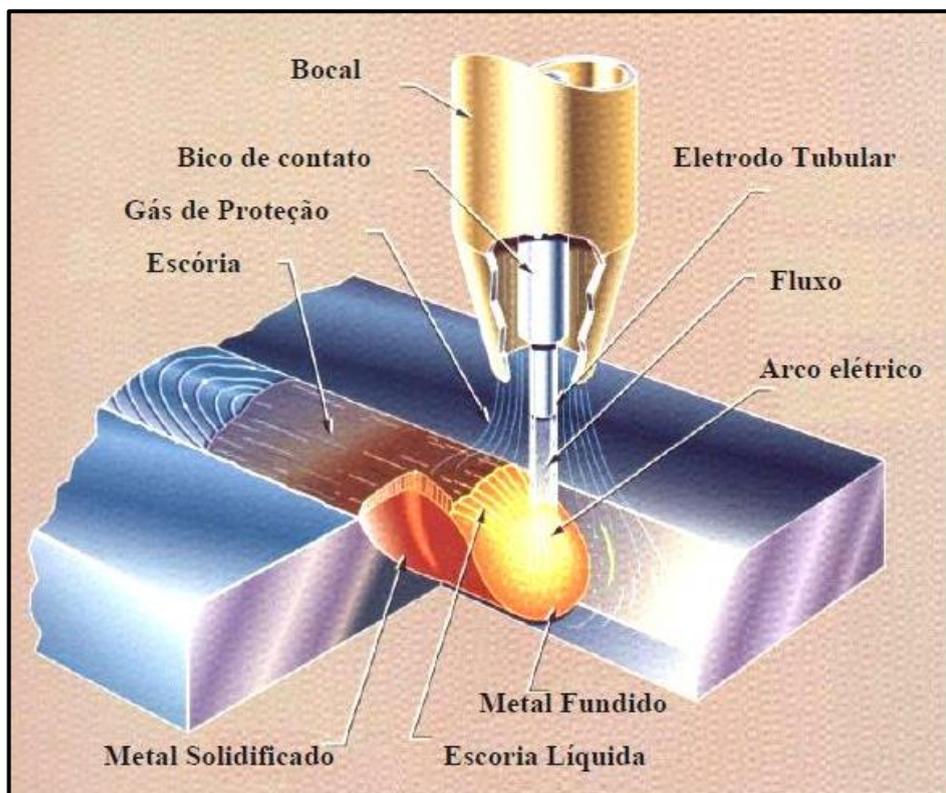
O processo de soldagem com arames tubulares é o processo no qual a coalescência dos metais é resultante do aquecimento destes por um arco elétrico estabelecido entre um eletrodo tubular contínuo e a peça. O eletrodo tubular apresenta internamente um fluxo que exerce as funções de estabilizar o arco e ajustar a composição química desejada na solda. O processo apresenta duas variações principais:

- Soldagem auto- protegida, em que o fluxo interno fornece toda a proteção necessária na região do arco.
- Soldagem com proteção gasosa, em que a proteção é fornecida por um gás, semelhante ao processo MIG/MAG.

Em ambas as formas, o processo é normalmente operado de maneira semiautomática, empregando basicamente o mesmo equipamento do processo MIG/MAG.

Na Figura 7 podemos observar esquematicamente um processo de soldagem FCAW.

Figura 7: Processo de soldagem com Arame Tubular com proteção gasosa (FCAW)



Fonte: adaptado de Nascimento (2005)

Para Esab (2020), a proteção da poça de fusão e do arco elétrico pode ser garantida pelo fluxo contido no interior do arame (no caso de arames tubulares auto-protegidos) ou por uma fonte gasosa externa. Esta proteção gasosa é realizada na maioria das vezes empregando 100% de CO₂ como gás de proteção ou em alguns casos utilizando misturas 75% de Argônio e 25% de CO₂.

Os tipos de arames tubulares são:

1. Com gás de Proteção.

- *Metal cored*: são aqueles que possuem um fluxo composto por pós metálicos, propiciando assim uma alta eficiência na taxa deposição (95%). Suas características incluem também baixa quantidade de fumos (melhor ambiente de trabalho), respingos (menor índice de retrabalho) e também baixo índice de hidrogênio difusível. São arames de alta produtividade e indicados para soldagem de alta responsabilidade. Bastante utilizados na indústria automobilística
- *Flux cored*: são aqueles que possuem em seu interior um fluxo composto por pós não metálicos, proporcionando alta produtividade através de maiores

velocidades de soldagem. A soldagem com este tipo de arame tubular proporciona a formação de escória que além de proteger a poça de fusão, contribui para um melhor desempenho na soldagem fora de posição. Bastante utilizados nas indústrias de construção naval, *offshore* e em *pipelines*. Podem ser do tipo rutilico ou básico, sendo o rutilico mais comum e indicado para aplicações gerais e o básico para aplicações que requerem altíssima tenacidade

2. Sem Gás de Proteção (Auto protegidos):

- São aqueles que possuem em seu interior um fluxo mesclado por elementos apropriados a fim de gerar os gases necessários para a proteção da poça de fusão e do arco elétrico, não necessitando desta maneira de uma fonte externa de proteção gasosa. Este consumível se torna uma ótima alternativa para a soldagem de campo, servindo como substituto para os eletrodos revestidos, uma vez que proporciona uma maior produtividade em relação ao processo SMAW.

2.4.2 Gases de proteção

Segundo Infosolda (2020), os gases utilizados para soldagem com arame Tubular são basicamente os mesmos utilizados na soldagem MIG/MAG com arame sólido, sendo os mais utilizados o dióxido de carbono como gás ativo e argônio e ou hélio como gases inertes, podendo também utilizar-se a mistura destes, de acordo com as especificações do fabricante de consumível.

2.4.3 Vantagens do processo

Por ser um processo que se assemelha ao processo de soldagem GMAW, a soldagem por arames tubulares mantém algumas vantagens do processo MIG/MAG, seguindo com a alta taxa de deposição e rendimento durante sua operação, resultando numa alta produtividade do processo. Não podemos esquecer também que algumas vantagens do processo de soldagem com eletrodos revestidos também são observadas no processo FCAW, como a possibilidade de ajustar a composição química do metal de adição durante a soldagem devido ao fluxo interno existente no arame consumível.

Do ponto de vista econômico, é possível afirmar que o arame tubular pode realizar um dado comprimento de solda em menor tempo em relação ao arame maciço (GARCIA e SCOTTI, 2011).

Quanto à aplicação industrial, o processo FCAW é observado com frequência nos segmentos nuclear e naval, na construção de plataformas para exploração de petróleo e na

fabricação de estruturas e peças de aço carbono, aços de baixa liga e aços inoxidáveis (SILVA, 2010; MACHADO, 1996).

2.4.4 Limitações do processo

O uso da soldagem com arames tubulares se dá devido ao seu alto rendimento e sua alta taxa de deposição em relação a outros métodos de soldagem manual.

O alto rendimento do processo provém da ausência de troca do eletrodo e a automação, que foram fatores importantes para que houvesse aumento no uso deste processo. Porém, como citado por Bracarense (2009), este processo possui as seguintes:

- Limita-se à soldagem de metais ferrosos e liga à base de níquel;
- Necessidade de remoção de escória para arame com fluxo não metálico;
- O arame tubular é mais caro que o arame de eletrodo maciço, entretanto, à medida que aumentam os elementos de ligas esta relação diminui;
- O equipamento é mais caro se comparado ao utilizado para soldagem pelo processo GTAW e SMAW;
- Restrição da soldagem ao ar livre (somente para soldagem FCAW com gás de proteção);
- O alimentador de arame e a fonte de energia devem estar próximos ao local de trabalho;
- São gerados mais fumos do que os processos GMAW e SAW.

2.4.5 Tipos de transferência metálica

De acordo com Modenesi (2000), a maneira pela qual o metal fundido transfere-se do eletrodo para a poça de fusão influencia múltiplos aspectos operacionais da soldagem, em geral, o nível de respingos e fumos, a capacidade do processo de ser empregado fora da posição plana e a geometria do cordão. Ou seja, a estabilidade e o desempenho operacional do processo depende diretamente do seu modo de transferência. O modo de transferência depende de diferentes fatores como, por exemplo, os parâmetros elétricos do arco, o diâmetro e composição do eletrodo consumível, tipo e composição do elemento de proteção, comprimento energizado do eletrodo, pressão atmosférica, entre outros.

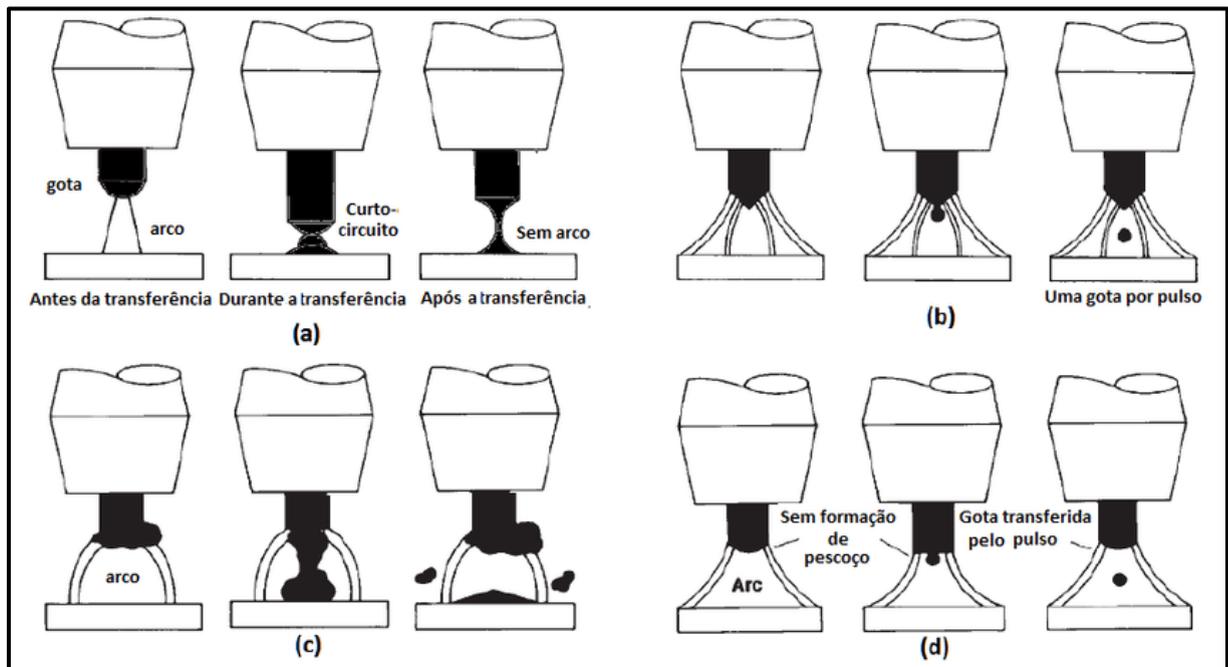
Os modos de transferência podem ser divididos em quatro modelos, diferenciando-se pelo tamanho da gota e as características de como a mesma é transferida.

Estes modos de transferência são:

- Curto-circuito;
- Globular;
- Pulsado
- Aerossol (*spray*).

Na Figura 8 podemos observar estes diferentes modos de transferência metálica durante a soldagem.

Figura 8: Tipos de transferências metálicas.



Fonte: Scotti (2009).

- a) Transferência por Curto circuito;
- b) Transferência Arco pulsado;
- c) Transferência Globular;
- d) Transferência Aerossol (*spray*).

2.5 ENSAIOS NÃO DESTRUTIVOS

2.5.1 Histórico do processo

Ensaio Não Destrutivo, por definição é o nome que se dá a todo processo de avaliação aplicado em componentes, peças ou estruturas para verificar a sua integridade, sem alterar suas propriedades físicas, químicas, mecânicas ou dimensionais, de maneira

que ela não seja danificada e que sua capacidade para operar ou cumprir sua função determinada não seja comprometida, nem mesmo alterada.

Para Junior (2006), os Ensaio Não Destrutivos são todas as técnicas utilizadas na inspeção de materiais e equipamentos sem danificá-los, e podem ser definidos como testes de controle da qualidade, realizados sobre peças acabadas ou semiacabadas, para a detecção de defeitos ou falta de homogeneidade, utilizando princípios físicos definidos, sem prejudicar a posterior utilização dos produtos inspecionados.

Segundo Andreucci (2006), os END são avaliados como processos especiais pelos sistemas da qualidade como, principalmente, a ISO-9001. Todos os profissionais que atuam nesse segmento devem ser treinados, qualificados e 23 certificados em função da qualidade exigida. Entidades nacionais, como a ABENDI (Associação Brasileira de Ensaio Não Destrutivos e Inspeção) e internacionais como a ASME (Sociedade Norte Americana de Engenheiros Mecânicos) são capazes de validar tais exigências.

Dentre os métodos de avaliação não destrutiva, são classificados grupos distintos que são determinados de acordo com a descontinuidade que se deseja determinar.

As principais técnicas de análise por Ensaio Não Destrutivos são:

- Ensaio visual;
- Líquido penetrante;
- Partículas magnéticas;
- Correntes parasitas;
- Estanqueidade;
- Termografia;
- Ultrassom;
- Emissão acústica;
- Radiografia;
- Radioscopia;
- Gamagrafia.

Para Abendi (2017), os Ensaio Não Destrutivos estão entre as principais ferramentas do controle da qualidade de materiais e produtos e são amplamente utilizados nos setores de petróleo/petroquímico, químico, aeroespacial, siderúrgico, naval, eletromecânico e de papel e celulose, entre outros. Eles contribuem para garantir a qualidade dos bens e serviços, reduzindo custos, preservando a vida e o meio ambiente, sendo fator diferencial de competitividade para as empresas que os utilizam.

Um defeito nada mais é do que uma descontinuidade que, por sua natureza, tipo, dimensões, localização ou efeito acumulado, torna a peça imprópria para uso, por não satisfazer os requisitos mínimos de aceitação da norma aplicável. Enquanto que uma descontinuidade é uma interrupção da estrutura típica de uma peça, no que se refere à homogeneidade de características físicas, mecânicas ou metalúrgicas. Uma descontinuidade não necessariamente é um defeito (JUNIOR, 2006).

2.5.2 Ensaio Visual

2.5.2.1 Conceitos básicos do ensaio

Provavelmente o ensaio de inspeção visual foi o primeiro ensaio não destrutivo a ser usado pelo homem, porém ainda continua sendo largamente o mais usado, e comumente precede qualquer outro ensaio. Uma das suas principais vantagens é fornecer dados quantitativos e qualitativos mais facilmente que os outros ensaios não destrutivos.

Alguns dos seus testes são baseados nas leis da ótica geométrica e outros fazem uso das propriedades ondulatórias da luz. Este ensaio tem sido usado principalmente para a inspeção de:

- Superfícies expostas ou acessíveis de materiais opacos e equipamentos parcial ou totalmente montados e objetos acabados;
- Interior de objetos transparentes ou translúcidos, como o vidro, quartzo, alguns plásticos, além de líquidos e gases.

Para UFMG (2014), a inspeção visual é um ensaio largamente utilizado para avaliar as condições ou integridade de uma junta soldada ou componente onde uma rápida detecção e correção de possíveis defeitos significam maior economia. Este ensaio é de fácil execução, de desprezível custo e habitualmente não requer equipamento especial além de ser considerado um método elementar nos programas de controle de qualidade.

A inspeção visual requer boa visão, boa condição de iluminação e experiência no reconhecimento de defeitos e/ou descontinuidades. Alguns equipamentos também podem ser usados tais como, lupas de pequeno aumento, boroscópio, câmeras de televisão, etc. Para determinação do tamanho, forma, cor, acabamento, refletividade, presença de descontinuidades superficiais grosseiras e funcionalidade, usando a visão a olho nu ou com o auxílio de instrumentos simples, tais como: lupas e gabaritos, ou sofisticados aparelhos como interferômetros e microscópios.

2.5.3 Ultrassom

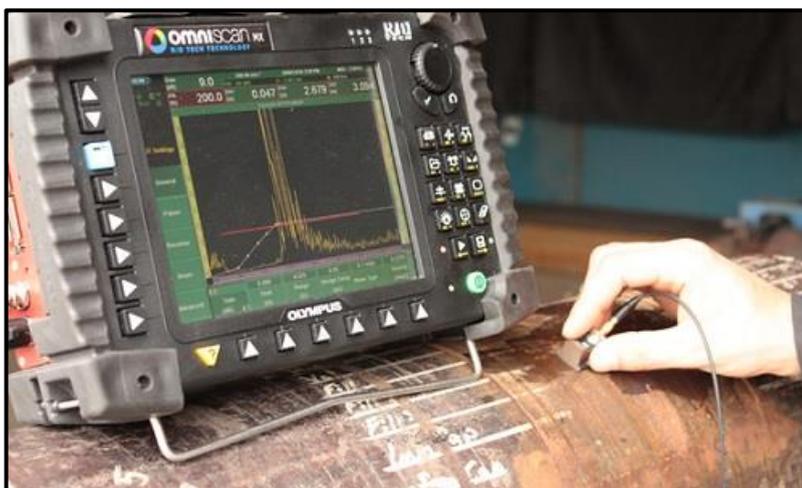
2.5.3.1 Conceitos básicos do ensaio

Segundo Martin (2012) o ensaio por ultrassom utiliza a energia do som de alta frequência para realizar inspeções e medições. A inspeção ultrassônica pode ser usada para a avaliação de peças e detecção de descontinuidades e dimensionamento e caracterização de materiais, dentre outras aplicações.

Um sistema de inspeção por ultrassom típico consiste de um aparelho com diversos componentes eletrônicos, tela de exibição, cabeçotes e cabos com conectores.

A Figura 9 ilustra o princípio de uma inspeção geral.

Figura 9: Ensaio não destrutivo por ultrassom

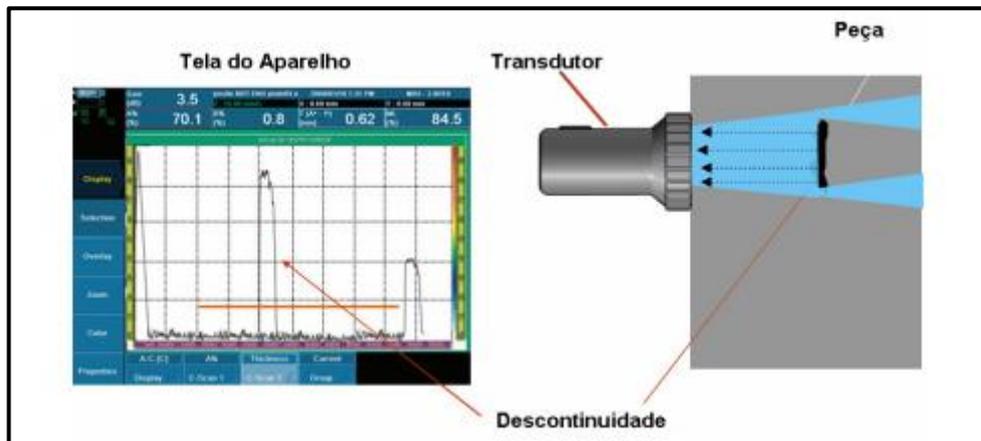


Fonte: <https://infosolda.com.br/artigos/ensaios-nao-destrutivos-e-mecanicos/241-ensaio-por-ultrassom>

Os sinais da descontinuidade e da superfície oposta retornam ao cabeçote, que transforma a onda em um sinal elétrico, exibindo em uma tela. A partir dos ecos visualizados na tela é possível obter informações sobre a localização, a profundidade, o tamanho e a orientação de um refletor (MARTIN, 2012).

Como podemos observar na Figura 10, o feixe sônico do transdutor, incide na falha ocorrendo uma reflexão captada pelo mesmo transdutor, enviando o sinal ao aparelho, mostrando na tela em forma de um pulso ou eco.

Figura 10: Esquematização do ensaio não destrutivo por ultrassom



Fonte: <http://www.awiservice.com.br/ensaio-por-ultrassom-aplicacoes-industriais/>

Um pulsador é um dispositivo eletrônico que pode produzir pulsos de alta tensão elétrica. Estimulado pelo pulsador, o cabeçote gera energia de alta frequência ultrassônica. A energia sonora é introduzida e se propaga através dos materiais na forma de ondas. Quando há uma descontinuidade no caminho da onda ultrassônica, como indicado na figura acima, parte da energia será refletida na superfície da falha (MARTIN, 2012).

2.5.3.2 Finalidades do ensaio

Segundo Andreucci (2016), o ensaio por ultrassom caracteriza-se num método não destrutivo que tem por objetivo principal a detecção de defeitos ou descontinuidades internas, presentes nos mais variados tipos ou forma de materiais ferrosos ou não ferrosos. Tais defeitos são caracterizados pelo próprio processo de fabricação da peça ou componentes a ser examinada, por exemplo:

- Bolhas de gás em fundidos;
- Dupla laminação em laminados;
- Micro trincas em forjados;
- Escórias em uniões soldadas e muitos outros.

Portanto, o exame ultrassônico, assim como todo ensaio não destrutivo, visa diminuir o grau de incerteza na utilização de materiais ou peças de responsabilidades.

2.5.3.3 Natureza das Ondas Ultrassônicas

De acordo com Martin (2012), as ondas são geradas pela propagação de vibrações em que acontece um transporte de energia, mas não de massa. Trata-se, portanto, de um

fenômeno periódico no tempo e no espaço. As ondas ultrassônicas, assim como as sônicas, propagam-se nos meios elásticos. Quando as partículas atômicas ou moleculares são removidas de suas posições de origem por qualquer força externa, tensões internas agem para recolocá-las em suas posições originais.

Em razão das forças interatômicas existentes entre as partículas adjacentes, o deslocamento de uma partícula induz a um deslocamento de partícula vizinha, propagando, dessa maneira, uma onda elástica. Vale ressaltar que o deslocamento real da matéria que ocorre nas ondas ultrassônicas é extremamente pequeno (MARTIN, 2012).

As aplicações deste ensaio são inúmeras:

- Soldas;
- Laminados;
- Forjados;
- Fundidos;
- Ferrosos e não ferrosos;
- Ligas metálicas;
- Vidro;
- Borracha;
- Materiais compostos.

Para Andreucci (2011), todos os materiais relacionados acima permitem ser analisados por ultrassom. Indústrias de base (usinas siderúrgicas) e de transformação (mecânicas pesadas), indústrias automobilísticas, transportes (marítimos, ferroviário, rodoviário, aéreo e aeroespacial) podem utilizar o ensaio não destrutivo por ultrassom em.

De modo geral, afirma-se que o som se propaga através dos sólidos, líquidos e gases. Entretanto, para Martin (2012) a amplitude, o modo de vibração e a velocidade das ondas diferem entre si em função da grande diferença na distância média entre as partículas nesses diferentes meios de propagação. Essas diferenças influenciam as forças de atração entre as partículas e o comportamento elástico dos materiais.

Logo, a facilidade com que essa propagação ocorre depende das características de densidade e elasticidade, da homogeneidade ou baixo grau de anisotropia acústica do material e da frequência do som. Em outras palavras, a propagação está intimamente relacionada à natureza detalhada no material (MARTIN, 2012).

2.5.3.4 Tipos de ondas ultrassônicas e suas aplicações

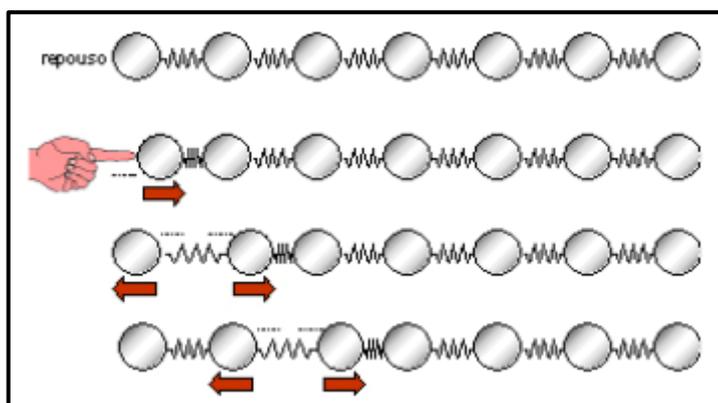
A propagação de uma onda ultrassônica pelo meio faz com que as partículas que a compõem executem um movimento de oscilação em torno da posição de equilíbrio, cuja amplitude do movimento será diminuída com o tempo em decorrência da perda de energia adquirida pela onda (MARTIN, 2012).

Segundo Andreucci (2016), se assumirmos que o meio em estudo é elástico, ou seja, que as partículas que o compõem rigidamente ligadas, mas que podem oscilar em qualquer direção, então podemos classificar as ondas acústicas em quatro tipos:

- Onda longitudinal: Neste tipo de onda ultrassônica, também conhecida como onda de compressão, zonas de compressão e rarefação são produzidas alternadamente pela vibração das partículas, paralelamente à direção de propagação da onda (MARTIN, 2012).

A Figura 11 mostra o comportamento das ondas longitudinais.

Figura 11: Ondas longitudinais (ondas de compressão)



Fonte: Andreucci (2016)

No esquema acima, nota-se que o primeiro plano de partículas vibra e transfere sua energia cinética para os próximos planos de partículas, e passam a oscilar. Desta maneira, todo o meio elástico vibra na mesma direção de propagação da onda (longitudinal), e aparecerá “zonas de compressão” e “zonas diluídas”. As distâncias entre duas zonas de compressão determinam o comprimento de onda (ANDREUCCI, 2016).

Em decorrência do processo de propagação, este tipo de onda possui uma alta velocidade de propagação que é característica do meio.

Na Tabela 3 podemos observar alguns exemplos da velocidade de propagação de ondas sonoras nos materiais.

Tabela 3: Velocidade das ondas sonoras nos materiais.

Material	Velocidade m/s
Ar	330
Alumínio	6300
Cobre	4700
Ouro	3200
Aço	5900
Aço inoxidável	5800
Nylon	2600
Óleo(SAE30)	1700
Água	1480
Prata	3600
Titânio	6100
Níquel	5600
Tungstênio	5200
Magnésio	5.800
Acrílico	2.700
Aço Inoxidável	5.800
Aço Fundido	4.800

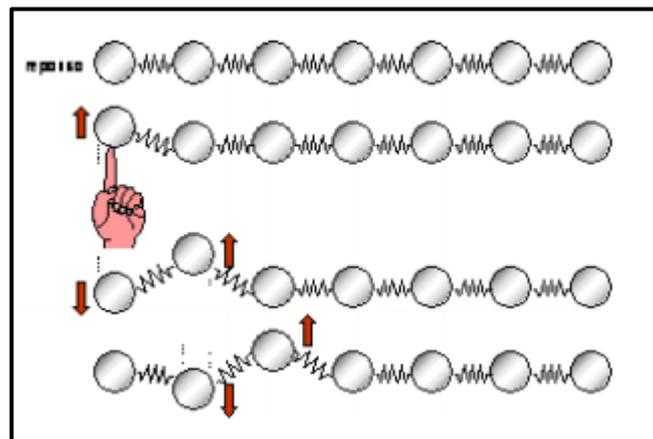
Fonte: https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/4392836/mod_resource/content/1/Aula%204%20-%20US.pdf

- Onda transversal: Esse tipo de onda também é conhecido como onda de cisalhamento, recebendo esse nome em razão de a direção do deslocamento das partículas serem perpendicular à sua propagação (MARTIN, 2012).

Uma onda transversal é definida, quando as partículas do meio vibram na direção perpendicular ao de propagação. Neste caso, observamos que os planos de partículas mantêm-se na mesma distância um do outro, movendo-se apenas verticalmente (ANDREUCCI, 2016).

Na Figura 12 podemos observar o comportamento das ondas transversais.

Figura 12: Ondas transversais (ondas de cisalhamento)



Fonte: Andreucci (2016)

Podemos reafirmar que na onda transversal o comprimento de onda equivale à distância entre duas zonas vizinhas de mesma fase, ou seja, é a distância entre dois “picos” ou dois “vales” (MARTIN, 2012).

As partículas oscilam na direção transversal a direção de propagação, podendo ser transmitidas somente a sólidos. As ondas transversais são praticamente incapazes de se propagarem nos líquidos e gases, pelas características das ligações entre partículas, destes meios (ANDREUCCI, 2016).

Para Martin (2012), a transmissão desse tipo de onda através de um material é mais facilmente ilustrada pelo movimento de uma corda, em que cada partícula move-se somente para cima e para baixo, mas a onda move-se ao longo da corda a partir do ponto de excitação.

Na Tabela 4 podemos observar a velocidade de propagação das ondas transversais nos materiais.

Tabela 4: Velocidade de propagação das ondas transversais

Material	Velocidade m/s
Ar	-
Alumínio	3100
Cobre	2300
Acrílico	1100
Alumínio	3100
Ouro	1200
Aço	3200
Aço Inoxidável	3100
Aço Fundido	2400
Nylon	1100
Óleo(SAE30)	-
Água	-
Prata	1600
Titânio	3100
Níquel	3000
Magnésio	3000

Fonte: Andreucci (2016).

- Onda superficial: A onda superficial ou onda de *Rayleigh* propaga-se na superfície limite entre um meio sólido e o ar, estando a profundidade de penetração limitada a um comprimento de onda. É uma combinação do movimento da onda longitudinal e da transversal, que cria um movimento elíptico (MARTIN, 2012)

São assim chamadas, pelas características de se propagar na superfície dos sólidos. Devido ao complexo movimento oscilatório das partículas da superfície, a velocidade de propagação da onda superficial entre duas fases diferentes é de aproximadamente 10% inferior que a de uma onda transversal (ANDREUCCI, 2016).

O eixo principal da elipse é perpendicular à superfície do meio sólido. As ondas

superficiais são geradas quando uma onda transversal refratada, proveniente de um cabeçote de feixe angular, percorre uma superfície perto do segundo ângulo crítico (MARTIN, 2016).

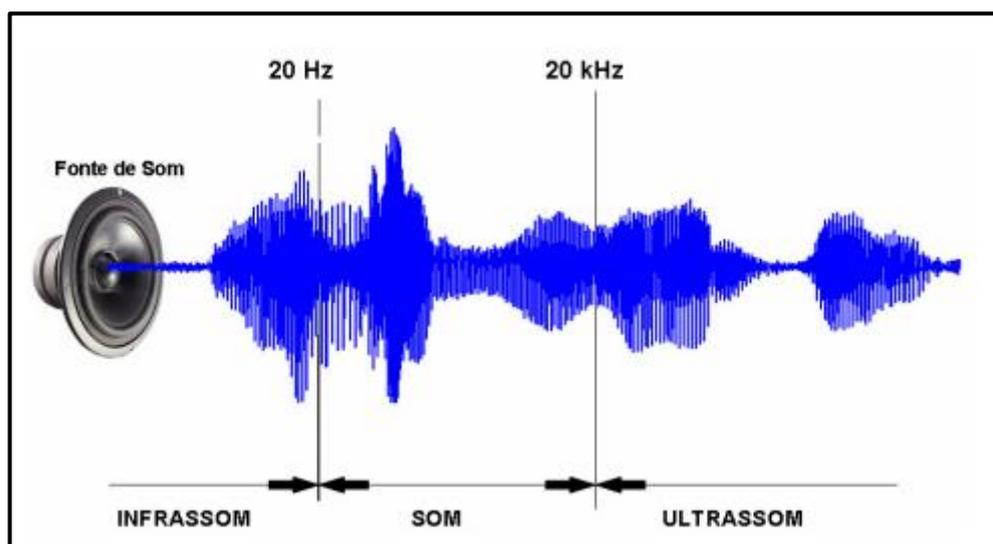
2.5.3.5 Frequência

As ondas ou som propriamente dito, são classificados de acordo com suas frequências e medidos em ciclos por segundo, ou seja o número de ondas que passam por segundo pelos nossos ouvidos. A unidade “ciclos por segundos” é normalmente conhecido por “Hertz” (ANDREUCCI, 2016).

Assim sendo se tivermos um som com 280 Hz, significa que por segundo passam 280 ciclos ou ondas por nossos ouvidos. Note que frequências acima de 20.000 Hz são inaudíveis denominadas frequências ultrassônicas.

Na Figura 13 podemos observar as faixas de frequência do infrassom, som e ultrassom.

Figura 13: Faixas de frequência das ondas sonoras



Fonte: Andreucci (2016)

2.5.3.6 Calibração do equipamento

Segundo Martin (2012) calibração refere-se ao ato de avaliar e ajustar a precisão e a exatidão do equipamento de medição. No ensaio por ultrassom existem diversas formas de calibração. Primeiramente, todo o sistema eletrônico do equipamento de inspeção deve ser verificado para garantir que esteja operando como projetado. A avaliação de determinadas características do aparelho é executada pelo próprio fornecedor.

Um aparelho de ultrassom, de modo geral, pode ser usado em uma grande variedade de aplicações. Na calibração feita pelo usuário o sistema de inspeção ultrassônica é configurado para obter o melhor desempenho em uma aplicação específica, com resultados confiáveis, ou seja, para garantir uma probabilidade de detecção de falhas adequada. Portanto, durante o ensaio deve-se assegurar a detecção e o dimensionamento adequados das descontinuidades, dentro de margens de segurança esperadas, para uma correta tomada de decisões quanto à quantidade da peça ensaiada (MARTIN, 2012).

Em condições normais, são utilizados dois tipos de blocos para a calibração do equipamento:

- O de calibração;
- E o de referência.

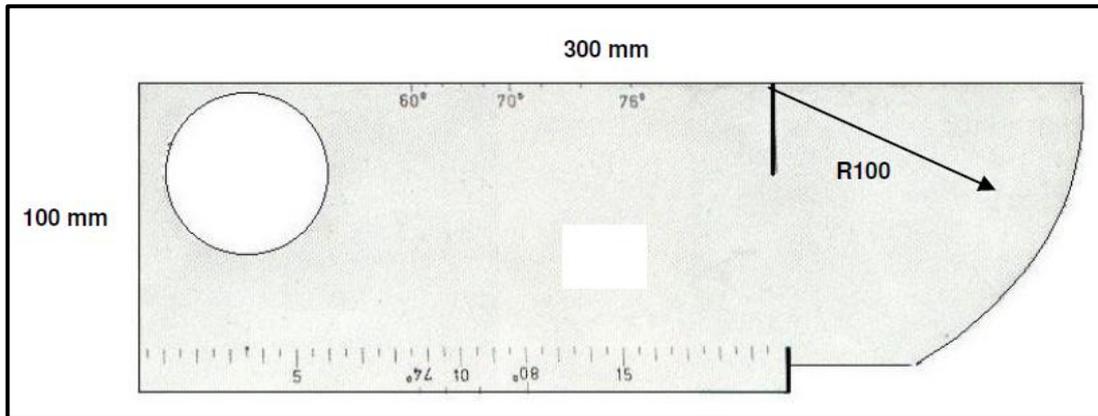
O padrão de calibração e o bloco de referência devem se adequadamente calibrados e rastreáveis a padrões nacionais, assegurando que as medições realizadas pelos aparelhos são corretas. Entretanto, as calibrações feitas em laboratório de metrologia não substituem aquelas feitas pelo usuário (MARTIN, 2012).

Geralmente o procedimento de calibração executado pelo usuário pode ser classificado em 3 grupos:

1. Verificação das características do aparelho utilizando-se o padrão de calibração;
2. Faixa de calibração estabelecendo condições de ensaio reproduzíveis, também com auxílio do padrão de calibração;
3. Ajuste da sensibilidade ou nível de referência do aparelho, mediante a comparação direta da altura ou localização dos ecos provenientes dos refletores artificiais de um bloco de referência com ecos das descontinuidades da peça.

Um dos blocos padrões de calibração normalmente usado é o de calibração Nº 1, conhecido como V1 (ou K1), conforme mostrado na Figura 14.

Figura 14: Bloco de calibração V1

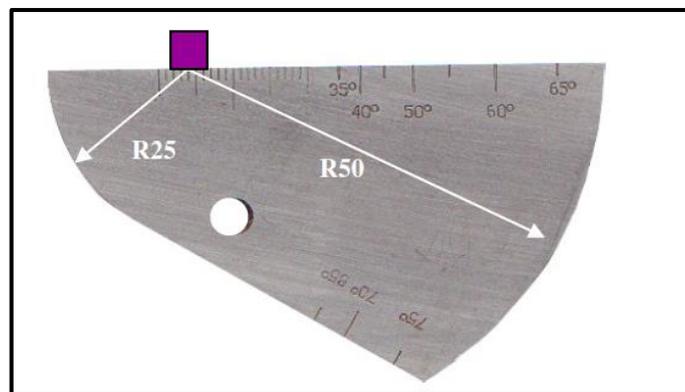


Fonte: Andreucci (2016).

O bloco de calibração N° 2 (conhecido também como V2 ou K2) é mais compacto que o padrão de calibração N° 1 (V1). Pode ser facilmente transportado para inspeções em campo, embora seja um pouco menos versátil em algumas funções.

Na Figura 15 podemos observar esquematicamente um bloco V2.

Figura 15: Bloco de calibração V2



Fonte: Andreucci (2016).

Existem situações em que o ajuste da sensibilidade é realizado posicionando-se o cabeçote normal ou duplo cristal diretamente sobre a peça. Utilizando-se o controle de ganho, o eco de fundo da peça é ajustado a uma determinada altura a tela, geralmente entre 75% e 85%, e, a partir daí, efetua-se a varredura para identificar possíveis descontinuidades.

Entretanto, nas demais aplicações para o ajuste da sensibilidade do equipamento de ultrassom normalmente são usados blocos de referência, que devem ser do mesmo material, acabamento superficial (rugosidade) e geometria da peça a ser inspecionada, contendo descontinuidades induzidas artificialmente (refletores) que se assemelham às descontinuidades reais. É conveniente ressaltar que esses requisitos podem trazer algumas limitações na confecção dos blocos de referência. Como a maioria usa furos e entalhes, esses refletores muitas vezes não representam adequadamente uma descontinuidade real característica da peça (ANDREUCCI, 2016).

Para Martin (2012), um dos blocos de referência mais utilizados na calibração da sensibilidade de produtos soldados é o bloco do código ASME V. Ele é usado para construir uma curva de correlação distância-amplitude (DAC) na tela do aparelho, que servirá de parâmetro para avaliação de soldas. Esse bloco, é constituído do mesmo material da peça a ser inspecionada, contendo furos laterais e entalhes nas superfícies de contato e oposta, cujas dimensões (espessura do bloco, diâmetro dos furos, profundidade dos entalhes, etc.) dependem da espessura da peça.

Normalmente os blocos de referência são planos, exceto para a inspeção de soldas em tubulações ou equipamentos com diâmetro de 500 mm ou menores, quando a varredura ocorre em uma direção ortogonal ao eixo longitudinal da superfície cilíndrica (MARTIN, 2012).

2.5.3.7 Características de calibração da aparelhagem

Segundo Martin (2012), para ser realizada corretamente a calibração do aparelho, a mesma deve ser executada de acordo com as normas específicas das peças ou equipamentos que serão inspecionados. Essas normas determinam as calibrações requeridas, assim como o método, a tolerância e a periodicidade com que devem ser executadas tais calibrações.

A periodicidade entre as calibrações e verificação da aparelhagem é apenas uma sugestão, já que diversos fatores contribuem para uma necessidade de calibração com maior ou menor frequência. Dentre eles, os cuidados na utilização e armazenagem dos blocos padrão, de referência e dos aparelhos de ultrassom, condições superficiais das peças etc. Qualquer manutenção na aparelhagem implica nova calibração antes da sua utilização, independente da propriedade que tenha sido proveniente estabelecida (MARTIN, 2012).

2.5.4 Ensaio de Líquido Penetrante

2.5.4.1 Conceitos básicos do ensaio

O ensaio por líquido penetrante é utilizado para revelar descontinuidades superficiais em materiais em geral. Ele baseia-se na ação da capilaridade, que é o poder de penetração de um líquido em locais extremamente pequenos devido a suas características físico-químicas como a tensão superficial.

Segundo Andreucci (2013), o poder de penetração é uma característica bastante importante uma vez que a sensibilidade do ensaio é enormemente dependente do mesmo. O objetivo do ensaio por líquido penetrante é assegurar a confiabilidade do produto, por meio de obtenção de uma imagem visual, que revela a descontinuidade na superfície da peça sem danificá-la. O sucesso deste ensaio depende da visibilidade da indicação.

O método de ensaio por líquidos penetrantes consiste na aplicação de um líquido, com características especiais, sobre a superfície da peça ou componente de interesse, de forma que, após um determinado tempo, este líquido penetre em descontinuidades presentes no material e que sejam abertas à superfície. Após um determinado tempo, o excesso de líquido é removido e um produto chamado revelador é aplicado sobre a superfície. Este material age de forma a retirar o líquido que penetrou na descontinuidade, formando uma imagem da mesma na superfície da peça, que será avaliada de acordo com a norma utilizada para a fabricação da peça ou componente (ANDREUCCI, 2013).

2.5.4.2 Vantagens do ensaio

É capaz de ensaiar peças de tamanhos e formas variadas bem como pequenas áreas isoladas em uma superfície, assim como é capaz de detectar descontinuidades muito pequenas. É um dos ensaios mais sensíveis para detectar descontinuidades superficiais.

Segundo Andreucci (2013), sua gama de aplicações se estende desde materiais ferrosos, não ferrosos, cerâmicas de alta densidade, vidros e etc. Porém, nenhum dos materiais a ser ensaiado pode ser poroso, pois essa configuração atrapalha no ensaio.

O líquido penetrante fornece uma indicação ampliada da descontinuidade, tornando-a mais visível. As descontinuidades detectadas são analisadas quanto à localização, orientação, dimensões, tornando fácil a interpretação e avaliação.

É relativamente barato e não requer equipamentos sofisticados. As instalações podem ser adaptadas ao tamanho e quantidade de peças, permitindo automação do sistema (ANDREUCCI, 2013).

Podendo ser aplicado durante o processo de fabricação, ao final deste ou durante a manutenção, pode ser utilizado para detectar o surgimento de descontinuidades ainda em

operação. Quanto à sensibilidade do ensaio, ela pode ser ajustada, selecionando os materiais e técnicas de ensaio.

2.5.4.3 Limitações do ensaio

As peças devem estar completamente limpas e a abertura das possíveis descontinuidades necessariamente precisam estar desobstruídas. No ensaio por líquidos penetrantes só é possível detectar descontinuidades que estejam abertas à superfície. Para Andreucci (2013), não pode ser utilizado em superfícies porosas ou absorventes, pois há a possibilidade da não remoção completa do excesso de penetrante causando mascaramento de resultados. As técnicas convencionais devem ser aplicadas em uma faixa de temperaturas definida, em geral entre 10 C e 52 C.

Os produtos utilizados no ensaio podem danificar alguns materiais ou ficarem permanentemente retidos em materiais porosos. Alguns produtos utilizados podem conter enxofre ou compostos halogêneos (cloretos, fluoretos, brometos e iodetos). Estes compostos podem causar fragilização ou trincas em aços inoxidáveis austeníticos se não forem completamente removidos antes de tratamentos térmicos ou exposição a altas temperaturas (ANDREUCCI, 2013).

Podem também causar corrosão em ligas de titânio se não forem completamente removidos após o ensaio e a peça for exposta a altas temperaturas. Além disto, os produtos utilizados podem causar irritação na pele se manuseados sem luvas (ANDREUCCI, 2013).

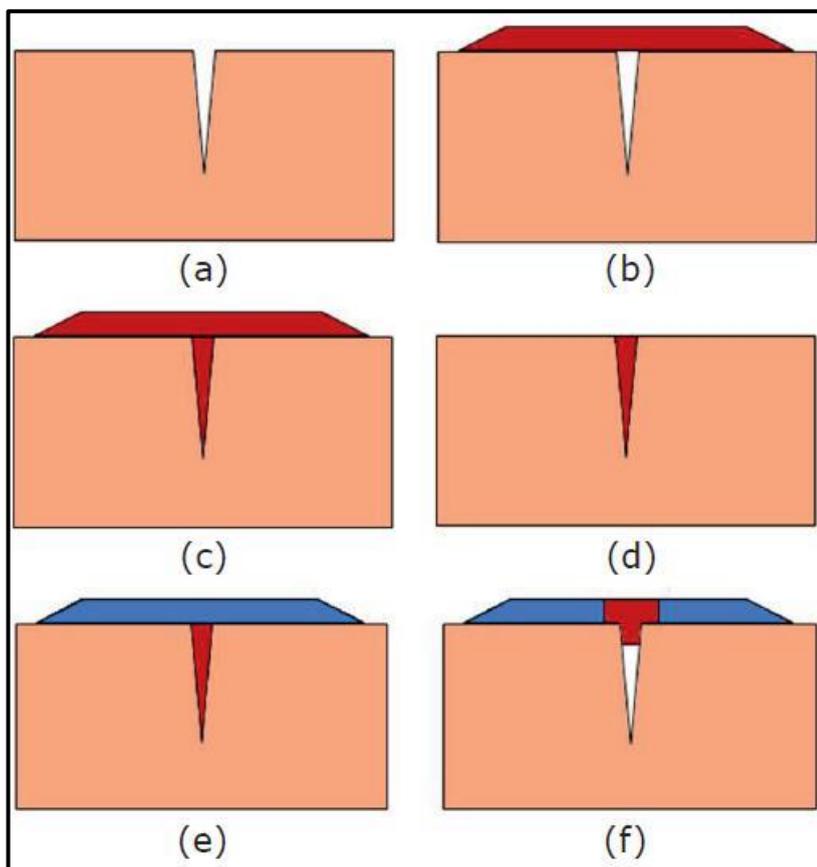
2.5.4.4 Aplicações do ensaio

Devido às características básicas do ensaio por líquido penetrante, eles podem ser aplicados em grande variedade de produtos metálicos e não metálicos, ferrosos e não ferrosos, sejam forjados, fundidos, cerâmicos de alta densidade e etc., desde que não sejam porosos, com resultados técnicos e economicamente satisfatórios na revelação de descontinuidades superficiais, por menores que sejam.

Considerando que alguns materiais podem ser afetados pelos produtos utilizados no ensaio, para Andreucci (2013), devem ser realizados testes para assegurar que o material a ser ensaiado não seja danificado. O ensaio de líquido penetrante é muito usado em materiais não magnéticos como alumínio, magnésio, aços inoxidáveis austeníticos, ligas de titânio, e zircônio, além dos materiais magnéticos. É também aplicado em cerâmica vitrificada, vidro e plásticos.

Na Figura 16 podemos observar as etapas do processo de inspeção por Líquido Penetrante.

Figura 16: Etapas do ensaio de Líquido Penetrante



Fonte: <http://www.revistadoparafuso.com.br/v1/modelo/noticia.php?id=67>

As etapas do ensaio consistem em:

- A. Preparação da superfície/limpeza;
- B. Aplicação do penetrante;
- C. Remoção do excesso após tempo de penetração;
- D. Secagem da peça;
- E. Aplicação do revelador;
- F. Inspeção, verificar a revelação das indicações e enquadrá-las no critério de aceitação e rejeição.

2.5.5 Ensaio não destrutivo por Radiografia

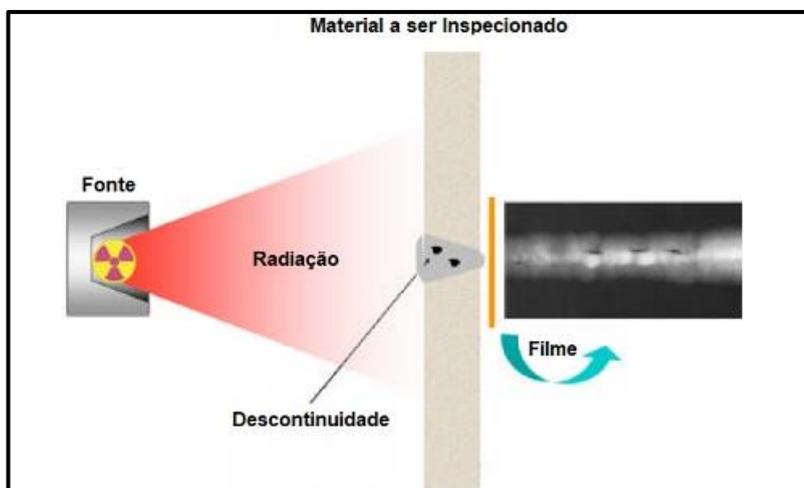
2.5.5.1 Conceitos básicos do ensaio

Para Andreucci (2009), o ensaio radiográfico é baseado inicialmente na absorção distinta da radiação pela matéria. Consiste essencialmente, em fazer passar um feixe de radiação X, radiação gama ou nêutrons através do objeto a ser analisado e registrar as distintas características da radiação emergente do objeto utilizando um meio adequado, como exemplo um filme radiográfico, uma tela fluorescente ou até mesmo dispositivos eletrônicos para detecção de imagens radiográficas.

Dependendo das características do objeto em exame, como a sua geometria e o tipo de descontinuidades apresentadas pelo mesmo, o feixe de radiação sofrerá uma maior ou menor absorção, sensibilizando em menor ou maior grau o meio utilizado para o registro da imagem radiográfica (ANDREUCCI, 2009).

O processo de ensaio não destrutivo Radiográfico pode ser observado esquematicamente na Figura 17.

Figura 17: Ensaio de Radiografia



Fonte: <https://infosolda.com.br/biblioteca-digital/livros-senai/ensaios-nao-destrutivos-e-mecanicos-livros-senai/215-ensaio-nao-destrutivo-radiografia>

Segundo citado por Andreucci(2009), apesar de basear-se em princípios simples, o ensaio radiográfico necessita ser realizado de acordo com metodologias que assegurem uma sensibilidade adequada para a detecção das descontinuidades que se deseja avaliar, tal qual como o estabelecimento de uma simples correlação entre a orientação de uma determinada descontinuidade na radiografia e a sua respectiva localização na peça examinada.

2.5.5.2 Vantagens do ensaio

Este ensaio pode ser aplicado em todo tipo de material, sendo assim, ele permite uma imagem em registro permanente. Além disso, é possível inspecionar o interior dos materiais e assim revelar possíveis erros de fabricação, o que pode comprovar descontinuidades estruturais.

2.5.5.3 Limitações do ensaio

Este ensaio é de difícil aplicação em objetos com geometria complexa pois necessita de acesso às duas faces do objeto analisado. Além disso se torna difícil ou quase impossível de detectar defeitos lamelares paralelos ao filme.

É um método relativamente caro no qual é necessário utilizar procedimentos rigorosos de segurança. Como as radiações emitidas não podem ser detectadas por quaisquer um dos nossos cinco sentidos, exigem-se rigorosas medidas de segurança para realizar esse ensaio. As radiações podem causar danos ou mesmo destruição das células do corpo humano. É essencial que os técnicos que utilizam do ensaio de radiografia tenham sempre atenção em relação ao perigo oferecido pela radiação e o conhecimento das regras de segurança, sendo necessário o uso de detectores de radiações pelos operadores e nas imediações onde são feitos os ensaios.

2.6 VASOS DE PRESSÃO

Os vasos de pressão são depósitos projetados para operar com segurança, resistindo a pressões internas distintas da pressão normal do ambiente. Portanto, estes equipamentos são primordiais em processos industriais que submetam-se a utilização de fluidos e quando o processo de alteração exige que tais condições sejam feitas sob pressão.

Segundo Falcão (2008), os vasos de pressão são equipamentos fabricados para operar principalmente nas indústrias de processo como as refinarias de petróleo, petroquímicas e indústrias alimentícia e farmacêutica. Tais equipamentos necessitam ser projetados e fabricados de forma a evitar as suas principais causas de falha, que são:

- Deformação elástica ou deformação excessiva;
- Altas tensões residuais localizadas;
- Desgaste a altas temperaturas;
- Fratura frágil em baixas temperaturas;
- Fadiga;
- Corrosão.

A fim de reduzir os acidentes catastróficos relacionados a este tipo de equipamento, foram criados grupos de trabalho com a finalidade de definir critérios de fabricação para garantir que os Vasos de Pressão cumprissem suas funções estabelecidas sem oferecer risco durante sua utilização.

Dentre os diversos códigos existentes para regulamentação destes projetos, um dos mais conhecidos e utilizados é o código ASME (*American Society of Mechanical Engineers*), que foi editado em 1925, onde foi intitulado “*Rules for Construction of Pressure Vessels Section VIII, 1925 Edition*” (Regras para construção de vasos de pressão, seção VIII, edição de 1925).

Todos os códigos tem a finalidade de estabelecer as normas de fabricação para o projeto, apresentando os métodos de manufatura, critérios para dimensionamento, fabricação, realização de ensaios não destrutivos e os materiais aplicáveis para as respectivas tensões admissíveis.

Periodicamente os códigos são submetidos a revisões e novas edições para incorporarem novos tópicos e alterações decorrentes de avanço tecnológico (FALCÃO, 2008).

2.6.1 Principais formatos de vasos de pressão

Segundo Telles (2001), os vasos são compostos basicamente composto de dois componentes, pelo casco e pelos tampos de fechamento, que são dimensionados para suportar os esforços provenientes da pressão. Os cascos possuem diversas formas, tendo sempre como base, uma superfície de revolução como formato. São predominantes os formatos cilíndricos, cônicos e esféricos ou mesmo a combinação entre eles, sendo o mais comum o formato cilíndrico, por sua facilidade na fabricação e também de transporte, além de atender muito bem aos mais diversos serviços.

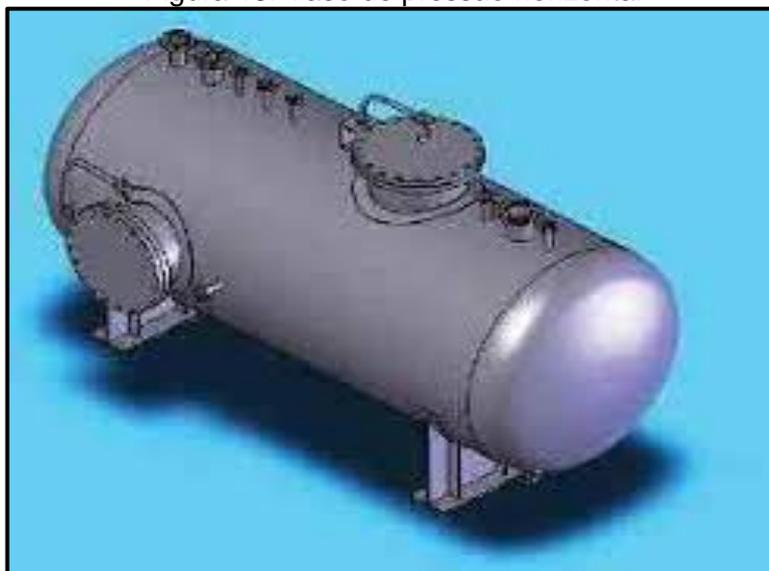
Quanto a posição de instalação, os vasos podem ser:

- Verticais;
- Horizontais;
- Inclinação.

A escolha do tipo de vaso quanto à posição depende da finalidade do serviço.

A Figura 18 mostra um vaso de pressão horizontal.

Figura 18: Vaso de pressão horizontal



Fonte: <https://encrypted-tbn0.gstatic.com/images?q=tbn%3AANd9GcTfepREe--9H2DeIGsfymDXr7i7MV4KSGuyVA&usqp=CAU>.

Os vasos horizontais são os mais comuns e comumente utilizados para trocadores de calor e vasos de acumulação como tanque de condensado de uma caldeira ou tanque pulmão de ar comprimido por exemplo. Os vasos verticais são utilizados quando é necessária a ação da gravidade como em torres de resfriamento ou reatores de fabricação. Os vasos inclinados são utilizados somente quando a operação necessitar o escoamento por gravidade de um fluido difícil de escoar, por exemplo (DUARTE, 2014).

Segundo a ASME VIII (2010), os vasos de pressão devem ser projetados para suportar as seguintes cargas, quando pertinentes:

- Pressão interna e ou externa;
- Peso do vaso e seus acessórios durante operação ou teste hidrostático (incluindo pressão estática de líquidos);
- Reações estáticas devido ao peso de equipamentos anexos ao vaso de pressão, como motores, maquinário, outros vasos, tubulação, revestimentos e proteções;
- Componentes internos do vaso e externos como olhais, anéis, saia;
- Reações cíclicas e dinâmicas devido à pressão ou variação térmica, equipamentos anexos ao vaso e cargas mecânicas;
- Vento, neve e reações sísmicas;
- Reações de impacto como as causadas por choque de fluidos;
- Diferentes coeficientes de expansão térmica dos materiais;
- Pressões incomuns como as causadas por deflagração.

2.7 AÇO

2.7.1 Tipos de aço

O aço é uma liga metálica que é largamente utilizada para confecção de estruturas e equipamentos em geral devido as suas variadas propriedades mecânicas e químicas. Metalurgicamente o aço carbono é definido como sendo uma liga constituinte de ferro (entre 0,5% e 2,0% de teor de carbono), e uma quantidade de manganês, enxofre e fósforo, podendo apresentar ainda uma quantidade de silício, alumínio e cobre.

A quantidade de carbono presente no aço define a sua classificação:

- Os aços de baixo carbono: possuem no máximo 0,30% deste elemento, e incluem os aços destinados à estampagem comumente laminados a frio e recozidos, utilizados na indústria automobilística na confecção de carrocerias.
- Os aços de médio carbono: possuem de 0,30% a 0,60% de carbono, e são aços empregados como perfis e vergalhões na construção civil e como chapas destinadas à confecção de tanques de estocagem, tubulações, reatores e muitas outras aplicações.
- Os aços de alto carbono: possuem de 0,60% a 1,00% de carbono e são basicamente empregados na confecção de molas e arames de alta resistência.

Segundo Pannoni (2002), os aços em geral, são classificados por Grau, Tipo e Classe. O grau normalmente identifica a faixa de composição química do aço. O tipo identifica o processo de desoxidação utilizado, enquanto que a classe é utilizada para descrever diferentes atributos, como nível de resistência mecânica e acabamento superficial.

A designação do Grau, Tipo e Classe utiliza uma letra, número, símbolo ou nome. Existem vários sistemas de designação para os aços, como por exemplo ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas), ASTM (*American Society for Testing and Materials*), SAE (*Society of Automotive Engineers*) e AISI (*American Iron and Steel Institute*). A normalização unificada vem sendo utilizada com frequência cada vez maior, e é designada pela sigla UNS (*Unified Numbering System*).

2.7.2 Classificação dos aços

Existem vários tipos de aço existentes no mundo e eles podem ser organizados de distintas maneiras. Uma das classificações mais comuns compreende a seguinte divisão:

- Aços Carbono;
- Aços de baixa liga;
- Aços de média liga;
- Aços inoxidáveis (alta liga).

1. Os Aços Carbono são compostos majoritariamente por Ferro e um teor de Carbono que pode atingir valores de até os 2%. Sabe-se que ao adicionar Carbono ao aço é possível alcançar níveis de dureza e resistência superiores. Sendo assim, dependendo dos níveis de Carbono adicionado, os aços Carbono podem ser divididos em quatro grupos diferentes:

- a) Baixo Carbono, até 0,14% de Carbono;
- b) Aço doce, que compreende um nível de Carbono de 0,15% até 0,29%;
- c) Aço de médio Carbono, cujos níveis de Carbono estão entre 0,3% e os 0,59%;
- d) Por fim os aços de alto Carbono, que vão desde 0,6% até 2% de Carbono.

2. Aços de baixa liga: são aqueles que em determinadas aplicações, como por exemplo em casos onde irão operar em baixas temperaturas, os aços Carbono não são muito recomendados, foi então que surgiram os aços de baixa liga. Como o próprio nome sugere, estes contêm pequenas quantidades de elementos de liga, entre 0,5% a 5%, que lhe conferem uma melhoria das suas propriedades. Os elementos de liga mais comuns são:

- a) Manganês: que trabalha como agente desoxidante ou dessulfurante, ou seja, liga-se ao Oxigênio ou enxofre consistente no aço para rapidamente neutralizar os efeitos indesejáveis que estes dois elementos podem causar na peça. O Manganês aumenta também a resistência à tração e a temperabilidade dos aços;
- b) Silício: este elemento permite um aumento da resistência dos aços, mas adicionado em quantidades excessivas pode reduzir a ductilidade dos mesmos;
- c) Molibdênio: este elemento de liga é capaz de aumentar fortemente a profundidade de têmpera característica do aço;

- d) Cromo: é comumente utilizado para melhorar a dureza dos aços, tal como o Carbono. Este é o elemento de liga que se aplica quando se deseja uma maior resistência à corrosão e a altas temperaturas;
- e) Níquel: ao se adicionar este elemento ao aço, permite aumentar a sua ductilidade e tenacidade. Adicionalmente permite também melhorar a resistência ao impacto em baixas temperaturas.
3. Aços de média liga: por definição os aços de média liga são aqueles que têm níveis de elementos de liga dentre 5% a 10%. Sendo assim, tal como os aços de baixa liga, estes aços conseguem melhorar ainda mais algumas das suas propriedades com a adição de uma maior quantidade de elementos de liga.
4. Aços inoxidáveis (aços alta liga): estes aços possuem elementos de liga em um nível acima dos mencionados anteriormente. Sendo assim, possuem um teor de elementos de liga que podem ultrapassar os 10%, o que possibilita a estes aços extraordinárias propriedades químicas e mecânicas. O aço inoxidável é uma liga que contém em sua matriz Ferro e Cromo, podendo conter também uma porcentagem de Níquel, Molibdênio e outros elementos, que apresentam propriedades físico-químicas superiores aos aços comuns, sendo a altíssima resistência à oxidação atmosférica a sua principal característica. Estes elementos de liga (em particular o Cromo), propiciam uma excelente resistência à corrosão quando comparados aos aços Carbono. Na realidade eles são sim aços oxidáveis, isto é, o Cromo existente na liga oxida-se em contato com o Oxigênio da atmosfera, formando uma camada passiva de óxido de Cromo (Cr_2O_3), que forma-se na superfície exposta ao meio, protegendo assim a superfície do metal.

A Tabela 5 mostra os vários tipos de aço utilizados na indústria de acordo com a classificação do sistema de codificação SAE/AISI, que usa em geral quatro algarismos na forma ABXX onde:

- A e B - números que identificam os principais elementos de liga presentes no aço e seus teores dados em porcentagem de peso;
- XX - indicam a porcentagem em peso de carbono do aço multiplicado por 100.

Tabela 5: Classificação dos aços de acordo com o sistema SAE/AISI

Designação		TIPO DE AÇO
SAE	AISI	
10XX	C10XX	Aços carbono comuns
11XX	C11XX	Aços de usinagem (ou corte) fácil, com alto S
13XX	13XX	Aço manganês com 1,75% de Mn
23XX	23XX	Aços Níquel com 3,5% de Ni
25XX	25XX	Aços Níquel com 5,0% de Ni
31XX	31XX	Aços Níquel Cromo com 1,25% de Ni e 0,65% de Cr
33XX	E33XX	Aços Níquel Cromo com 3,5 % de Ni e 1,55 Cr
40XX	40XX	Aços Molibdênio com 0,25% de Mo
41XX	41XX	Aços Cromo Molibdênio com 0,50% ou 0,90% de Cr e 0,12% ou 0,20% de Mo
43XX	43XX	Aços Níquel cromo com molibdênio com 1,80% de Ni e 0,20% ou 0,25% de Mo
46XX	46XX	Aços Níquel Molibdênio com 1,55% ou 1,80% de Ni e 0,20% ou 0,25% de Mo
47XX	47XX	Aços Níquel Cromo Molibdênio com 1,05% de Ni, 0,45% de Cr e 0,20 de Mo
48XX	48XX	Aços Níquel Molibdênio com 3,5 % de Ni e 0,25% de Mo
50XX	50XX	Aços cromo com 0,28% ou 0,65% de Cr
50BXX	50BXX	Aços cromo boro com baixo teor de Cr e no mínimo 0,0005% de B
51XX	51XX	Aços cromo com 0,80 a 1,05% de Cr
61XX	61XX	Aço cromo vanádio com 0,8 ou 0,95% de Cr a 0,1% ou 0,15% de v
86XX	86XX	Aços níquel molibdênio com baixos teores de Ni, Cr e Mo
87XX	87XX	Aços níquel molibdênio com baixos teores de Ni, Cr e Mo
92XX	92XX	Aço silício manganês com 0,85% de Mn e 2,0% de Si
93XX	93XX	Aços silício manganês com 3,25% de Ni, 1,20% de Cr e 0,12% de Mo
94BXX	94BXX	Aço níquel cromo molibdênio com baixos teores de Ni, Mo e no mínimo 0,0005% de B
98XX	98XX	Aço níquel cromo molibdênio com 1,0% de Ni, 0,80 de Cr e 0,25% de Mo

Fonte: Sistema de codificação SAE/AISI (2020)

Isso significa dizer que um aço identificado como 1045 contém 0,45 % em peso de carbono em sua composição química. Quando a letra B aparece entre os dois primeiros números e os dois últimos indica que o aço tem um teor de boro no mínimo 0,0005% em peso (o boro, quanto presente no aço em teores muito baixos, facilita a têmpera do aço, aumentando a sua resistência).

Quando o teor de carbono excede 1% o sistema admite a utilização de cinco algarismos. O aço prata, utilizado principalmente na fabricação de anéis, esferas e roletes de rolamentos, pois apresenta uma dureza elevada, é codificado como 52100 o que corresponde a, 1,5% Cr e 1% de carbono.

2.8 NORMAS DE FABRICAÇÃO

Segundo afirmado por Telles (2001), a necessidade de se regulamentar um projeto e a construção de vasos de pressão se fez necessária já no início do século XIX, como consequência principalmente das frequentes explosões de caldeiras que aconteceram nessa época, onde se iniciava junto com a Revolução Industrial o uso de máquinas movidas à vapor. O autor relata ainda que apesar de terem sido criadas na época diversas normas para fabricação, testes e inspeção destes equipamentos, estimava-se que só nos Estados Unidos ocorriam de 300 a 400 acidentes do tipo anualmente.

Groehs (2006), cita a explosão de uma caldeira de barco a vapor, ocorrida em 1865 no rio Mississippi, que acabou provocando o afundamento do barco e a morte de 1500 soldados. O autor menciona também a famosa explosão de uma caldeira de uma fábrica de calçados, ocorrida em 1905 na cidade de *Massachussets*, responsável pela morte de 58 pessoas, ferindo outras 117 e causando prejuízos materiais de U\$ 400000 dólares.

Ambos autores descrevem que após esse acidente foi organizado um conselho, que acabou criando e aprovando o primeiro conjunto de regras para o projeto e construção de caldeiras (*Massachussets Rules*) em 30/08/1907, constituído por apenas três páginas. Poucos anos depois, em 1911, um comitê da ASME (*American Society of Mechanical Engineers*) foi nomeado para estabelecer um conjunto de regras com o objetivo de servir de referência para o projeto e construção de caldeiras e vasos de pressão. Após algumas publicações referentes a caldeiras, o primeiro Código de Vasos de Pressão da ASME foi publicado em 1925.

Hoje, o código ASME (*ASME Boiler and Pressure Vessel Code*) é constituído por onze seções, sendo que oito delas estabelecem regulamentações relacionadas com vasos de pressão. Merece destaque, a Seção VIII que é subdividida em três Divisões. São elas:

- Divisão 1 – “*Rules for Construction of Pressure Vessels*”;
- Divisão 2 – “*Rules for Construction of Pressure Vessels – Alternative Rules*”;
- Divisão 3 – “*Rules for Construction of Pressure Vessels – Alternative Rules for High Pressure Vessels*”.

Na atualidade, o ASME é o código de projeto mais adotado, portanto as Divisões da Seção VIII são utilizadas na grande maioria dos projetos de vasos de pressão espalhados pelas indústrias situadas no território nacional. Isso faz com que o conhecimento dos requisitos especificados pelas Divisões da Seção VIII se torne necessário por parte de qualquer profissional responsável pelas etapas de projeto, fabricação, testes e inspeções de vasos de pressão.

As normas de projeto de vasos de pressão, desenvolvidas por associações técnicas ou por sociedades de normatização públicas ou particulares de diversos países, têm como finalidade de padronizar e simplificar o cálculo deste tipo de equipamento, além de garantir condições mínimas de segurança para a operação.

No Brasil, a norma que rege os projetos de vasos de pressão mais utilizada é baseada no Código ASME Seção VIII Divisão 1. Essa norma prevê regras apenas para o dimensionamento dos componentes principais (cascos, tampos, bocais, flanges e reforços) submetidos a pressão interna ou externa, sem considerar ou estabelecer metodologia para avaliação de outros carregamentos como cargas devidas ao vento, esforços localizados em bocais, cargas cíclicas, gradientes e expansões térmicas, entre outros.

Além disso, a Divisão 1 limita a pressão tanto interna como externa de um vaso de pressão, o que faz com que essa divisão tenha limites de aplicabilidade.

Quando se fizer necessária a análise de alguma das cargas citadas acima (não previstas pela Divisão 1) ou, quando a pressão interna exceder o limite imposto pela Divisão 1, deve-se adotar o código ASME Seção VIII, Divisão 2 como referência.

Baseado nessas limitações (ou imposições) do Código ASME Seção VIII Divisão 1, e impulsionado pela curiosidade em aprender a metodologia de projeto da Divisão 2, o presente trabalho visa fazer um comparativo entre alguns requisitos envolvidos no projeto mecânico de um vaso de pressão que obedeça às diretrizes da Divisão 1 e da Divisão 2. Ao comparar esses requisitos, pretende-se analisar os fatores conservadores e econômicos de cada Divisão, que são de extrema importância nesses casos, tendo em vista os altos riscos que vasos de pressão podem oferecer e os custos elevados que estão sempre presentes nos projetos desses equipamentos.

2.8.1 ASME Seção VIII, Divisão 1

Surgindo em 1968, após uma revisão da antiga Seção VIII, a Divisão 1 é o código de maior aplicação no Brasil. Segundo Falcão (2002), sua filosofia de projeto resume-se em estabelecer regras apenas para dimensionamento dos componentes principais (casco, tampos, reduções, flanges, bocais e reforços), submetidos a pressão interna ou externa. Informa que outros carregamentos, como cargas devidas aos ventos e sísmicas, peso próprio e conteúdo, esforços localizados em suportes soldados no equipamento ou em bocais, cargas cíclicas devidas a flutuações de pressão e temperatura, gradientes e expansões térmicas, devem ser consideradas, porém não estabelece metodologia para esta avaliação.

De acordo com Telles (2001), no escopo dessa norma estão incluídos vasos de pressão de qualquer classe, com as seguintes exceções:

- Vasos sujeitos a chama e vasos para ocupação humana;
- Vasos com pressões de operação entre zero e 15 psig ($\approx 1\text{Kgf/cm}^2$), ou acima de 3.000 psig ($\approx 200\text{kgf/cm}^2$);
- Vasos com diâmetro de 6" ou menores;
- Vasos para água pressurizada com pressão de operação até 300 psig ($\approx 20\text{kgf/cm}^2$) e temperatura até 210°F (99°C);
- Vasos para água quente com capacidade de até 120 galões (0,454 m³), temperatura de operação até 200°F (93°C) e carga térmica até 200.000 BTU.

2.8.1.1 Tensões admissíveis segundo ASME Seção VIII, Divisão 1

De acordo com a Seção VIII, Divisão 1 (parágrafo UG-23), as tensões admissíveis de materiais a serem empregados no casco de vasos de pressão são fornecidas na Seção II, Parte D. A tabela 1A da Seção II informa as tensões admissíveis de materiais ferrosos para diversas temperaturas, enquanto a tabela 1B define as tensões admissíveis para materiais não-ferrosos. Os critérios para obtenção das tensões admissíveis dos aços, estão definidos no apêndice 1 da Seção II do código ASME, e um resumo destes é descrito abaixo. Para temperaturas abaixo da faixa de fluência, a tensão admissível de tração é o menor dos valores:

- 2/7 da mínima tensão de ruptura na temperatura ambiente;
- 2/7 da tensão de ruptura na temperatura de projeto;

- 2/3 da mínima tensão de escoamento na temperatura ambiente;
- 2/3 da tensão de escoamento na temperatura de projeto.

Já para temperaturas na faixa de fluência a tensão admissível de tração é o menor dos seguintes valores:

- 100% da tensão média para uma razão de fluência de 0,01% / 1000 horas;
- 67% da tensão média de ruptura ao fim de 1000000 horas;
- 80% da tensão mínima de ruptura a 1000000 horas.

2.8.2 ASME Secção VIII, Divisão 2

Com o título de “Regras alternativas de projeto” esta norma foi criada segundo Falcão (2002) em 1969 como alternativa à Divisão 1 e adota critérios e detalhes de projeto, fabricação, exames e testes mais rigorosos, além de tensões admissíveis mais elevadas.

De acordo com Telles (2001), esta norma inclui no seu escopo todos os vasos de pressão, sem impor limite de pressão máxima e, incluindo-se também os vasos instalados em embarcações e os vasos sujeitos a chama, desde que não abrangidos na Secções I, III e IV do código ASME. Porém, exige que o vaso seja destinado a um serviço específico preestabelecido e, para isso, o usuário deve preparar um documento formal denominado “Especificação de Projeto do Usuário”. Além disso, só pode ser utilizada em projetos onde o controle de operação e manutenção seja realizado durante toda a vida útil do vaso, pelo usuário, responsável pela Especificação de Projeto.

2.8.2.1 Tensões admissíveis segundo ASME Secção VIII, Divisão 2

Na Seção VIII, Divisão 2, o parágrafo 3-A.1.2 (do anexo 3-A) informa que os valores de tensões admissíveis permitidos por esta Divisão para materiais ferrosos devem ser retirados da Seção II Parte D, tabela 5A. Já a tabela 5B, irá fornecer esses dados para materiais não-ferrosos.

O critério para obtenção das tensões admissíveis é a seleção do menor valor dentre os seguintes:

- 1/3 da mínima tensão de ruptura na temperatura ambiente;
- 1/3 da tensão de ruptura na temperatura de projeto;
- 2/3 da mínima tensão de cisalhamento na temperatura ambiente;
- 2/3 da tensão de cisalhamento na temperatura de projeto.

2.9 ESPECIFICAÇÃO ASTM PARA AÇO A-516

2.9.1 Especificação para chapas de aço carbono destinadas principalmente para serviços em vasos de pressão soldados

De acordo com a norma ASTM, um dos materiais mais comuns utilizados para a confecção de Vasos de Pressão é o aço A-516, devido as suas excelentes propriedades mecânicas e requisitos de tenacidade em serviços de baixa e médias temperaturas.

Existem quatro tipos de modulação do aço ASTM A-516 que são as graduações 55, 60, 65 e 70, variando entre si em seus níveis de resistência mecânica em função de seu teor de carbono, sendo o mais utilizado o grau 70 com níveis de 0,27 a 0,30% de carbono em sua composição e resistência à tração de 486 a 620 Mpa.

Na Tabela 6 podemos comparar os diferentes níveis de graduação do aço ASTM A-515 de acordo com suas propriedades de resistência à tração.

Tabela 6: Graduações do aço ASTM A-516

GRAU U.S (SI)	RESISTÊNCIA À TRAÇÃO KSI (Mpa)
55 [380]	55-75 [380-515]
60 [415]	60-80 [415-550]
65 [450]	65-85 [450-585]
70 [485]	70-90 [485-620]

Fonte: Adaptado de ASTM.

A espessura máxima das chapas fornecidas é limitada apenas pela capacidade da composição de atender as especificações e aos requisitos de propriedades necessários, no entanto, atualmente limita-se a espessura máxima das chapas fornecidas de acordo com a especificação ASTM como é mostrado na Tabela 7.

Tabela 7: Espessura das chapas fornecidas de acordo com a norma ASTM

GRAU U.S (SI)	ESPESSURA MÁXIMA POL (MM)
55 [380]	12 [305]
60 [415]	8 [205]
65 [450]	8 [205]
70 [485]	8 [205]

Fonte: Adaptado de ASTM

2.9.1.1 Requisitos para compras de chapas ASTM A-516 de acordo com a norma

De acordo com a norma ASTM, o material fornecido de acordo com esta especificação deve estar em conformidade com a especificação A 20 / A 20M. Esses requisitos determinam os métodos e procedimentos de teste e reteste, as variações permitidas nas dimensões e massa, qualidade e reparo de defeitos, marcação, carregamento, etc.

A especificação A 20 / A20M também estabelece as regras para as informações do pedido que devem ser cumpridas quando compra de material para esta especificação.

Além dos requisitos básicos desta especificação, certos requisitos suplementares estão disponíveis quando controle, teste ou exame adicionais são necessários para atender requisitos de uso final. Esses incluem:

- Tratamento a vácuo.
- Teste de tensão adicional ou especial.
- Teste de impacto.
- Exame não destrutivo.

2.9.1.2 Requisitos de fabricação para chapas de aço ASTM A-516

O aço deve ser acalmado e deve estar em conformidade com o requisito de tamanho de grão austenítico fino de acordo com a especificação A 20 / A 20M.

2.9.1.3 Requisitos de tratamento térmico do aço ASTM A-516

De acordo com a norma ASTM, as chapas de 1,50 polegadas (40 mm) e menos de espessura são normalmente fornecidas na condição como laminadas. As chapas podem ser

fornecidas normalizadas ou com alívio de tensão, ou ambos.

Chapas com mais de 1,50 polegadas (40 mm) de espessura devem ser normalizadas. Quando os testes de tenacidade ao impacto são necessários nas placas de 11/2 polegadas (40 mm) e menos de espessura, as placas devem ser normalizadas a menos que especificado de outra forma pelo comprador.

Se aprovado pelo comprador, taxas de resfriamento mais rápidas do que aquelas obtidas por resfriamento ao ar são permitidas para melhoria da tenacidade, desde que as chapas sejam posteriormente tratadas com têmpera numa faixa de temperatura entre 1100 a 1300 ° F (595 a 705 ° C).

2.9.1.4 Requisitos de composição química do aço ASTM A516

Como especificado pela norma ASTM, o aço deve estar em conformidade com os requisitos químicos conforme mostrado na Tabela 8, a menos que modificado de outra forma de acordo com Requisito Suplementar S17, Aço Carbono Desoxidado com Vácuo, existente na especificação A 20 / A20M.

Tabela 8: Composição química do aço ASTM A516

Elements	Composition, %			
	Grade 55 [Grade 380]	Grade 60 [Grade 415]	Grade 65 [Grade 450]	Grade 70 [Grade 485]
Carbon, max ^A :				
½ In. [12.5 mm] and under	0.18	0.21	0.24	0.27
Over ½ In. to 2 In. [12.5 to 50 mm], Incl	0.20	0.23	0.26	0.28
Over 2 In. to 4 In. [50 to 100 mm], Incl	0.22	0.25	0.28	0.30
Over 4 to 8 In. [100 to 200 mm], Incl	0.24	0.27	0.29	0.31
Over 8 In. [200 mm]	0.26	0.27	0.29	0.31
Manganese:				
½ In. [12.5] and under:				
Heat analysis ^B	0.60–0.90	0.60–0.90	0.85–1.20	0.85–1.20
Product analysis ^B	0.55–0.98	0.55–0.98	0.79–1.30	0.79–1.30
Over ½ In. [12.5]:				
Heat analysis	0.60–1.20	0.85–1.20	0.85–1.20	0.85–1.20
Product analysis	0.55–1.30	0.79–1.30	0.79–1.30	0.79–1.30
Phosphorus, max ^A	0.035	0.035	0.035	0.035
Sulfur, max ^A	0.035	0.035	0.035	0.035
Silicon:				
Heat analysis	0.15–0.40	0.15–0.40	0.15–0.40	0.15–0.40
Product analysis	0.13–0.45	0.13–0.45	0.13–0.45	0.13–0.45

Fonte: ASTM

2.9.1.5 Requisitos de resistência mecânica do aço ASTM A516

O material conforme representado pelos corpos de prova de tensão devem estar em conformidade com os requisitos mostrados na Tabela 9.

Tabela 9: Requisitos de resistência mecânica do aço ASTM A516

	Grade			
	55 [380]	60 [415]	65 [450]	70 [485]
Tensile strength, ksi [MPa]	55-75 [380-515]	60-80 [415-550]	65-85 [450-585]	70-90 [485-620]
Yield strength, min, ^A ksi [MPa]	30 [205]	32 [220]	35 [240]	38 [260]
Elongation in 8 in. [200 mm], min, % ^B	23	21	19	17
Elongation in 2 in. [50 mm], min, % ^B	27	25	23	21

^ADetermined by either the 0.2 % offset method or the 0.5 % extension-under-load method.
^BSee Specification A 20/A20M for elongation adjustment.

Fonte: ASTM

2.10 SUPORTE CERÂMICO PARA SOLDAGEM

Os suportes cerâmicos para soldagem são utilizados nas soldagens onde se faz necessária uma penetração total do cordão de solda na junta soldada. Este método tem se mostrado muito eficaz para a realização desse tipo de soldagem, reduzindo o custo de fabricação e o tempo de soldagem da junta.

O uso do suporte cerâmico em operações de soldagem apresenta um forte impacto tecnológico, pois reduz o número de passes de solda, reduz o volume do metal depositado, elevando a produtividade e reduzindo os custos da operação de soldagem (ALMEIDA et al.,2009).

De acordo com Malin (2001), dentre os mais variados tipos de suportes cerâmicos usados na soldagem de penetração total, vale se atentar ao suporte cerâmico adequado, que tem a capacidade de resistir a elevada temperatura da poça de solda quando no estado líquido, evitar a formação de gases durante a execução da soldagem e propiciar um acabamento adequado do cordão de solda, mantendo-o isento de defeitos.

Como foi relatado por Calister (2002), em função das suas características, como baixa densidade, baixa condutividade térmica, alta resistência à corrosão e à abrasão, capacidade de suportar altas temperaturas sem se deformar, a utilização dos materiais cerâmicos tem crescido significativamente em uma infinidade de aplicações.

Quando requerida penetração total, a soldagem do passe de raiz e o processo de preparação do segundo lado são uma das etapas mais difíceis dentre todo o procedimento de união de chapas. Nesse caso, o passe de raiz sem backing deve ser executado de forma muito bem controlada, para evitar a perfuração das chapas. Isso leva à utilização de processos de baixa produtividade, como Eletrodos, TIG e MIG/MAG short arc. Os baixos níveis de energia que devem ser mantidos para não perfurar a raiz aumentam a possibilidade de ocorrência de problemas, como falta de fusão e falta de penetração. O acabamento indesejável também é frequentemente obtido (ESAB,2021).

Segundo Esab (2021), quando se fala em soldagem com penetração total da junta, esse processo é tão problemático que se opta por remover todo o primeiro passe, através do processo de goivagem, e realizar uma contra-solda. Tudo isso leva à redução da produtividade e ao aumento dos custos, sem contar no trabalho de capacitação de soldadores para executar tal tarefa. No caso de soldadores mal preparados, ainda se tem um elevado índice de retrabalho.

Como vantagens na utilização dos suportes cerâmicos para soldagem, podemos listar os seguintes itens:

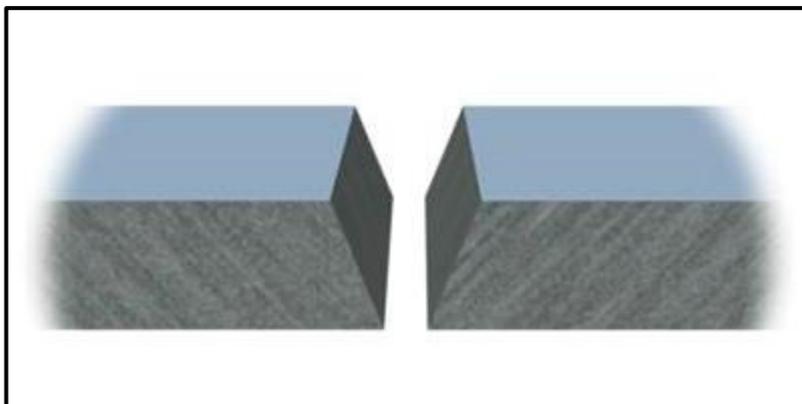
- Não ocorre perfuração no passe de raiz;
- Elevadas taxas de deposição;
- Maior velocidade de soldagem;
- Excelente penetração na junta com ótimo acabamento;
- Minimiza problemas de falta de fusão na raiz da solda;
- Elimina processos de goivagem, esmerilhamento e remoção do primeiro passe;
- Maior facilidade de soldagem;

Inicialmente, esses materiais foram utilizados no segmento naval. Entretanto, devido a sua excelente performance e desempenho, estes passaram também a ser aplicados em variados segmentos de mercado, como na fabricação de vasos de pressão, de pontes e fabricação siderúrgica em geral.

Nas Figuras 19, 20, 21 e 22, podemos observar passo a passo um suporte cerâmico sendo utilizado para soldagem de penetração total.

- Na primeira etapa, como mostra a Figura 19, deve ser feita uma correta preparação da junta a ser soldada para que a utilização do suporte cerâmico seja eficaz. Deve-se respeitar as condições de limpeza, ângulo da junta, abertura de raiz e nariz da junta.

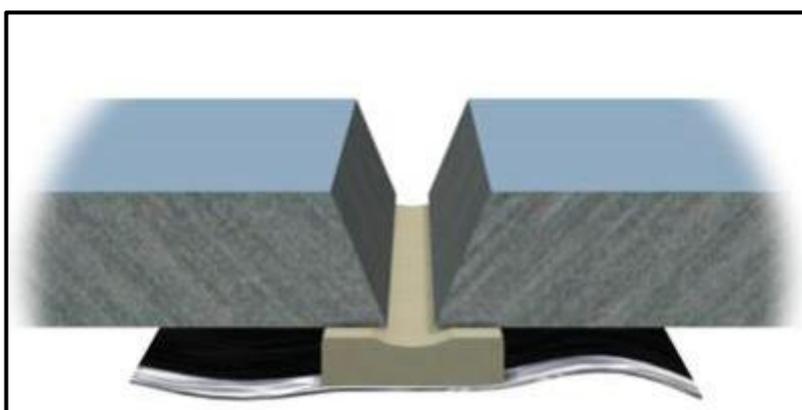
Figura 19: Preparação da junta para utilização de suporte cerâmico.



Fonte: <https://www.esab.com.br/br/pt/education/blog/backings-ceramicos.cfm>

- Na etapa seguinte, é feita a colagem do suporte cerâmico do lado oposto a ser soldado, para que haja a penetração total da junta, como podemos observar na Figura 20.

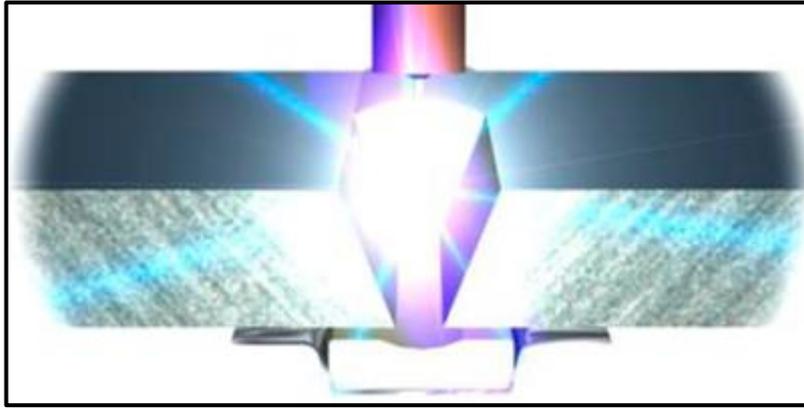
Figura 20: Colagem do suporte cerâmico na junta.



Fonte: <https://www.esab.com.br/br/pt/education/blog/backings-ceramicos.cfm>

- Na etapa seguinte, como mostra a Figura 21, é realizada a soldagem da junta com o suporte cerâmico já fixado na face oposta.

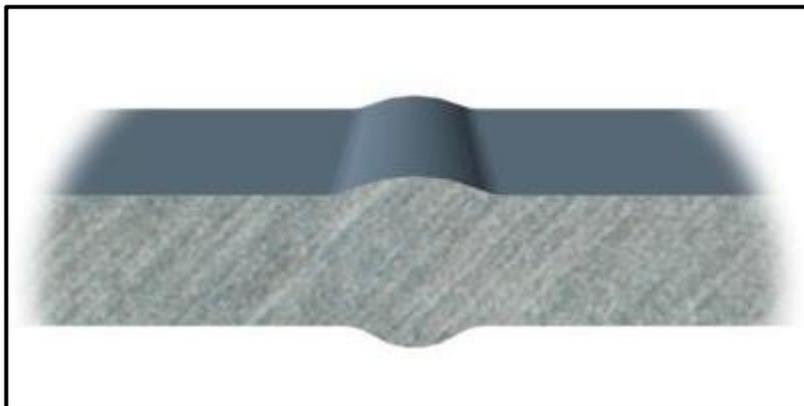
Figura 21: Soldagem da junta com o suporte cerâmico.



Fonte: <https://www.esab.com.br/br/pt/education/blog/backings-ceramicos.cfm>

- Por fim, na última etapa e após a soldagem, é feita a remoção do suporte cerâmico e limpeza do cordão de solda executado como mostra a Figura 22.

Figura 22: Remoção do suporte cerâmico e limpeza da junta.



Fonte: <https://www.esab.com.br/br/pt/education/blog/backings-ceramicos.cfm>

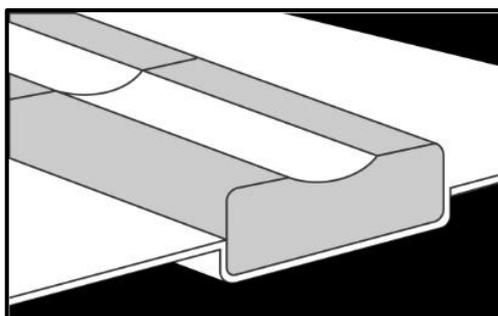
2.10.1 Tipos de suportes cerâmicos

Existem diversos tipos e dimensões de suportes cerâmicos. Como citado por Esab (2021), eles podem ser produzidos em formatos variados e específicos para cada tipo de aplicação. Por exemplo, na soldagem de um casco de navio, no qual se tem um raio de curvatura, é fabricado um tipo de suporte cerâmico específico, com o mesmo raio, para acompanhar a junta.

Quanto ao formato desses suportes, podemos encontrar com facilidade os suportes cerâmicos côncavos, suportes cerâmicos retangulares e suportes cerâmicos cilíndricos. A seguir poderemos observar a funcionalidade de cada um e suas aplicações.

- I. **Suportes cerâmicos côncavos:** são aqueles cujo chanfro possui um formato côncavo. Estes suportes podem ser utilizados nos processos de soldagem que geram pouca ou nenhuma escória, como os processos GMAW, arames tubulares *metal cored* (MCAW) e básicos. Quanto as posições de soldagem, se limita as posições plana (1G) e na vertical ascendente (3G). Para a soldagem em posição horizontal (2G), existe um suporte com formato especial onde um chanfro de menor profundidade na parte inferior e maior profundidade na parte superior garantem que os efeitos de gravidade sejam atenuados minimizando o risco do metal líquido escorrer e formar uma solidificação desigual. Na Figura 23 podemos observar o formato de um suporte cerâmico côncavo.

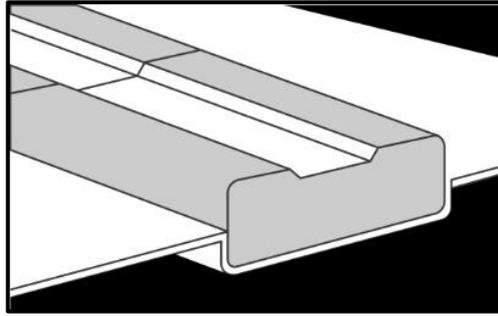
Figura 23: Suporte cerâmico côncavo.



Fonte: <https://www.esab.com.br/br/pt/education/blog/images/backing-ceramico-concave-ok.jpg>

- II. **Suportes cerâmicos retangulares:** estes suportes são mais indicados para processos que possuem uma elevada formação de escória, como o processo FCAW, e a soldagem pelo processo SAW. Este tipo de suporte permite uma melhor acomodação da escória garantindo um melhor acabamento na raiz da solda. Na Figura 24, poderemos analisar o formato de um suporte cerâmico desse tipo.

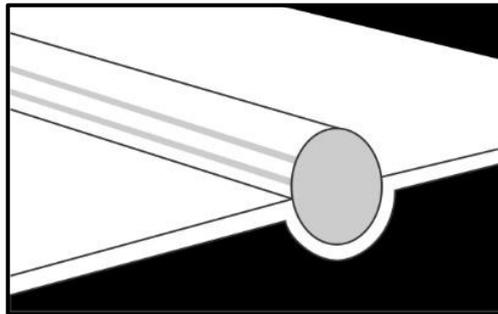
Figura 24: Suporte cerâmico retangular.



Fonte: <https://www.esab.com.br/br/pt/education/blog/images/backing-ceramico-retangular-ok.jpg>

- III. **Suportes cerâmicos cilíndricos:** estes suportes são indicados nos locais onde se necessita soldagem dos dois lados, como exemplo a soldagem em chanfros em “X” ou em “K”. Este tipo de suporte também é utilizado em soldagem de juntas de topo com pequenas inclinações e chanfros “meio V”, e podem ser utilizados para saoldagens nos processos FACW, MCAW, GMAW e SAW. Na Figura 25 podemos observar um suporte cerâmico de formato cilíndrico.

Figura 25: Suporte cerâmico cilíndrico.



Fonte: <https://www.esab.com.br/br/pt/education/blog/images/backing-ceramico-pipe-ok.jpg>

3 MATERIAIS E MÉTODOS

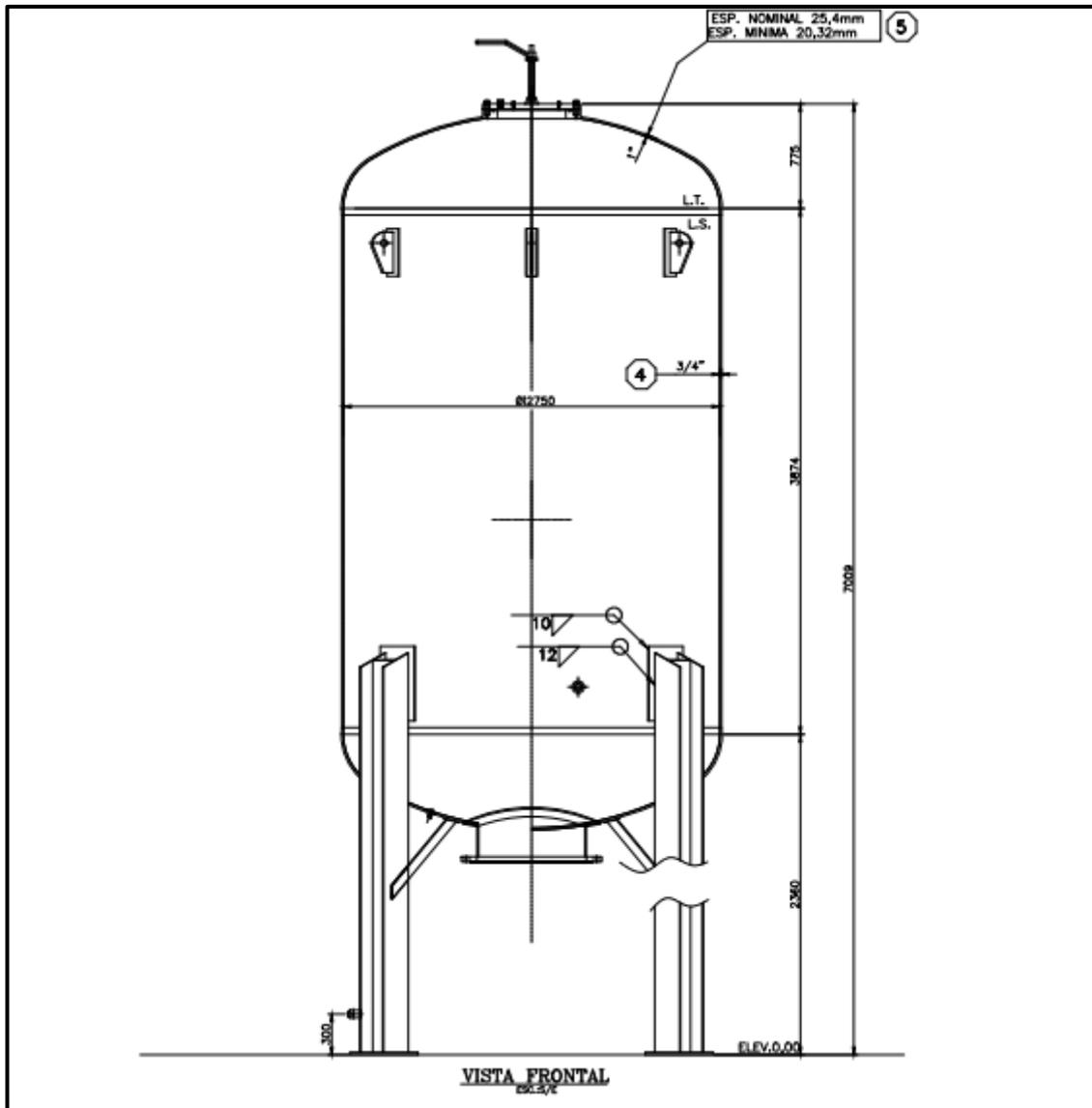
Esta etapa do trabalho, irá descrever todas as atividades realizadas para a confecção do Vaso de Pressão com o Aço ASTM A-516 seguindo todos os requisitos estabelecidos pela norma vigente e definindo todos os parâmetros que serão utilizados. O grau do aço escolhido para o projeto é o grau 70, que oferece uma resistência mecânica à tração de 485 a 620 Mpa.

- I. A primeira parte constitui das análises feitas no croqui pré-estabelecido com as dimensões em que o vaso de pressão deve ser elaborado.
- II. A segunda parte irá definir as RQPS, EPS e RQTS que deverão ser utilizadas para garantir a qualidade das juntas soldadas de acordo com os parâmetros.
- III. A terceira parte irá definir os consumíveis e os processos de soldagem que serão utilizados em cada junta do projeto.
- IV. Na quarta etapa, serão definidas as execuções das soldagens das juntas protótipo e avaliação da viabilidade do uso dos suportes cerâmicos para aumento do rendimento do processo.
- V. Na quinta etapa, será realizada a execução das soldagens das juntas protótipos com suporte cerâmico e sem suporte cerâmico para as posteriores análises.

I. ANÁLISE DO CROQUI DO VASO.

Nesta etapa, será analisado o croqui elaborado para o projeto do Vaso de Pressão, respeitando todos os requisitos estabelecido pela norma. Na Figura 26 podemos observar o esquema do vaso de pressão que será utilizado.

Figura 26: Croqui do Vaso de Pressão.



Fonte: O autor.

Na sequência, podemos analisar na Figura 27, com mais detalhes, a legenda do desenho proposto para o projeto do vaso e seus componentes.

Figura 27: Legenda do desenho do Vaso de Pressão.

POS	QTD	DENOMINAÇÃO	DIMENSÃO	MATERIAL	OBS.
13B	1	PLUG 3000#	Ø2" NPT	ASTM A105	
13A	1	MEIA-LUVA 3000#	Ø2" NPT	ASTM A105	
13	1	MEIA-LUVA 3000#	Ø1/4" BSP	ASTM A105	
12	1	MEIA-LUVA 3000#	Ø1" NPT	ASTM A105	
11	2	MEIA-LUVA 3000#	Ø1/4" NPT	ASTM A105	
10	2	B. REDONDA-ALÇA	Ø3/4"x310	SAE 1020	
8	1	CHAPA-FLG CEGO PN16 ØN600 #2"	Øe840	ASTM A516-70	
7	1	CHAPA-FLG PAD PN16 ØN600 #3"	Øe840xØi600	ASTM A516-70	
6	1	CHAPA-FLG PN16 ØN900 #2"	Øe1125xØi903	ASTM A516-70	
5	2	CHAPA-CALOTA #1"	Øi2750	ASTM A516-70	
4	1	CHAPA-CORPO #3/4"	Øi2750x3774	ASTM A516-70	
3	1	CHAPA-REFORÇO #1/2"	Øe1300xØi903	ASTM A516-70	
2	1	CHAPA-TUBO CALANDRADO #1/2"	Øe900x278	ASTM A516-70	
1	1	CHAPA #1/8"	Ø155	SAE 1020	
POS	QTD	DENOMINAÇÃO	DIMENSÃO	MATERIAL	OBS.

Fonte: O Autor.

Todos os componentes descritos acima deverão ser unidos por processo de soldagem, obedecendo os parâmetros estabelecidos na EPS.

II. ELABORAÇÃO DA RQPS, EPS e RQTS.

Nesta segunda etapa, serão definidas: RQPS, EPS, RQTS, que estarão disponíveis devidamente preenchidas nos apêndices 1,2 e 3. Todos estes procedimentos devem ser seguidos rigorosamente para garantir a total qualidade do equipamento.

O tipo de chanfro escolhido para a soldagem dos empalmes das virolas será o chanfro em V, e deverá ser estabelecida uma abertura de 5-8 mm para a execução de um passe de raiz com penetração total pelo processo FCAW, utilizando suporte cerâmico retangular para a garantia de um passe de raiz livre de discontinuidades.

O tipo de chanfro que deverá ser utilizado para a soldagem dos bocais, será o chanfro meio V, com abertura de 3-6 mm, para ser utilizado o processo de soldagem GTAW.

A soldagem das cabeceiras com o corpo do costado deverá ser realizada com o processo FCAW para os passes de raiz com o chanfro em V, com penetração total e utilização de suporte cerâmico retangular, respeitando uma abertura de 5-8 mm, e realização do enchimento da junta com o mesmo processo.

O processo GMAW deverá ser utilizado para soldagem das alças e acessórios de aço SAE1020.

III. ESCOLHA DOS CONSUMÍVEIS.

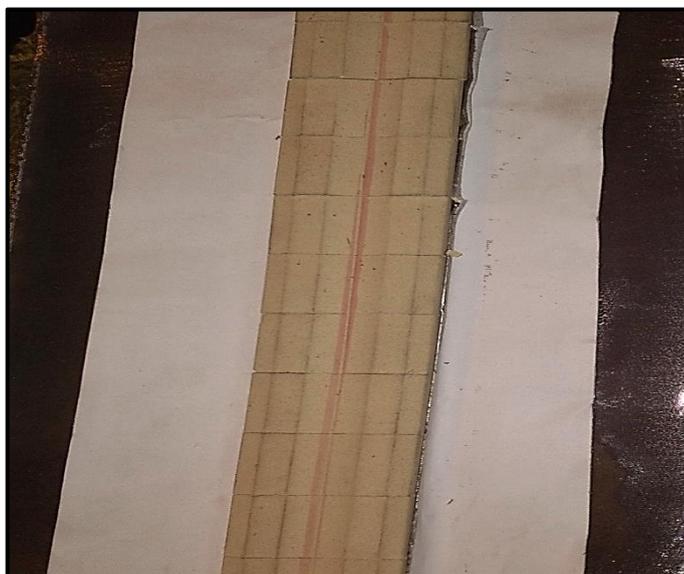
A escolha dos consumíveis deverá seguir os requisitos pré-estabelecidos em norma, respeitando os limites de resistência exigidos pelo metal de base e se adequando ao melhor custo para o projeto. Serão usados os consumíveis estabelecidos em norma para a soldagem do aço ASTM A-516 GRAU 70. Os consumíveis escolhidos para cada tipo de soldagem são:

- ASME SFA 5.36: E71T1-C1 (M21) A0 “FCAW”;
- AWS / ASME SFA 5.18: ER70S-6 “GMAW”;
- AWS/ASME SFA 5.18: ER70S-3 “GTAW”.

IV. EXECUÇÃO DOS PROCEDIMENTOS DE SOLDAGEM.

As soldas realizadas para a confecção do costado e posteriormente para a união das cabeceiras com o costado, deverão ser realizadas pelo processo FCAW, de acordo com a EPS número 2, adotando a utilização do suporte cerâmico retangular para os passes de raiz conforme mostrado na Figura 28.

Figura 28: Suporte cerâmico retangular.



Fonte: O autor.

Todas as juntas devem ser inspecionadas por Ensaio Visual de Solda (EVS), Ensaio de Líquido Penetrante (LP) ou Partículas Magnéticas (PM) e ensaio de ULTRASSOM / RAIÓ-X.

As soldas utilizadas para a soldagem dos bocais (C, D, E, H), e Boca de Visita deverão ser feitas pelo processo GTAW, sendo os bocais inspecionados por Ensaio Visual de Solda (EVS) e Líquido Penetrante e a Boca de Visita sendo inspecionada também por ULTRASSOM. Os parâmetros a serem seguidos constam na EPS número 3.

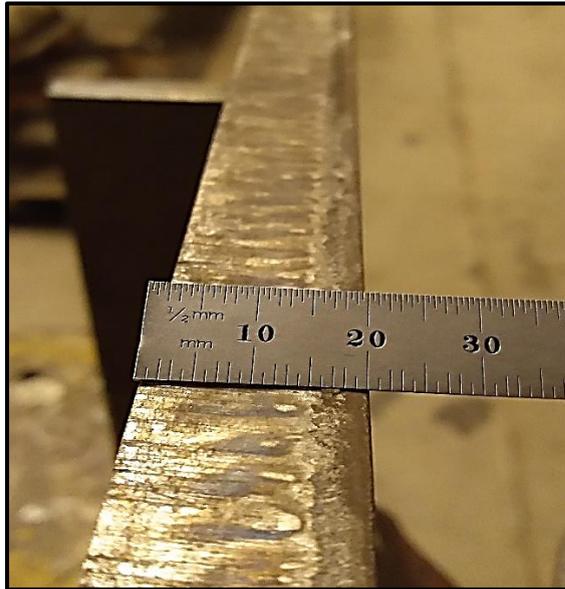
Por fim, a soldagem dos acessórios em aço SAE 1020, serão realizadas pelo processo GMAW, sendo inspecionados por Ensaio Visual de Solda (EVS) e Líquido Penetrante (LP) ou ensaio de Partículas Magnéticas (PM).

Depois de realizadas todas as soldagens e as devidas inspeções, o equipamento deverá ser tratado termicamente. Como recomendado na norma ASTM, o equipamento deve ser normalizado.

V. PREPARAÇÃO E SOLDAGEM DAS JUNTAS PROTÓTIPO (com suporte cerâmico e sem suporte cerâmico)

Nesta última etapa, foram desenvolvidas 2 juntas de solda protótipo para a execução dos testes de soldagem de acordo com a respectiva EPS para o processo. Ambos os corpos de prova são do material ASTM A-516 Gr-70, com espessura de 20 mm conforme mostrado na Figura 29.

Figura 29: Espessura dos corpos de prova.



Fonte: O autor.

Ambas as juntas foram preparadas de acordo com o recomendado, esmerilhadas para a remoção de impurezas que possam gerar descontinuidades durante a soldagem como contaminação por óleos ou graxas assim como as rebarbas do processo de corte e chanfro das chapas. Na figura 30 podemos observar esta etapa.

Figura 30: Preparação das chapas.

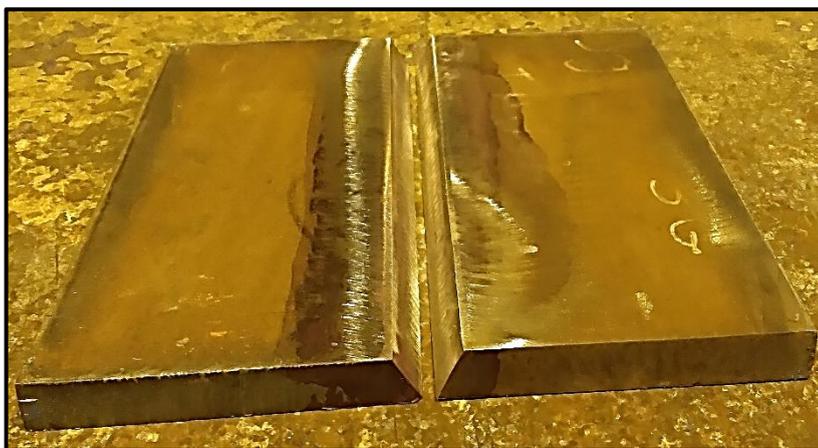


Fonte: O autor

Na sequência, as juntas foram montadas em configurações dissimilares para a posterior comparação entre os procedimentos de soldagem utilizados nesta etapa, ambas as juntas possuem 300 mm de comprimento. Nas Figuras 31 e 32, podemos observar a diferença entre as 2 juntas protótipos.

- A junta número 1, (Figura 31) foi montada para a utilização de suporte cerâmico para a execução do passe de raiz.

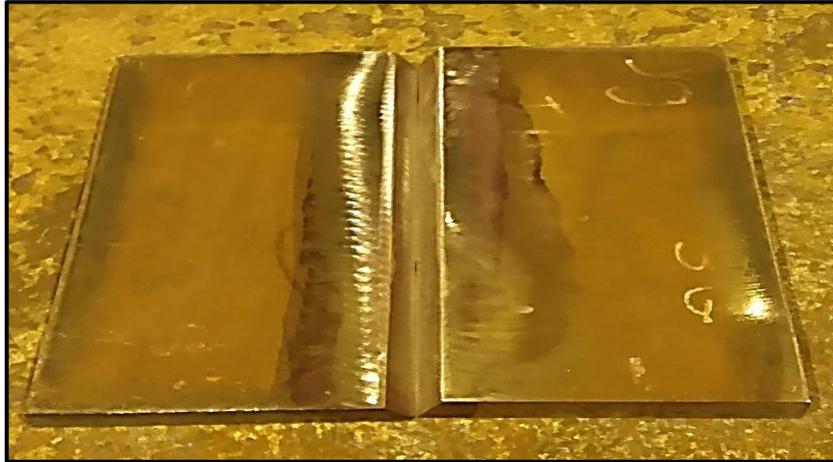
Figura 31: Junta protótipo 1.



Fonte: O autor.

- A junta número 2, (Figura 32) foi montada sem abertura de raiz, para a execução da soldagem com passe de selamento e posteriormente goivagem da contra solda.

Figura 32: Junta protótipo número 2.



Fonte: O autor.

Para a junta protótipo número 1, onde será adotado o uso de suporte cerâmico na soldagem do passe de raiz, foi adotado uma abertura de 5 milímetros como solicitado na EPS, e um nariz do bisel de 2 milímetros para este processo. Nas Figuras 33 e 34, podemos analisar esses parâmetros.

Figura 33: Abertura de raiz.



Fonte: O autor.

Figura 34: Espessura do nariz da junta.



Fonte: O autor.

Dando sequência na etapa de montagem, foi realizado o travamento das peças com intuito de garantir as dimensões desejadas durante a execução da soldagem das juntas. Na Figura 35 podemos observar este procedimento.

Figura 35: Travamento dos corpos de prova.



Fonte: O autor.

Posterior ao processo de travamento das peças, foi dado início a soldagem das juntas, respeitando todos os parâmetros estabelecidos na EPS elaborada e feito um acompanhamento do tempo necessário para a conclusão de cada etapa.

Primeiramente foi soldada a junta com utilização do suporte cerâmico e ponderado cada passo utilizado na soldagem da mesma. A soldagem desta junta consistiu nos 10 passos listados a seguir:

1. Colagem do suporte cerâmico na junta;
2. Regulagem dos parâmetros para a execução do passe de raiz;
3. Execução do passe de raiz;
4. Limpeza do passe de raiz e remoção da cerâmica utilizada;
5. Regulagem do parâmetro dos passes de enchimento;
6. Execução do enchimento da junta;
7. Regulagem para os passes de acabamento;
8. Execução dos passes de acabamento;
9. Remoção dos travamentos;
10. Limpeza da solda e da raiz para ensaio visual.

A colagem do suporte cerâmico e a execução do passe de raiz foi executada em um tempo de 2:30 minutos, e podemos observar na Figura 36 o passe de raiz após sua execução.

Figura 36: Passe de raiz com suporte cerâmico.



Fonte: O autor.

Dando sequência à execução da soldagem, foi feita a alteração dos parâmetros para o enchimento da junta e após a realização do enchimento foi feita novamente uma alteração nos parâmetros para a execução dos passes de acabamento.

O tempo total de soldagem, limpeza e preparo para EVS da junta número 1 foi de 41:24 minutos. Na figura 37 podemos observar a junta de solda finalizada após a remoção das travas e limpeza.

Figura 37: Junta número 1 finalizada.



Fonte: o autor.

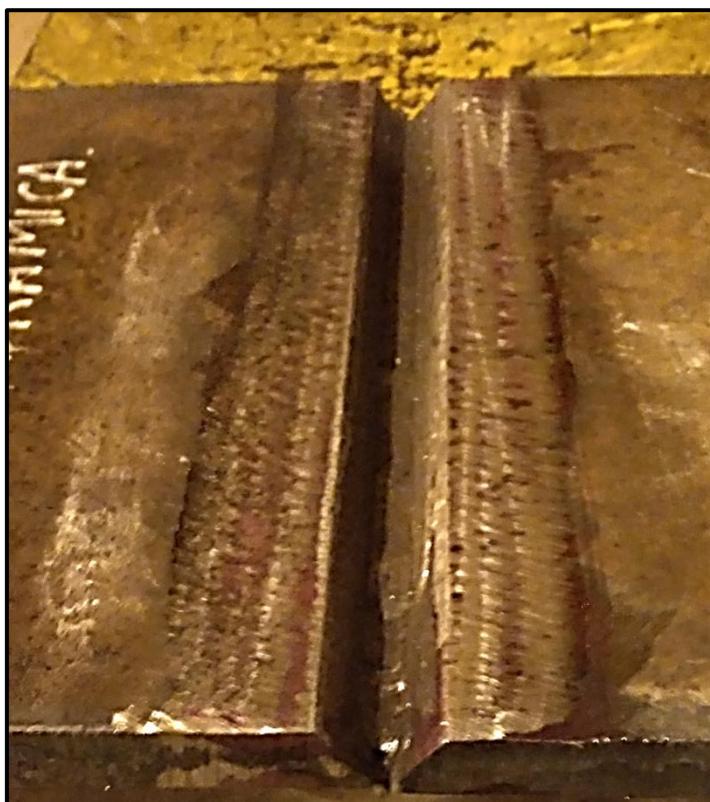
Na soldagem da junta sem suporte cerâmico, não foi necessário nenhum preparo antes da soldagem como abertura de raiz e espessura de nariz da junta. Os parâmetros para a execução da solda foram os mesmos adotados para a soldagem da junta número 1 e as etapas do processo foram divididas da seguinte maneira:

1. Regulagem dos parâmetros para o passe de selamento da junta;
2. Execução do passe de selamento;
3. Limpeza do passe de selamento;
4. Regulagem dos parâmetros para os passes de enchimento;
5. Execução do enchimento da junta;
6. Regulagem para os passes de acabamento;
7. Remoção dos travamentos;
8. Execução de goivagem do passe de selamento para remover as discontinuidades;
9. Esmerilhamento da área goivada para limpeza da goivagem;

10. Acompanhamento da temperatura da junta para realizar o ensaio de Líquido Penetrante na área goivada;
11. Aplicação do Líquido Penetrante;
12. Remoção do Líquido Penetrante após o tempo de penetração estabelecido no procedimento do ensaio;
13. Secagem da área goivada para aplicação do Revelador;
14. Aplicação do revelador na área goivada e espera para o laudo do Inspetor de acordo com o procedimento do ensaio;
15. Após o laudo do inspetor, realização dos passes de contra solda.
16. Limpeza da solda e contra solda para ensaio visual.

A execução do passe de selamento foi feita em um tempo de 1:02 minutos, e na Figura 38 podemos observar o aspecto do passe de selagem.

Figura 38: Passe de selagem.



Fonte: O autor.

Na sequência foi realizada a troca de parâmetro para enchimento da junta, e após esta etapa foi feita a adequação dos parâmetros novamente para a execução dos passes de acabamento. Para o enchimento total desta face da junta foi gasto um tempo de 39:30 minutos. Na Figura 39 podemos analisar o aspecto da junta número 2 após a realização da soldagem da primeira face.

Figura 39: Junta número 2 (lado 1).



Fonte: O autor

Posterior a soldagem do lado 1 da junta soldada sem suporte cerâmico, foi necessário a remoção do passe de selamento por método de goivagem com eletrodo de carvão para a retirada das discontinuidades oriundas deste processo.

Na Figura 40 é possível observar as discontinuidades existentes no passe de selamento, fazendo-se necessário o uso da goivagem por carvão para a remoção das mesmas.

Figura 40: Descontinuidades no passe de selagem.



Fonte: O autor.

O processo de goivagem e preparo da contra solda da junta ocorreu em um tempo de 7:29 minutos, considerando o tempo de remoção da contra solda com o carvão e o lixamento da goivagem para realização do ensaio de Líquido Penetrante.

Na Figura 41 podemos observar o processo de goivagem e preparo da junta para a realização do ensaio de Líquido Penetrante.

Figura 41: Goivagem da junta número 2.



Fonte: O autor

O ensaio de Líquido Penetrante só pôde ser realizado após um período de 25:28 minutos devido à temperatura alta encontrada na região onde seria realizado o ensaio. Por recomendação do procedimento de ensaio, não deve ser realizado o Líquido Penetrante em temperaturas maiores que 52°C. A temperatura foi monitorada por um pirômetro a laser como mostra a Figura 42.

Figura 42: Monitoramento da temperatura para ensaio de LP.



Fonte: O autor

Após a temperatura da peça atingir um patamar desejável para a realização do ensaio, foi feita a aplicação do Líquido Penetrante na região goivada e esmerilhada. Nas Figuras 43,44 e 45 podemos observar as etapas do ensaio de LP.

Figura 43: Aplicação do Líquido Penetrante.



Fonte: O autor.

Após o tempo de penetração exigido pelo procedimento do ensaio de no mínimo 15 minutos, foi feita a remoção do Líquido penetrante e após isso foi feita a aplicação do revelador na peça, e aguardado o período de 10 minutos para o laudo da inspeção.

Figura 44: Aplicação do revelador.



Fonte: O autor.

Após o laudo final da inspeção, a peça foi liberada para a realização da contra solda. O tempo utilizado para o ensaio de Líquido Penetrante na região goivada foi um total de 25:02 minutos.

Na Figura 45 podemos observar o laudo final do ensaio após todas as etapas do procedimento.

Figura 45: Laudo final do ensaio de LP.



Fonte: O autor.

Para a execução da contra solda foram necessárias mais 2 camadas de solda com 3 passes para o fechamento da junta, este procedimento foi realizado num prazo de 9:02 minutos.

Na Figura 46 podemos observar o lado 2 da peça após a execução da contra solda.

Figura 46: Contra solda.



Fonte: O autor.

Todas as etapas do processo foram acompanhadas e cronometradas a fim de se obter um comparativo o mais próximo da realidade dentro de um projeto de grandes proporções. Após todas as atividades serem realizadas, as juntas foram dispostas para as análises necessárias para ponderar as vantagens e desvantagens do uso de suporte cerâmico em um projeto de vaso de pressão.

4 ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Analisando as duas juntas após o término das atividades realizadas para a sua confecção, pode-se tecer um comparativo entre elas e assim destacar as principais diferenças entre os processos que foram utilizados.

Na Figura 47, podemos observar o aspecto do passe de raiz que foi executado com o uso de suporte cerâmico.

Figura 47: Passe de raiz com uso do suporte cerâmico.



Fonte: O autor.

Podemos observar que o passe de raiz se encontra livre de defeitos ou discontinuidades, o que elimina a necessidade de retrabalho nesse caso. Essa pode ser listada como a principal vantagem do uso de suportes cerâmicos para execução de passes de raiz além de:

- Maiores correntes de soldagem no passe de raiz;
- Não há perfuração da raiz;
- Altas taxas de deposição;
- Maiores velocidades de soldagem;
- Penetração confiável com excelente acabamento;
- Evita problemas de falta de fusão;
- Elimina goivagem, esmerilhamento e contra solda.

Em contraponto, este método de soldagem requer cuidados especiais como:

- Garantia de montagem fielmente realizada em acordo com os parâmetros necessários para o uso deste processo como abertura de raiz e espessura de nariz da junta;
- Limpeza adequada da junta antes de iniciar a soldagem;
- Habilidade do soldador no momento de executar a soldagem a fim de que evite penetração excessiva de soldagem;
- Descarte correto dos resíduos gerados, oriundos do uso do suporte cerâmico;
- Parâmetros adequados durante a soldagem do passe de raiz para evitar mordeduras.

A principal desvantagem quando ao uso dos suportes cerâmicos para a soldagem se dá quanto ao custo elevado desse artefato podendo chegar ao valor de R\$ 50,00 o metro, fazendo-se necessário o uso consciente desses suportes, uma vez que após perderem a aderência de seu adesivo ou após serem utilizados na soldagem propriamente dita não pode ser reaproveitado. Porém se comparado os dois processos é possível identificar que este investimento é viável levando-se em conta o prazo final para a soldagem de cada junta.

Na Tabela 10, podemos tecer o comparativo entre o tempo utilizado para a confecção de cada junta e justificar o uso do suporte cerâmico para a redução do prazo e consequentemente os custos do projeto.

Tabela 10: Comparação do tempo de soldagem.

Processo de soldagem	Tempo (minutos)						
	1º passe	Demais passes	goivagem	Tempo de resfriamento	Aplicação do LP	Aplicação do revelador e laudo	Contra solda
Com uso de suporte	2,3	41,24	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
Sem uso de suporte	1,2	39,3	7,29	25,28	15	10,02	9,02
	Tempo total do processo						
Com uso do suporte	43,54						
Sem uso do suporte	106,93						

Fonte: O autor.

Analisando o período utilizado para a soldagem das duas juntas, pode-se observar que houve uma redução no tempo total de fabricação de aproximadamente 65 minutos, o que justifica o uso do suporte cerâmico para esta operação.

Apesar do seu custo relativamente elevado, o suporte cerâmico se mostrou como uma ferramenta excelente para a redução do prazo do projeto, isso sem levar em conta o custo unitário de cada operação extra utilizado no processo de contra solda, já que se tratando de um projeto de grandes proporções, o custo final poderá ser elevado sem a utilização deste recurso. Além disso, a deposição do metal de adição no processo de soldagem sem o uso do suporte cerâmico foi maior do que a do processo em que se utilizou

o suporte.

Na soldagem com o uso de suporte cerâmico foi utilizado um total de 0,880 Kg de consumível, já na soldagem sem o uso do suporte foi gasto um total de 0,990 Kg de consumível, uma economia de 0,110 Kg de consumível entre os processos adotados.

Na Figura 48 podemos analisar a pesagem do consumível de acordo com sua utilização na soldagem das juntas.

Figura 48: Pesagem do consumível durante a soldagem.



Fonte: O autor.

Essa diferença se deu devido ao número de passes utilizados na soldagem de cada junta. A junta com suporte cerâmico foi feita com um total de 7 camadas e 13 passes de solda, já na junta onde foi realizada a goivagem e contra solda, foram feitas um total de 9 camadas e 17 passes de solda.

Na Figura 49 podemos comparar o aspecto da contra solda e da raiz com uso de suporte cerâmico.

Figura 49: Comparação entre contra solda e raiz com suporte.



Fonte: O autor.

Como ilustrado na figura, a soldagem com o uso do suporte cerâmico mantém características aproximadas as da contra solda, garantindo a qualidade na junta em caso de ensaio de ultrassom ou radiografia na região soldada. A raiz se encontra livre de descontinuidades e oferece um menor aporte térmico a peça devido a não necessidade de goivagem e consequentemente execução de contra solda na junta.

5 CONCLUSÃO

Posterior a todos os estudos realizados a fim de se determinar uma melhor maneira de se desenvolver um projeto de Vaso de Pressão com o aço ASTM A-516 grau 70, posso concluir que é de extrema importância um método adequado de soldagem e parâmetros rigorosos a serem seguidos para que o projeto seja bem sucedido.

Observando o material que foi proposto para os estudos desse trabalho e avaliando todos os requisitos compostos nas normas de fabricação, podemos notar que o uso dos suportes cerâmicos para a execução das soldas do equipamento são de extrema importância para a garantia de uma boa qualidade do produto e uma significativa redução no prazo e nos custos do projeto se compararmos os mesmos procedimentos de soldagem porém sem o uso dos suportes, sendo assim, fazendo-se necessário o uso de goivagem nas juntas além de se ter que realizar ensaios não destrutivos para a inspeção das juntas goivadas.

Tudo isso irá refletir no prazo e no custo do projeto, o que torna inviável dentro de um setor de produção toda essa perda. Vale ressaltar que os processos de soldagem utilizados nesse estudo oferecem um bom rendimento, porém estes processos podem ser otimizados para um maior desempenho, ou ainda ser avaliado a possibilidade do uso de outros processos de soldagem que ofereçam um maior rendimento para tal aplicação como por exemplo o uso do processo de soldagem por Arco Submerso (SAW).

A complexidade do projeto se dá pelo fato de todos os ensaios e requisitos de fabricação exigidos por norma, que devem ser respeitados e seguidos com rigor.

Analisando isso, deve-se ressaltar que a competitividade no mercado atual torna cada vez mais necessário o uso de novos métodos de fabricação e técnicas que reduzam cada vez mais prazos e custos diante de um projeto similar ao utilizado para este trabalho.

Fazendo tal comparativo entre os métodos de soldagem em uma junta de pequena proporção, já é notório a redução dos custos que o uso dos suportes cerâmicos nos dá, portanto se for feita uma projeção para este comparativo em um equipamento de proporções exponencialmente maiores a redução no prazo e custo do projeto podem ser o diferencial de mercado de uma empresa que utilize deste método de fabricação.

REFERÊNCIAS

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE ENSAIOS NÃO DESTRUTIVOS E INSPEÇÃO - ABENDI. **Processos de Fabricação** – 1a edição. São Paulo: Cromosete Gráfica e Editora LTDA, 2012.
- ANDREUCCI, Ricardo. **Líquidos Penetrantes**. Abendi, 2013.
- ANDREUCCI, Ricardo. **Partículas Magnéticas**. Abendi, 2009.
- ANDREUCCI, Ricardo. **Radiologia Industrial**. Abendi, 2009.
- ANDREUCCI, Ricardo. **Aplicação Industrial: Ensaio por Ultrassom**. Abendi, 2009.
- ALMEIDA, L.L.P., TATAGIBA, L.C.S., ROCHA, J.P., BASTOS, L.R., RIBEIRO, P.C., PARANHOS, R.P.R. "**Avaliação da Junta Soldada com Suporte Cerâmico a Base do Mineral Refratário Cordierita**." CD-ROM dos Anais do 5^o COBEF-Congresso Brasileiro de Engenharia de Fabricação - Seleção de Soldagem, Belo Horizonte, MG, Brasil, 2009.
- ASME Sec. VIII – Div. 1: "**Boiler and Pressure Vessel Code – Rules For construction of Pressure Vessels**". Ed. 2010.
- ASME Sec. VIII – Div. 2: "**Boiler and Pressure Vessel Code – Alternative Rules For Pressure Vessels**". Ed. 2013.
- ASME Sec. VIII – Div. 1: "**Boiler and Pressure Vessel Code – Rules For construction of Pressure Vessels**". Ed. 2010.
- ASME Sec. VIII – Div. 2: "**Boiler and Pressure Vessel Code – Alternative Rules For Pressure Vessels**". Ed. 2013.
- CHRISTINA, E. J. C.; **Avaliação de Soldas Produzidas por Arames Tubulares desenvolvidos em laboratório do tipo básico com adição de polímero como ingrediente do fluxo**. Dissertação (Mestrado) - Engenharia de Materiais, Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, Minas Gerais, 2015.
- CALLISTER JR., W. D. "**Ciência e Engenharia de Materiais**". 5ª ed. Rio de Janeiro: LTC, 589 p, 2002.
- ESAB- **Apostila de Soldagem MIG/MAG**. São Paulo. Última revisão em 25 de janeiro de 2005.
- ESAB. **Catalogo de Arames Tubulares**. ESAB – 2011. Disponível em: <https://www.esab.com.br/br/pt/products/filler-metals/gas-shielded-flux-cored-wires-fcaw/index.cfm> Acesso em: 20 de outubro de 2020.
- END – **Ensaio Não Destrutivo**. Associação Brasileira de Ensaio Não Destrutivo. 1996.
- ESAB, "**Soldagem com Backing cerâmicos**". Disponível em: <https://www.esab.com.br/br/pt/education/blog/backings-ceramicos-tipos-aplicacoes.cfm> Acesso em 03 de março de 2021.
- Falcão, C.; "**Vasos de Pressão e Trocadores de Calor Casco e Tubos**". Ministério da

Cultura, 2002.

Groehs, A.G.; **“Resistência dos Materiais e Vasos de Pressão”**, UNISINOS, 2006.

Guimarães, A.; **“Análise Comparativa dos Critérios do Código ASME, Seção VIII Divisão 1 e Divisão 2, para Tensões de Cascas Delgadas de Revolução, usando o Método dos Elementos Finitos”**, Universidade Federal do Rio de Janeiro, 1987.

HENRIQUE, F. G. C.; **Avaliação da perda de massa de revestimento duro depositado por soldagem com Arame Tubular de liga FeCrC-Ti**. Dissertação (Pós-Graduação) – Engenharia Mecânica e de Materiais, Universidade Tecnológica Federal do Paraná Campus de Curitiba, Curitiba, 2013.

INFOSOLDA. **Processo de Soldagem por Arame Tubular** – 2020. Disponível em: <https://www.infosolda.com.br> Acesso em: 20 de outubro de 2020.

LIMA, M. G. B.; **Estudos de Técnicas não Destrutivas na recuperação de marcações adulteradas em chapas metálicas**. Dissertação (Mestrado) – Engenharia Metalúrgica e de Materiais, UFRJ, Rio de Janeiro, 2018.

MARQUES, Paulo Villani; MODENESI, Paulo J; BRACARENSE, Alexandre Queiroz. **Soldagem: fundamentos e tecnologia**. 3. Ed. Atual. Belo Horizonte: UFMG, 2009.

MODENESI, J. P.; **Soldagem 1 Descontinuidades e Inspeção em Juntas Soldadas**, Belo Horizonte, 2001.

MALIN, V., **“Root Weld Formation in Modified Refractory Flux One-Sided Welding: part 1 - Effect of Welding Variables**, Welding journal, vol. 80 pp. 217s- 226s. e part 2 - Effect of Joint Geometry, Welding Journal, vol. 80 pp. 227s-237s, September, 2001.

RODRIGUES, L. O.; **Análise e Otimização de Parâmetros na Soldagem com Arame Tubular**. Dissertação (Mestrado) - Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 2005.

SOUZA, C. I.; FERRARESI, V. A. **Análise comparativa dos processos de soldagem GMAW e FCAW com transferência metálica por curto-circuito na posição horizontal**. Soldag. insp. v.18 n.3 São Paulo Jul/Set. 2013

STARLING, C. M. D.; MODENESI, P. J.; BORBA, T. M. D. **Caracterização do Cordão na Soldagem FCAW com um Arame Tubular “Metal Cored”**. Soldag. insp. São Paulo, v.16, n. 3, p.285-300, Jul/Set 2011.

SANTOS, M.G. - **Metodologia para Comparação entre Fonte Inversora e Eletromagnética para Eletrodos Revestidos**. Dissertação de Mestrado, UFU, 1995.

SILVA, C.R.; FERRARESI, V.A. e SCOTTI, A. - **A Quality and Cost for Welding Process Selection**. J. of the Braz. Soc. Mechanical Sciences, Vol. XXII, No.3, pp.389-398, 2000.

SANTOS, J.F. Oliveira. **Ensaio Não Destrutivos**. Portugal, Lisboa, 1999.

SCOTTI, A.; PONOMAREV, V., **Soldagem MIG/MAG: melhor entendimento, melhor desempenho** – São Paulo; Artiliber Editora, 2008.

SANTOS, C. E. F.; **Processos de Soldagem- conceitos, equipamentos e normas**. 1ª ed. São Paulo: Editora Èrika. 2015.

SOLDAGEM **Coleção Tecnologia SENAI**, São Paulo, Departamento Regional. Serviço Nacional de Aprendizagem Industrial SENAI, 1997.

TELLES, P.C.S.; “**Vasos de Pressão**”, LTC, 2ª edição, 2001.

WAINER, Emílio; BRANDI, Sérgio Duarte; MELLO, Fábio Décourt Homem de. (Coord.). **Soldagem: Processos e Metalurgia**. São Paulo: Edgard Blüncher Ltda, 2015.

APÊNDICE 1 EPS

ESPECIFICAÇÃO DE PROCEDIMENTO DE SOLDAGEM (Com base na Norma ASME Seção IX QW482)	
EMPRESA: FATEC PINDAMONHANGABA - SP	Aprovado por: Prof.: Lúcia de Almeida Ribeiro
Especificação de Procedimento de Soldagem Nº 1	Data 02/ 05 / 2021 RQPS Nº 01
Processo(s) de Soldagem: GMAW	Tipo proteção: Gasosa C-25
DETALHES	
DETALHE DA JUNTAS (QW- 402)	DESENHO DA JUNTA SOLDADA
Projeto da Junta: Topo	
Backing : () Sim (X) Não	
Material do Backing: () Metal () Metal não fusível () Não metálico () Outros:	
<p>- Croquis, desenhos de produção, símbolos de solda ou descrição escrita devem mostrar o arranjo geral das partes a serem soldadas. Onde for aplicável, a abertura da raiz e os detalhes do chanfro podem ser especificados. (Como opção do fabricante, os croquis podem ser anexados para ilustrar os projetos de juntas, camadas de solda e sequência de cordões, por exemplo, para procedimentos de tenacidade ao impacto, para procedimentos de processos múltiplos, etc.)</p>	
METAIS DE BASE (QW- 403) P3	METAIS DE ADIÇÃO (QW-404)
SAE 1020	Especificação AWS / ASME SFA 5.18: ER70S-6
Espessura Qualificada: N/A	Dimensão (mm): 1,2
Metal de Base: SAE 1020 Filete: N/A	Espessura Qualificada: N/A
Diâmetro Qualificado: Chanfro	Metal de Solda: N/A Chanfro: V Máx. Filetado
Outro: -----	Combinação Eletrodo-Fluxo (Classificação): N/A
POSIÇÕES (QW 405)	Marca Comercial do Fluxo: N/A
Posição(s) do Chanfro: JUNTA DE TOPO	Inerte Consumível: C-25

Progressão de Soldagem: (Ascendente e/ou Descendente:				Outro: N/A
Posição(s) do Filete:				
PRÉ-AQUECIMENTO (QW-406)				TRATAMENTO TÉRMICO APÓS SOLDAGEM (QW-407)
Temperatura de Preaquecimento (Mín.): N/A				Temperatura de Patamar: N/A
Temperatura de Interpasse (Máx.): N/A				Tempo de Patamar: N/A
Manutenção do Preaquecimento: (Aquecimento contínuo ou especial deve ser registrado)				Velocidade de Aquecimento (°C): N/A
GAS (QW-408)				Velocidade de Resfriamento (°C): N/A
Percentual de Composição				Temperatura de tratamento Inicial (°C): N/A
	Gás (es)	Mistura(s)	Fluxo (L/min)	Final (°C): N/A
Proteção	C-25	75% Ar 25%CO2	15-20	CARACTERÍSTICAS ELÉTRICAS (QW-409)
Adicional	N/A	N/A	N/A	Corrente: AC ou DC: CC+ Polaridade: Direta
Purga	N/A	N/A	N/A	Intens. de Corrente (faixa): 120-350 A
TÉCNICA (QW-410)				Tensão (faixa): 22-33 V
Cordão Retilíneo ou Oscilante: Retilíneo e Oscilante				Faixa de Velocidade de Alimentação do Arame (cm/min): N/A
Orifício ou dimensão do bico de cerâmica: N/A				Modo de Transferência Metálica: CURTO-CIRCUITO/ GLOBULAR
Limpeza inicial e interpasse: (escovamento, esmerilhamento, etc.)				
Método de Goivagem: Eletrodo de carvão ou esmerilhamento (se necessário)				
Distância entre o Tubo de Contato e a Peça (mm): 3-5				
Passe único ou Multipasses: MULTIPASSES				
Eletrodos Simples ou Múltiplos: SIMPLES				
Velocidade de Soldagem: 18-21 cm/min				
Martelamento:N/A				

Passo	Camada	Processo	Especif.	Classific.	Dim. mm	Corrente Polaridade	Ampér (I)	Tensão (V)	Veloc. Sold.	Outros
Raiz	N/A	GMAW	SFA 5.18	ER70S-6	1.2	CC+	125	22	21	N/A
Enchimento	N/A	GMAW	SFA 5.18	ER70S-6	1.2	CC+	200	30	18	N/A
Acabamento	N/A	GMAW	SFA 5.18	ER70S-6	1.2	CC+	250	32	20	N/A

ESPECIFICAÇÃO DE PROCEDIMENTO DE SOLDAGEM (Com base na Norma ASME Seção IX QW482)

EMPRESA: FATEC PINDAMONHANGABA - SP

Aprovado por: Prof.: Lúcia de Almeida Ribeiro

Especificação de Procedimento de Soldagem Nº 2

Data 02 / 05 / 2021 RQPS Nº 02

Processo(s) de Soldagem: FCAW

Tipo proteção: CO2

DETALHES

DETALHE DA JUNTAS (QW- 402)

Projeto da Junta:

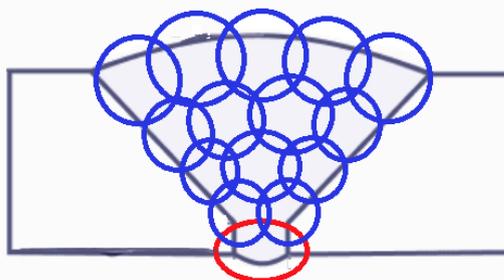
Topo

Backing : RETANGULAR

(X)Sim ()Não

Material do Backing: ()Metal ()Metal não fusível
(X)Não metálico ()Outros:

DESENHO DA JUNTA SOLDADA



- Croquis, desenhos de produção, símbolos de solda ou descrição escrita devem mostrar o arranjo geral das partes a serem soldadas. Onde for aplicável, a abertura da raiz e os detalhes do chanfro podem ser especificados. (Como opção do fabricante, os croquis podem ser anexados para ilustrar os projetos de juntas, camadas de solda e sequência de cordões, por exemplo, para procedimentos de tenacidade ao impacto, para procedimentos de processos múltiplos, etc.)

METAIS DE BASE (QW- 403) P3

METAIS DE ADIÇÃO (QW-404)

ASTM A-516 GRAU 70

Especificação: ASME SFA5.36:E71T1-C1(M21)

Espessura Qualificada: 25,4 mm

Dimensão (mm): 1,2

Metal de Base: ASTM A-516 GRAU 70 Filete: N/A

Espessura Qualificada: 25,4 mm

Diâmetro Qualificado: Chanfro				Metal de Solda: N/A Chanfro: V Máx. Filetado
Outro: -----				Combinação Eletrodo-Fluxo (Classificação): N/A
POSIÇÕES (QW 405)				Marca Comercial do Fluxo: N/A
Posição(s) do Chanfro: JUNTA DE TOPO				Inerte Consumível: CO2
Progressão de Soldagem: (Ascendente e/ou Descendente)				Outro: N/A
Posição(s) do Filete:				
PRÉ-AQUECIMENTO (QW-406)				TRATAMENTO TÉRMICO APÓS SOLDAGEM (QW-407)
Temperatura de Preaquecimento (Mín.): 15 °C				Temperatura de Patamar: N/A
Temperatura de Interpasse (Máx.): 250 °C				Tempo de Patamar: N/A
Manutenção do Preaquecimento: (Aquecimento contínuo ou especial deve ser registrado)				Velocidade de Aquecimento (°C): N/A
GAS (QW-408)				Velocidade de Resfriamento (°C): N/A
Percentual de Composição				Temperatura de tratamento Inicial (°C): N/A
	Gás (es)	Mistura(s)	Fluxo (L/min)	Final (°C): N/A
Proteção	CO2	N/A	15-25	CARACTERÍSTICAS ELÉTRICAS (QW-409)
Adicional	N/A	N/A	N/A	Corrente: AC ou DC: CC+ Polaridade: Direta
Purga	N/A	N/A	N/A	Intens. de Corrente (faixa): 120-400 A
TÉCNICA (QW-410)				Tensão (faixa): 22-35 V
Cordão Retilíneo ou Oscilante: Retilíneo e Oscilante				Faixa de Velocidade de Alimentação do Arame (cm/min): N/A
Orifício ou dimensão do bico de cerâmica: N/A				Modo de Transferência Metálica: CURTO-CIRCUITO/ GLOBULAR/ SPRAY
Limpeza inicial e interpasse: (escovamento, esmerilhamento, etc.)				
Método de Goivagem: Eletrodo de carvão ou esmerilhamento (se necessário)				
Distância entre o Tubo de Contato e a Peça (mm): 3-5				

Passes único ou Multipasses: MULTIPASSES	
Eletrodos Simples ou Múltiplos: SIMPLES	
Velocidade de Soldagem: 18-25 cm/min	
Martelamento:N/A	
Outro:	

Passo	Camada	Processo	Especif.	Classific.	Dim. mm	Corrente Polaridade	Amper (I)	Tensão (V)	Veloc. Sold.	Outros
Raiz	N/A	FCAW	ASME SFA5.36	E71T1- C1(M21)	1.2	CC+	120	22	25	N/A
Enchimento	N/A	FCAW	ASME SFA5.36	E71T1- C1(M21)	1.2	CC+	350	34	30	N/A
Acabamento	N/A	FCAW	ASME SFA5.36	E71T1- C1(M21)	1.2	CC+	300	32	25	N/A

ESPECIFICAÇÃO DE PROCEDIMENTO DE SOLDAGEM (Com base na Norma ASME Seção IX QW482)

EMPRESA: FATEC PINDAMONHANGABA - SP

Aprovado por: Prof.: Lúcia de Almeida Ribeiro

Especificação de Procedimento de Soldagem Nº 3

Data 02/ 05 / 2021 RQPS Nº 03

Processo(s) de Soldagem: GTAW

Tipo proteção: Gasosa Ar 99,9%

DETALHES

DETALHE DA JUNTAS (QW- 402)

Projeto da Junta:

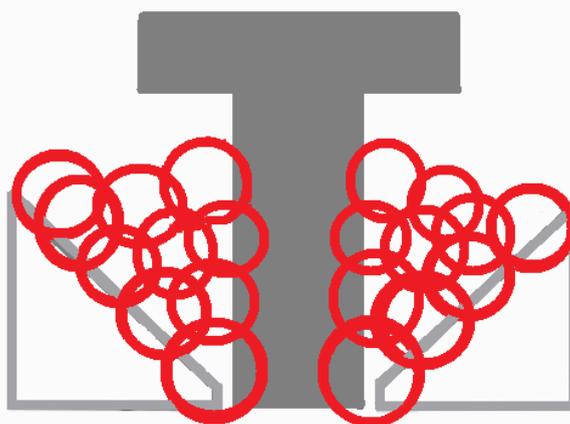
Topo/ ângulo

Backing :

() Sim (X) Não

Material do Backing: () Metal () Metal não fusível
() Não metálico () Outros:

DESENHO DA JUNTA SOLDADA



- Croquis, desenhos de produção, símbolos de solda ou descrição escrita devem mostrar o arranjo geral das partes a serem soldadas. Onde for aplicável, a abertura da raiz e os detalhes do chanfro podem ser especificados. (Como opção do fabricante, os croquis podem ser anexados para ilustrar os projetos de juntas, camadas de solda e sequência de cordões, por exemplo, para procedimentos de tenacidade ao impacto, para procedimentos de processos múltiplos, etc.)

METAIS DE BASE (QW- 403)

ASTM A-516 GRAU 70

Espessura Qualificada: N/A

Metal de Base: ASTM A-516 Filete: N/A

Diâmetro Qualificado: Chanfro

Outro: -----

POSIÇÕES (QW 405)

Posição(s) do Chanfro: JUNTA DE TOPO/ ÂNGULO

METAIS DE ADIÇÃO (QW-404)

Especificação AWS/ASME SFA 5.18: ER70S-3

Dimensão (mm): 3,2 mm

Espessura Qualificada: N/A

Metal de Solda: N/A Chanfro: V/ ângulo Máx. Filetado

Combinação Eletrodo-Fluxo (Classificação): N/A

Marca Comercial do Fluxo: N/A

Inerte Consumível: Argônio

Progressão de Soldagem: Ascendente				Outro: N/A
Posição(s) do Filete:				
PRÉ-AQUECIMENTO (QW-406)				TRATAMENTO TÉRMICO APÓS SOLDAGEM (QW-407)
Temperatura de Preaquecimento (Mín.): N/A				Temperatura de Patamar: N/A
Temperatura de Interpasse (Máx.): N/A				Tempo de Patamar: N/A
Manutenção do Preaquecimento: (Aquecimento contínuo ou especial deve ser registrado)				Velocidade de Aquecimento N/A
GAS (QW-408)				Velocidade de Resfriamento (°C): N/A
Percentual de Composição				Temperatura de tratamento Inicial (°C): N/A
	Gás (es)	Mistura(s)	Fluxo (L/min)	Final (°C): N/A
Proteção	Argônio	N/A	12-20	
Adicional	N/A	N/A	N/A	CARACTERÍSTICAS ELÉTRICAS (QW-409)
Purga	N/A	N/A	N/A	Corrente: AC ou DC: CC+ Polaridade: inversa
TÉCNICA (QW-410)				Intens. de Corrente (faixa): 110-250 A
Cordão Retilíneo ou Oscilante: Retilíneo e Oscilante				Tensão (faixa): 18-25 V
Orifício ou dimensão do bico de cerâmica: 8-12 mm				Faixa de Velocidade de Alimentação do Arame (cm/min): N/A
Limpeza inicial e interpasse: (escovamento, esmerilhamento, etc.)				Modo de Transferência Metálica: GLOBULAR
Método de Goivagem: Eletrodo de carvão ou esmerilhamento (se necessário)				
Distância entre o Tubo de Contato e a Peça (mm): N/A				
Passe único ou Multipasses: MULTIPASSES				
Eletrodos Simples ou Múltiplos: SIMPLES				
Velocidade de Soldagem: 8-20 cm/min				
Martelamento: N/A				

Outro:										
Passo	Camada	Processo	Especif.	Classific.	Dim. mm	Corrente Polaridade	Amper (I)	Tensão (V)	Veloc. Sold.	Outros
Raiz	N/A	GTAW	AWS/ASM E SFA 5.18	ER70S-3	3,2	CC-	100	18	15	N/A
Enchimento	N/A	GTAW	AWS/ASM E SFA 5.18	ER70S-3	3,2	CC-	190	25	10	N/A
Acabamento	N/A	GTAW	AWS/ASM E SFA 5.18	ER70S-3	3,2	CC-	165	32	10	N/A

APÊNDICE 2 RQTS

Registro de Teste de Qualificação de Soldador ou Operador Soldagem - RTQS			
Nome: Lucas de Souza Martins		Sinete: Y9	
Processo de Soldagem: FCAW/GMAW/GTAW		Tipo: Manual, semi-automatico	
De acordo com a EPS Num.: 01/02/03		Diâmetro/Espessura da Junta (Tubo): 25,4 mm	
Material: ASTM A-516 GRAU 70			
Faixa de espessura qualificada: N/A			
Metal de Adição			
Especificação: SFA/AWS/ASME Classificação: E71T1-C1(M21) / ER70S-3/ ER70S-6 F Number: 5.36/ 5.18/ 5.18			
Descrição (se for o caso): Especificação para os 3 tipos de procedimentos de soldagem abrangidos nesta RQTS			
Nome Comercial: N/A		Cobre junta: (X) Sim () Não Tipo: CERÂMICO	
Teste de Dobramento			
Tipo	Resultado	Tipo	Resultado
FCAW: CHARPY	90J 40 °C	FCAW: TRAÇÃO	630 MPa
GMAW: CHARPY	130 J 20 °C	GMAW: TRAÇÃO	560 MPa
GTAW: CHARPY	90 J -30 °C	GTAW: TRAÇÃO	515 MPa

Laboratório: FATEC PINDAMONHANGABA Teste Num.: 01 Teste Num.: 02 Teste Num.: 03						Responsável: Lúcia de Almeida Ribeiro Responsável: Lúcia de Almeida Ribeiro Responsável: Lúcia de Almeida Ribeiro					
Teste de Solda filete											
Aparência: VISUAL OK						Tamanho do filete: 300mm					
Teste Num.: 01						Responsável: Canetti					
Macrografia											
Laboratório: FATEC Pindamonhangaba						Responsável: Lúcia de Almeida Ribeiro					
Teste Num.: 01											
Radiografia											
Num. Filme	Resultado	Observação	Num. Filme	Resultado	Observação	Num. Filme	Resultado	Observação	Num. Filme	Resultado	Observação
001	Aprovado	N/A	004	Aprovado	Porosidade aceitável						
002	Aprovado	N/A	005	Aprovado	N/A						
003	Aprovado	N/A	006	Aprovado	Inclusão de escoria aceitável						
Teste num.: 01						Acompanhado por.: Lucas de Souza					
Fabricante ou Contratante: FATEC											
Aprovado por.: Lucas de Souza						Em 20 / 02 / 2021					
Aprovado por.: Lucas de Souza						Em 20 / 02 / 2021					

APÊNDICE 3 RQPS

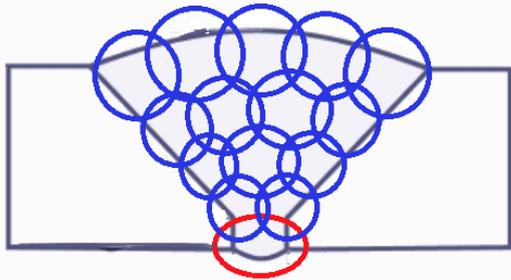
Registro de Teste de Qualificação de procedimento de soldagem - RQPS	
EMPRESA: FATEC PINDAMONHANGABA	Aprovado por: Lúcia de Almeida Ribeiro
EPS Usada Num: 01	Processo(s) de soldagem GMAW
Tipo e modelo de equipamento utilizado: N/A	
Juntas:01/02/03	Sequência de soldagem GMAW

Chanfro: Simples (X) Duplo()	
Fresta: 1-3 (mm) Nariz: 0-3 (mm)	
Ângulo do chanfro: 60° Raio: N/A (mm)	
Extração de Raiz: Sim () Não (X)	
Processo:GMAW	
Metal Base	Tratamento térmico Alívio de Tensão
Especificações: ASTM A-516	Temperatura: N/A Tempo: N/A
Tipo ou Grau 70	Outros: N/A
Grupo: N/A	
Espessura ou Diâmetro: 25,4 (mm)	
Revestimento	Gases
Material: N/A Espessura: N/A	Tipo(s) C25
Compos. Química: N/A	Mistura: 75% Ar / 25% CO2
Outros: N/A	Vazão: 15-20 L/min
Metal de adição e Fluxo	Características elétricas
Análise Química: C(0.10%), Si(0.50%), Mn(0.50%), Cr(1.30%), Mo(0.50%)	“Stick-out” 3-5 mm Stand-Off” N/A
Metal de adição: ER70S-6	Modo de transferência de metal: Globular/Curto-circuito
Especificação AWS: SFA/AWS A5.18	Tipo de eletrodo de Tungstênio: N/A
Classificação AWS: SFA/AWS A5.18 ER70S-3	Corrente: (X) CC+ () CC- () CA () Pulsado
Fluxo: N/A	Energia de soldagem: 3.08 kJ/mm

Inserto: Especific.: N/A		Classe:N/A		Pulsado: N/A			
Guia: Sim () Não (X) Tipo:				Outros: N/A			
Outros: N/A				Técnicas			
				Oscilação: Frequência		Amplitude:2,5 Ø Arame	
Posição de soldagem				Tempo de espera lateral:N/A			
Chanfro: 3G		Filete: Ascendente		Número de Passes: 15			
Pré Aquecimento				Número de eletrodos N/A			
Temperatura Inicial: 16 °C				Martelamento: N/A			
Temperatura entre passes: 250 °C				Limpeza: Escovagem/ Esmeril			
Método de aquecimento: Maçarico				Outros: N/A			
TESTE DE TRAÇÃO							
Tipo de CP: cilíndrico				Dimensões 6,15 / 25,4			
Chanfro: (x) Reforço () Pinos: ()				Limite de Resistência Mínimo: 420 MPa			
No. CP	Largura	Espessura	Área	Carga	Lim. Resist.	Tipo Fratura (frágil)	OBS.(Rompeu no metal base)
01	6,15	25,4	156,21 mm ²	5036 kgf	610 MPa	Frágil	Rompeu no metal base
02	6,18	25,4	156,97 mm ²	5038 kgf	620 MPa	Frágil	Rompeu no metal base
03	6,16	25,4	156,46 mm ²	5037 kgf	615 MPa	Frágil	Rompeu no metal base
TESTE DE DOBRAMENTO							
Dimensões do CP:120/1,6 mm							
Tipo teste	Resultado	Tipo teste	Resultado	Tipo teste	Resultado	Tipo teste	Resultado
Dobramento livre	APROVADO	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
Dobramento semi-guiado	APROVADO	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
TESTE DE IMPACTO							
Tipo: charpy		Dimensões do CP:50/5 mm		Temperatura:20 °C			
Localização do entalhe: Metal de Solda – MS, Metal Base – MB, Zona Termicamente Afetada – ZTA							
CP Num	Localização	Energia Absorvida	% Fratura Dúctil		Expansão Lateral		
01	SOLDA	70 J	N/A		N/A		
02	ZTA	90 J	N/A		N/A		

03	METAL BASE	75 J	N/A	N/A
Empresa/Laboratório: FATEC Pindamonhangaba Certificamos que os Resultados de ensaios registrados neste documento estão corretos e que as soldas examinadas foram preparadas, Soldadas e testadas conforme os requisitos da Norma Técnica, para este tipo de qualificação.				
FATEC Pindamonhangaba, <u>20 / 02 / 2021</u>			<u>FATEC</u> Aprovado	
<u>Lúcia de Almeida Ribeiro</u> Responsável			Revisão 01	

Registro de Teste de Qualificação de procedimento de soldagem - RQPS

EMPRESA: FATEC PINDAMONHANGABA		Aprovado por: Lúcia de Almeida Ribeiro	
EPS Usada Num: 02		Processo(s) de soldagem FCAW	
Tipo e modelo de equipamento utilizado: N/A			
Juntas:01/02/03		Seqüência de soldagem FCAW	
Chanfro: Simples (X) Duplo()			
Fresta: 5-8 (mm) Nariz: 2-5 (mm)			
Ângulo do chanfro: 60° Raio: N/A (mm)			
Extração de Raiz: Sim () Não (X)			
Processo: FCAW			
Metal Base		Tratamento térmico Alívio de Tensão	
Especificações: ASTM A-516		Temperatura: N/A Tempo: N/A	
Tipo ou Grau 70		Outros: N/A	
Grupo: N/A			
Espessura ou Diâmetro: 25,4mm			
Revestimento		Gases	
Material: N/A Espessura: N/A		Tipo(s) Dióxido de Carbono (CO2)	
Compos. Química: N/A		Mistura: N/A	

Outros: N/A				Vazão 15-25 L/min			
Metal de adição e Fluxo				Características elétricas			
Análise Química: C(0.05%), Si(0.50%), Mn(1.10%), Cr(1.20%), Mo(0.55%)				"Stick-out" N/A		Stand-Off" N/A	
Metal de adição: E71T1- C1(M21)				Modo de transferência de metal: Globular			
Especificação ASME: SFA 5.36				Tipo de eletrodo de Tungstênio: N/A			
Classificação AWS/ASME: SFA5.36: E71T1-C1(M21)				Corrente: (X) CC+ () CC- () CA () Pulsado			
Fluxo: N/A				Energia de soldagem: 2.688 kJ/mm			
Inserto: Especif.: N/A		Classe: N/A		Pulsado: N/A			
Guia: Sim () Não (X) Tipo:				Outros: N/A			
Outros: N/A				Técnicas			
				Oscilação: Frequência		Amplitude: 2,5Ø ELETRODO	
Posição de soldagem				Tempo de espera lateral: N/A			
Chanfro: 3G/1G		Filete: Ascendente/Puxando		Número de Passes: 15			
Pré Aquecimento				Número de eletrodos N/A			
Temperatura Inicial: 15°C				Martelamento: N/A			
Temperatura entre passes: 250 °C				Limpeza: Escovagem / Esmeril			
Método de aquecimento: Maçarico				Outros: N/A			
TESTE DE TRAÇÃO							
Tipo de CP: cilíndrico				Dimensões 6,15 / 25,4			
Chanfro: (x) Reforço () Pinos: ()				Limite de Resistência Mínimo: 485 MPa			
No. CP	Largura	Espessura	Área	Carga	Lim. Resist.	Tipo Fratura (frágil)	OBS.(Rompeu no metal base)
01	6,15	25,4	156,21 mm ²	5020 kgf	600MPa	Frágil	Rompeu no metal base
02	6,18	25,4	156,97 mm ²	5030kgf	620MPa	Frágil	Rompeu no metal base
03	6,16	25,4	156,46 mm ²	5045 kgf	610MPa	Frágil	Rompeu no metal base
TESTE DE DOBRAMENTO							
Dimensões do CP: 120/1,6 mm							
Tipo teste	Resultado	Tipo teste	Resultado	Tipo teste	Resultado	Tipo teste	Resultado
Dobramento livre	APROVADO	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A

Dobramento s/g	APROVADO	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
----------------	----------	-----	-----	-----	-----	-----	-----

TESTE DE IMPACTO

Tipo: charpy		Dimensões do CP:55/5mm		Temperatura: 20 °C	
Localização do entalhe: Metal de Solda – MS, Metal Base – MB, Zona Termicamente Afetada – ZTA					
CP Num	Localização	Energia Absorvida	% Fratura Dúctil	Expansão Lateral	
01	SOLDA	90 J	N/A	N/A	
02	ZTA	85J	N/A	N/A	
03	METAL BASE	83J	N/A	N/A	

Empresa/Laboratório: FATEC Pindamonhangaba
 Certificamos que os Resultados de ensaios registrados neste documento estão corretos e que as soldas examinadas foram preparadas, Soldadas e testadas conforme os requisitos da Norma Técnica, para este tipo de qualificação.

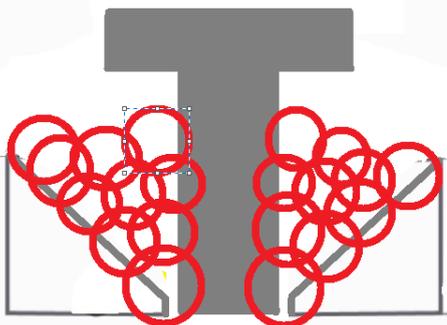
FATEC Pindamonhangaba, 20 / 02 / 2021

FATEC
Aprovado

Lúcia de Almeida Ribeiro
Responsável

Revisão 01

Registro de Teste de Qualificação de procedimento de soldagem - RQPS

EMPRESA: FATEC PINDAMONHANGABA		Aprovado por: Lúcia de Almeida Ribeiro	
EPS Usada Num: 03		Processo(s) de soldagem GTAW	
Tipo e modelo de equipamento utilizado: N/A			
Juntas:01/02/03		Sequência de soldagem GTAW	
Chanfro: Simples (X) Duplo()			
Fresta: 3-6 (mm) Nariz: 0-2 (mm)			
Ângulo do chanfro: 30° Raio: N/A (mm)			
Extração de Raiz: Sim () Não (X)			
Processo:GTAW			
Metal Base		Tratamento térmico Alívio de Tensão	
Especificações: ASTM A-516		Temperatura: N/A Tempo:N/A	

Tipo ou Grau 70				Outros: N/A			
Grupo: N/A							
Espessura ou Diâmetro: Ø76.2							
Revestimento				Gases			
Material: N/A		Espessura: N/A		Tipo(s) ARGÔNIO 99,9%			
Compos. Química: N/A				Mistura: N/A			
Outros: N/A				Vazão: 12-20 L/min			
Metal de adição e Fluxo				Características elétricas			
Análise Química: C(0.09%), Si(0.60%), Mn(0.60%), Cr(1.40%), Mo(0.50%)				"Stick-out" N/A		Stand-Off" N/A	
Metal de adição: ER70S-3				Modo de transferência de metal: Globular			
Especificação AWS: AWS SFA 5.18				Tipo de eletrodo de Tungstênio: WT20 (Thório)			
Classificação AWS: SFA 5.18 ER70S-3				Corrente: () CC+ (X) CC- () CA () Pulsado			
Fluxo: N/A				Energia de soldagem: 1.125 kJ/mm			
Inserto: Especific.: N/A		Classe:N/A		Pulsado: N/A			
Guia: Sim () Não (X) Tipo:				Outros: N/A			
Outros: N/A				Técnicas			
				Oscilação: Frequência		Amplitude:N/A	
Posição de soldagem				Tempo de espera lateral:N/A			
Chanfro: 5G		Filete: Ascendente		Número de Passes: 10			
Pré Aquecimento				Número de eletrodos N/A			
Temperatura Inicial: 120 °C				Martelamento: N/A			
Temperatura entre passes: 300 °C				Limpeza: Escovagem/ Esmeril			
Método de aquecimento: Maçarico				Outros: N/A			
TESTE DE TRAÇÃO							
Tipo de CP: cilíndrico				Dimensões6,15 / 25,4			
Chanfro: (x) Reforço () Pinos: ()				Limite de Resistência Mínimo:485 MPa			
No. CP	Largura	Espessura	Área	Carga	Lim. Resist.	Tipo Fratura (frágil)	OBS.(Rompeu no metal base)
01	6,15	25,4	156,21 mm ²	5050 kgf	620MPa		
02	6,18	25,4	156,97 mm ²	5050kgf	600 MPa	Frágil	Rompeu no metal base

