



UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO  
CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

THIAGO HENRIQUE BEZERRA DE SANTANA

**AVALIAÇÃO DA SOLDAGEM TIG COM ARAME E TIG ORBITAL AUTÓGENA NA  
UNIÃO TUBO-ESPELHO DE TITÂNIO PARA TROCADOR DE CALOR**

Recife  
2023

THIAGO HENRIQUE BEZERRA DE SANTANA

**AVALIAÇÃO DA SOLDAGEM TIG COM ARAME E TIG ORBITAL AUTÓGENA NA  
UNIÃO TUBO-ESPELHO DE TITÂNIO PARA TROCADOR DE CALOR**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Pernambuco como parte dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Engenharia Mecânica.

**Área de concentração:** Engenharia de Materiais e Fabricação.

**Orientador:** Prof. Dr. Tiago Felipe de Abreu Santos.

**Coorientador:** Prof. Dr. Marcos Pereira

Recife  
2023

Catálogo na fonte:  
Bibliotecário Carlos Moura, CRB-4/1502

S232a Santana, Thiago Henrique Bezerra de.  
Avaliação da soldagem TIG com arame e TIG orbital autógena na união tubo-espelho de titânio para trocador de calor. / Thiago Henrique Bezerra de Santana. – 2023.  
62 f.: il.

Orientador: Prof. Dr. Tiago Felipe de Abreu Santos.

Coorientador: Prof. Dr. Marcos Pereira.

Dissertação (mestrado) – Universidade Federal de Pernambuco. CTG. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica. Recife, 2023.

Inclui referências e anexos.

1. Engenharia mecânica. 2. Casco e tubo. 3. União tubo-espelho. 4. Fluido corrosivo. 5. Ensaio não destrutivo. I. Santos, Tiago Felipe de Abreu (orientador). II. Pereira, Marcos (coorientador). III. Título.

621 CDD (22. ed.)

UFPE  
BCTG/2023-226

THIAGO HENRIQUE BEZERRA DE SANTANA

**AVALIAÇÃO DA SOLDAGEM TIG COM ARAME E TIG ORBITAL AUTÓGENA  
NA UNIÃO TUBO-ESPELHO DE TITÂNIO PARA TROCADOR DE CALOR**

Aprovada em: 28/08/2023

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Pernambuco, Centro de Tecnologia e Geociências, como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica. Área de concentração: Engenharia de Materiais e Fabricação.

BANCA EXAMINADORA

---

Prof. Dr. Tiago Felipe de Abreu Santos (Orientador)  
Universidade Federal de Pernambuco

---

Prof. Dr. Guilherme Barbosa Lopes Júnior (membro interno)  
Universidade Federal de Pernambuco

---

Prof. Dr. André Albuquerque Vicente (membro externo)  
Universidade de São Paulo

## AGRADECIMENTOS

Ao meu orientador Prof. Dr. Tiago Felipe de Abreu Santos pelo apoio, orientação e compreensão ao longo deste trabalho, os quais foram essenciais para o correto direcionamento do objeto de estudo deste trabalho.

Ao proprietário da empresa Aguilar y Salas Brasil, Sr Manuel Salas, por disponibilizar equipamentos, documentos e material para o desenvolvimento do meu estudo.

Ao Diretor da empresa GRI Brazil, Sr Osmar Rocha, por disponibilizar a estrutura do laboratório da empresa para realização de ensaios para o desenvolvimento do meu estudo.

Aos amigos do SOLDAMAT, especialmente Igor Jordão, Ivan Picchi e Helen Araújo, pela parceria, orientação e apoio depreendido na elaboração de minha dissertação.

Ao Departamento de Engenharia Mecânica (DEMEC) e ao Programa de Pós-Graduação em Mecânica (PPGEM) - UFPE, pelo apoio institucional.

## RESUMO

Dentro da indústria química, em várias etapas dos processos de fabricação, faz-se necessário aquecer ou resfriar um fluido, antes ou depois de alguma fase da produção. Nessas etapas são utilizados os denominados trocadores de calor. Em algumas aplicações, quando o fluido utilizado é corrosivo, são necessários cuidados especiais, para garantir uma vida útil e rentável do equipamento. Quando o fluido utilizado, além de corrosivo é letal, são indispensáveis mais cuidados no projeto, para garantir, além de uma vida útil rentável, a redução significativa na probabilidade de vazamento/fuga. Os trocadores de calor que operam com fluidos corrosivos, possuem componentes fabricados em ligas de titânio, devido a sua excelente resistência à corrosão. Alguns destes componentes de titânio são soldados utilizando o processo TIG, com duas variantes: o modo convencional (manual) ou automático (autógeno). O intuito deste estudo foi analisar o comportamento do processo e as juntas soldadas nas duas variantes do processo TIG, empregando critérios técnicos de avaliação.

**Palavras-chave:** casco e tubo; união tubo-espelho; fluido corrosivo; ensaios não destrutivos.

## **ABSTRACT**

Within the chemical industry, at various stages of manufacturing processes, it is necessary to heat or cool a fluid, before or after some stage of production. In these steps, so-called heat exchangers are used. In some applications, when the fluid used is corrosive, special care is required to ensure a useful and profitable life of the equipment. When the fluid used, in addition to being corrosive, is lethal, more care in the project is essential to ensure, in addition to a profitable service life, a significant reduction in the probability of leakage/leakage. Heat exchangers that operate with corrosive fluids have components made of titanium alloys, due to their excellent resistance to corrosion. Some of these titanium components are welded using the TIG process, with two variants: conventional (manual) or automatic (autogenous). The purpose of this study was to analyze the behavior of the process and the welded joints in the two variants of the TIG process, using technical evaluation criteria.

**Key-words:** shell and tube; tube-to-tubesheet union; corrosive fluid; non-destructive tests.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - a) Trocador de calor duplo tubo e b) partes do trocador de calor .....	17
Figura 2 - Partes principais de um trocador de calor de placas .....	18
Figura 3 - Esquema de escoamento dos fluidos num trocador de calor de placas ...	18
Figura 4 - a) Trocador de calor tipo casco e tubo e b) funcionamento .....	19
Figura 5 - a) Trocador de calor com tubos retos e b) com tubos em U.....	20
Figura 6 - Principais componentes de um trocador de calor tipo casco e tubo .....	21
Figura 7 - Esquema de união tubo-espelho expandida .....	23
Figura 8 - Esquema de soldagem forte .....	24
Figura 9 - Esquema de soldagem forte e expandida.....	24
Figura 10 - Esquema de soldagem de vedação.....	24
Figura 11 - Exemplo de uma união tubo-espelho, com alguns tubos sem soldar .....	25
Figura 12 - Esquemático do processo TIG.....	26
Figura 13 - Configuração típica da soldagem TIG.....	26
Figura 14 - Exemplo de uma conexão soldada pelo processo TIG convencional .....	27
Figura 15 - Exemplo de cabeçote especial de soldagem para união tubo-espelho em trocadores de calor. Cabeçote TX38P - Fabricante: Orbitalun .....	28
Figura 16 - Câmara de soldagem, onde é gerado uma atmosfera inerte .....	29
Figura 17 - Diagrama esquemático da soldagem TIG do titânio .....	35
Figura 18 - Padrões de coloração do titânio, com diferentes níveis de contaminação por oxigênio.....	36
Figura 19 - a) Câmara de vácuo desenvolvida pela Aguilar y Salas para soldagem de pequenas peças de titânio. b) Interior da câmara .....	37
Figura 20 - Fluxograma da metodologia experimental utilizada ao longo do trabalho.	38
Figura 21 - Chapa de titânio usinada .....	40
Figura 22 - Montagem do tubo na chapa de titânio. (a) Desenho e (b) montagem...	41

Figura 23 - (a) Fonte de soldagem P6 – Polysoud; (b) Cabeçote TS 8/75 com câmara inerte .....	42
Figura 24 - Tubos soldados com o processo TIG orbital autógena .....	42
Figura 25 - Fonte de soldagem: 375 PRECISION TIG.....	43
Figura 26 - Tubos soldados com o processo TIG convencional.....	43
Figura 27 - Etapas realizadas no ensaio por LP: (a) aplicação do líquido penetrante; (b) resultado final do ensaio após aplicação do revelador.....	45
Figura 28 - União tubo-espelho soldado por TIG orbital e convencional.....	47
Figura 29 - Resultado revelado pelo ensaio de líquido penetrante .....	48
Figura 30 - ZTA (a) TIG orbital: cor palha clara; (b) TIG convencional .....	50
Figura 31 - Região da solda união tubo-espelho que foi analisad, a) TIG orbital e b) TIG convencional.....	50
Figura 32 - Ensaio de FRX. a) Lado esquerdo, TIG orbital; b) Lado direito, TIG orbital; c) Lado esquerdo, TIG convencional; d) Lado direito, TIG convencional .....	51

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Propriedades do titânio .....	30
Tabela 2 - Composição nominal das ligas de titânio comercialmente puras .....	32
Tabela 3 - Avaliação da soldagem relacionada a sua coloração .....	36
Tabela 4 - Composição química da Chapa de Titânio SB-265 Gr.7.....	39
Tabela 5 - Propriedades mecânicas da Chapa de Titânio SB-265 Gr.7.....	39
Tabela 6 - Composição química e propriedades mecânicas do tubo titânio SB-338 Gr.2 .....	39
Tabela 7 - Propriedades mecânicas do tubo de titânio SB-338 Gr.2.....	40
Tabela 8 - Composição química da vareta de solda ER-Ti-02.....	40
Tabela 9 - Dados colhidos durante a soldagem do corpo de prova .....	44
Tabela 10 - Resultado da inspeção visual do corpo de prova .....	47
Tabela 11 - Tabela comparativa de dureza.....	49
Tabela 12 - Informações coletadas do ensaio de FRX, na região da zona fundida (ZF) .....	51

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

Ar	Argônio
MB	Metal Base
Ti	Titânio
Ti c.p.	Titânio comercialmente puro
TIG	Tungsten Inert Gás
ZF	Zona Fundida
ZTA	Zona Termicamente Afetada
EVS	Ensaio Visual de Soldagem
HV	Hardness Vickers
H	Hidrógeno
Fe	Ferro
O	Oxigênio
C	Carbono
Pd	Paládio
N	Nitrogênio
END	Ensaio Não Destrutivo
ASME	American Society of Mechanical Engineers
AWS	American Welding Society
FRX	Fluorescência de raio-X
in	Polegada (unidade de medida)
HC	Hexagonal compacta
CCC	Cúbico de corpo centrado

## LISTA DE SÍMBOLOS

$\alpha$	Fase alfa
$\beta$	Fase Beta
$\sigma_{rup}$	Tensão de ruptura

## Sumário

<b>1. INTRODUÇÃO</b> .....	<b>14</b>
1.1 OBJETIVO .....	15
1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....	15
<b>2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....	<b>16</b>
2.1 Indústria química e sua importância para o crescimento do Brasil .....	16
2.2 Trocadores de calor .....	17
2.2.1 Classificação dos trocadores de calor.....	17
2.2.2 Componentes do trocador de calor tipo casco e tubo.....	21
2.2.3 União tubo-espelho em trocadores de calor casco e tubo.....	22
2.3 Soldagem TIG .....	25
2.3.1 Soldagem TIG orbital autógena.....	27
2.4 Fluidos corrosivos .....	29
2.5 Titânio .....	30
2.5.1 Metalurgia do titânio e suas ligas .....	31
2.5.2 Soldagem do titânio .....	34
<b>3. MATERIAIS E MÉTODOS</b> .....	<b>38</b>
3.1 Materiais .....	39
3.2 Preparação da amostra para soldagem .....	40
3.3 Soldagem TIG orbital autógena .....	41
3.4 Soldagem TIG .....	43
3.5 Compilação dos dados da soldagem do corpo de prova .....	44
3.6 Avaliação da soldagem por meio de ensaios não destrutivos (END).....	44
3.7 Ensaio de dureza .....	45
3.8 Fluorescência de raio-X (FXR).....	46
<b>4. RESULTADOS E DISCUSSÕES</b> .....	<b>47</b>
4.1 Avaliação das soldaduras por ensaio não destrutivos (END).....	47
4.2 Ensaio de dureza Vickers .....	48
4.3 Caracterização por estereoscopia.....	49
4.4 Fluorescência de raio-X (FXR).....	50
<b>5. CONCLUSÕES</b> .....	<b>53</b>
<b>6. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS</b> .....	<b>55</b>
<b>REFERÊNCIAS</b> .....	<b>56</b>

<b>ANEXO A – CERTIFICADO DE MATÉRIA PRIMA DO CHAPA DE TITÂNIO SB-265 GR.7.....</b>	<b>59</b>
<b>ANEXO B – CERTIFICADO DE MATÉRIA PRIMA DO TUBO DE TITÂNIO SB-338 GR.2.....</b>	<b>60</b>
<b>ANEXO C – CERTIFICADO DE MATÉRIA PRIMA DA VARETA DE SOLDAGEM ER-TI-02.....</b>	<b>61</b>
<b>ANEXO D – DECLARAÇÃO DE APOIO TÉCNICO-CIENTÍFICO DA AGUILAR Y SALAS BRASIL.....</b>	<b>62</b>

## 1. INTRODUÇÃO

A manipulação de produtos químicos é normal em qualquer indústria dos países desenvolvidos ou em desenvolvimento. A industrialização do setor químico no Brasil é reconhecida no início do século XIX, com o surgimento de produções em grande escala de bálsamos, colas, sabões e perfumes (ABEQ, 2014).

Segundo a ABIQUIM (2010), a indústria química brasileira tem capacidade de fabricar produtos químicos orgânicos e inorgânicos. Os produtos inorgânicos, são todos os produtos de origem mineral e os produtos orgânicos, são aqueles que derivam de combustíveis fósseis, e que representam a parte mais significativa da produção na indústria. Em diversas etapas do processamento destes produtos orgânicos, numa planta química ou petroquímica, faz-se necessário o uso de produtos corrosivos. Algumas precauções precisam ser adotadas, para que o processo não tenha interrupções por deterioração precoce dos equipamentos/tubulações, e muito menos ocorrência de acidentes.

Um dos equipamentos mais utilizados para a transformação de substâncias químicas é o trocador de calor. Trocadores de calor são definidos como equipamentos projetados para transferência de calor entre fluidos líquidos ou gasosos, sem contato direto entre si. Um dos tipos de trocador de calor mais empregado é denominado como casco e tubo, no qual um conjunto de tubos são fixados, em suas extremidades, a duas chapas nos extremos denominadas espelhos. Essa operação de união também pode ser realizada através do processo de soldagem e exigem os maiores critérios de fabricação utilizados na indústria e definidos pelas normas de soldagem da ASME Boiler and Pressure Vessel Code (BPVC) e o AWS D10.6 (Recommended Practices for Gas Tungsten Arc Welding of Titanium Piping And Tubing).

No caso particular dos trocadores de calor com fluxo de substâncias corrosivas, o material indicado para suportar os efeitos da temperatura e a corrosão são as ligas de titânio. As ligas de titânio ocasionam complexidades para a soldagem devido as diversas mudanças microestruturais, geradas pelo aporte térmico, que em geral prejudicam suas propriedades mecânicas, físicas e químicas. Por isto, existe a necessidade de avaliar diversos processos de soldagem que permitam atingir os requerimentos do projeto, com a melhor relação de custo, e propiciar a competitividade do setor metalúrgico nacional, responsável pela construção desse tipo de equipamentos.

## 1.1 OBJETIVO

Avaliar a aplicabilidade do processo TIG orbital autógena e comparar com o processo de soldagem TIG convencional, na união tubo-espelho de titânio, para trocadores de calor, tipo casco e tubo.

## 1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Determinar as condições e os parâmetros adequados para realização da soldagem pelo processo TIG convencional, da união tubo-espelho, empregando metal de adição.
- Determinar as condições e os parâmetros adequados para realização da soldagem pelo processo TIG autogeno orbital, da união tubo-espelho.
- Avaliar a integridade das juntas soldadas por meio de ensaios não destrutivos (END) de inspeção visual e líquidos penetrantes.
- Determinar a composição química e a dureza das juntas soldadas.

## 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Este tópico visa introduzir temas e conceitos fundamentais à compreensão do estudo sobre a avaliação da soldagem do titânio pelo processo TIG orbital autógena e TIG convencional, aplicados em união tubo-espelho de trocadores de calor, que trabalham com fluido corrosivo.

### 2.1 Indústria química e sua importância para o crescimento do Brasil

No vasto território do Brasil existem 958 fábricas de produtos químicos, de uso industrial, cadastradas no guia da indústria química brasileira, sendo 12 na região norte, 107 na região nordeste, 668 na região sudeste, 14 na região centro-oeste e 157 na região sul. No ano de 2018, a indústria química brasileira ocupou a oitava posição do ranking mundial, em termos de faturamento líquido, com o valor de US\$ 101,7 bilhões, e ocupou a terceira posição no ranking do PIB industrial com 11,3% (ABIQUIM, 2020).

Para que fosse possível alcançar os resultados informados acima, uma característica forte do setor químico é o investimento na área de inovação, fornecendo tecnologia para várias cadeias produtivas. Em paralelo existe a preocupação ambiental, de reduzir o consumo de produtos naturais, desenvolvendo novos processos industriais para que algumas dessas matérias-primas possam ser produzidas, sem a necessidade de remoção da natureza. Nesses processos, estão incluídas reações químicas que resultam em uma nova substância, separações baseadas na carga iônica dos elementos, destilações, além de transformações por aquecimento ou por métodos diferentes. (ABEQ, 2014; Fairbanks, 2017).

Nos processos de transformações químicas por aquecimento são utilizados os trocadores de calor, que possuem o princípio de funcionamento relativamente simples, onde dois fluidos trocam calor entre si, através da condução térmica. Há possibilidade de adaptação do projeto de fabricação do trocador de calor, baseando-se em todas as variáveis de cada processo ou produto específico. Algumas das variáveis que podem e devem ser dimensionadas, para atender cada processo distinto, são o material de fabricação do casco e dos tubos de troca térmica (relacionados com as características dos fluidos), a espessura do casco (relacionado à pressão interna de trabalho), o diâmetro interno do casco e diâmetro externo dos tubos (onde será definida a área de troca térmica), a quantidade/tipos de chicanas e comprimento/ formato dos tubos de troca térmica (Araújo, 2002; Incropera e Dewitt, 2008).

## 2.2 Trocadores de calor

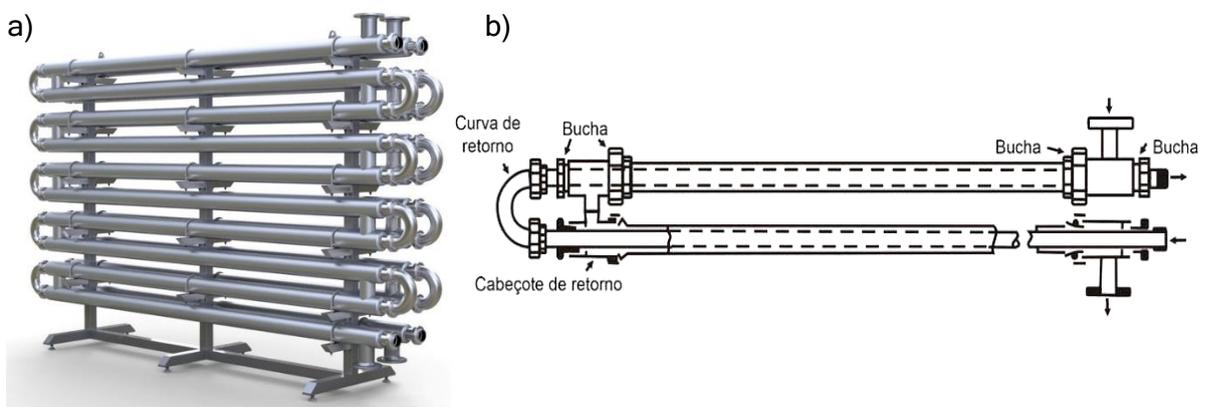
### 2.2.1 Classificação dos trocadores de calor

A necessidade de aquecer ou resfriar um fluido, seja este líquido ou gasoso, faz parte da realidade de muitos processos industriais. Para atender essa demanda, utilizam-se equipamentos denominados trocadores de calor, que tem como princípio a promoção da troca de calor entre dois fluidos, em diferentes temperaturas, através do processo de condução. Na maioria dos casos, estes dois fluidos estão separados por uma parede metálica (Incropera e Dewitt, 2008).

Existem diferentes tipos de trocadores de calor. Desta forma, torna essencial o conhecimento básico de funcionamento, que permita selecionar o tipo de equipamento que se ajusta melhor as necessidades, buscando sempre as melhores taxas de rendimento térmico. Os trocadores de calor podem ser classificados em função do tipo de construção, serviço que realizam, fluidos que utilizam e da configuração do escoamento do fluido (Araújo, 2002). A classificação mais utilizada é o tipo de construção, podendo ser do tipo casco e tubo, duplo tubo ou de placas.

Trocador de calor duplo tubo: Equipamento composto de dois tubos retos, de diferentes diâmetros, com conexões e curvas em suas extremidades para direcionar os fluidos de uma seção reta para outra. Nesta configuração de trocador de calor, um fluido escoa pelo interior do tubo de menor diâmetro e o outro fluido, escoa entre o lado interno do tubo de maior diâmetro e o lado externo do tubo de menor diâmetro, conforme Figura 1 (Araújo, 2002; Incropera e Dewitt, 2008).

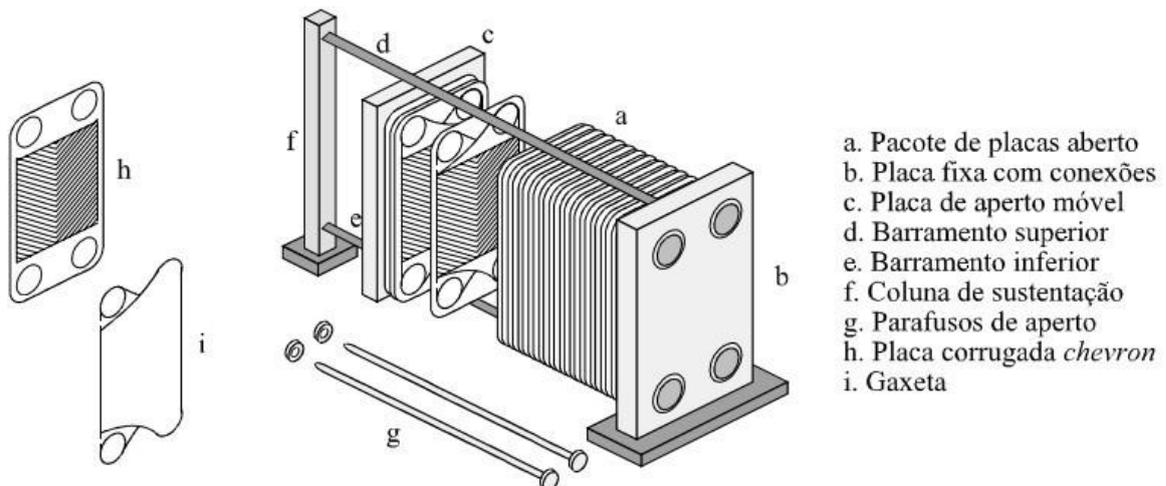
Figura 1 - a) Trocador de calor duplo tubo e b) partes do trocador de calor.



Fonte: <https://grabcad.com/library/double-pipe-heat-exchanger-1>, Araújo (2002).

Trocador de calor de placas: É definido pelo Gut, (2003, p. 6) como um pacote de finas placas metálicas corrugadas, comprimidas por parafusos em um pedestal, e entre cada par de placas são instaladas gaxetas, que formam os canais de escoamento, por onde ocorre a circulação alternada dos fluidos quente e frio, trocando calor através da placa metálica. Um esquema deste sistema é apresentado na Figura 2.

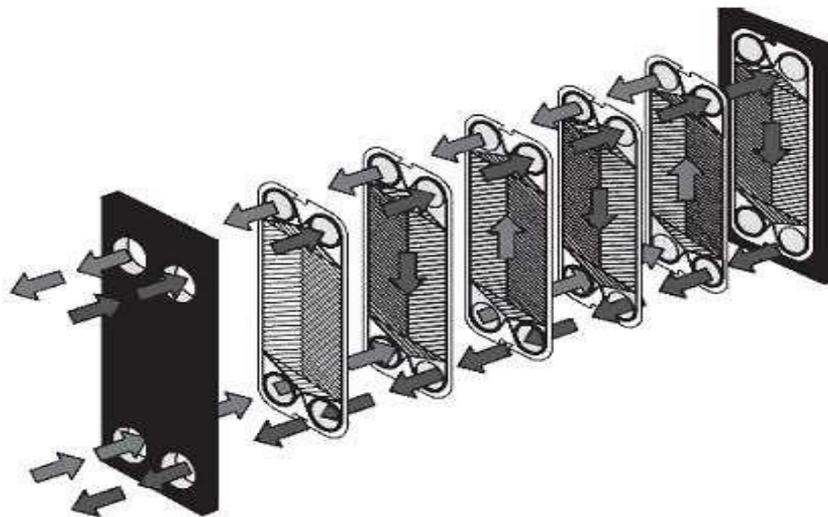
Figura 2 - Partes principais de um trocador de calor de placas.



Fonte: Gut (2003).

A vista explodida do trocador de calor tipo placas, com esquema ilustrativo do deslocamento dos fluidos entre as placas corrugadas, no interior do trocador de calor, para fácil entendimento de como é realizada a troca térmica entre os fluidos, é representado na Figura 3 (Araújo, 2002).

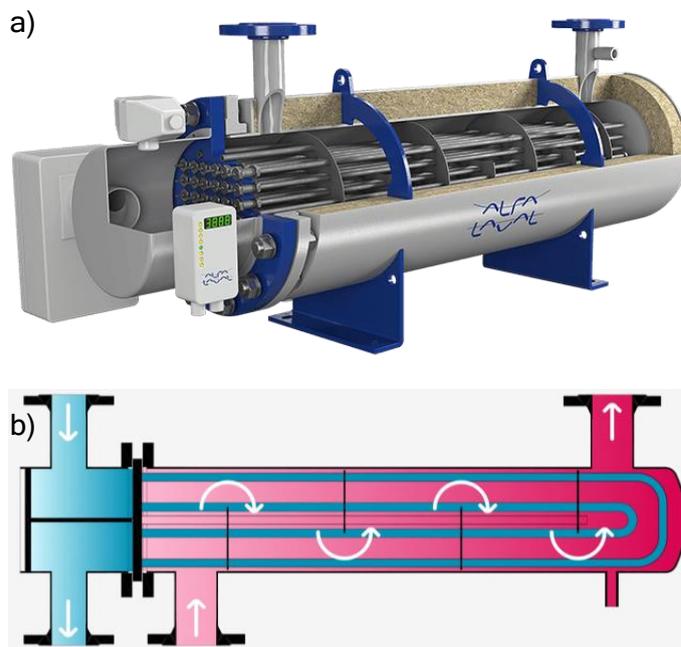
Figura 3 - Esquema de escoamento dos fluidos num trocador de calor de placas.



Fonte: Araújo (2002).

Trocador de calor tipo casco e tubo: O trocador de calor casco e tubo é composto basicamente de um corpo cilíndrico (casco), que possui em seu interior um conjunto de tubos, fixados em suas extremidades aos espelhos, denominado feixe tubular. Um fluido escoam pelo interior dos tubos do feixe tubular, trocando calor por condução, com o outro fluido que escoam entre o lado externo dos tubos do feixe tubular e o lado interno do casco, conforme Figura 4. Este tipo de trocador de calor corresponde atualmente a mais da metade da quantidade de equipamentos utilizados nas instalações industriais. (Górka *et al.*, 2020).

Figura 4 - a) Trocador de calor tipo casco e tubo e b) funcionamento.



Fonte: <https://www.alfalaval.com/products/heat-transfer/tubular-heat-exchangers/shell-and-tube-heat-exchanger/>, <https://igefa-weinbrenner.com/shell-and-tube-heat-exchanger.html> (2023).

Trocadores de calor, do tipo casco e tubo, podem ser construídos com duas configurações de escoamento dos fluidos, podendo ser escoamento paralelo ou contracorrente, sendo este último o de melhor desempenho. No escoamento paralelo os fluidos, quente e frio, escoam no mesmo sentido. Já no escoamento contracorrente, os fluidos, quente e frio, escoam em sentido opostos (Incropera e Dewitt, 2008).

Em ambos os tipos de escoamento citados, o tempo de escoamento do fluido do lado casco, que normalmente é o fluido quente em forma de vapor, tem relação direta com a quantidade de chicanas instaladas, pois mudando sua quantidade, pode-se aumentar ou diminuir o coeficiente de convectivo do trocador, alterando seu

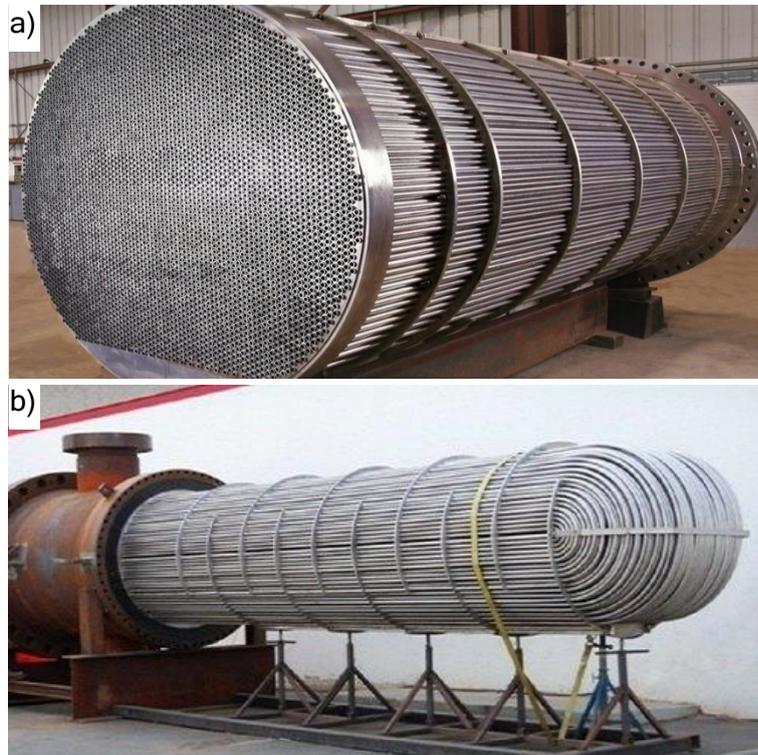
rendimento. Já o escoamento do fluido do lado tubos tem sua trajetória definida segundo a configuração dos carretéis, podendo o fluido circular somente uma vez pelos tubos (único passe), ou podendo circular mais de uma vez (múltiplos passes) (Incropera e Dewitt, 2008; Levenspiel, 2014).

Araújo, (2002, p. 16) destacou as seguintes características dos trocadores de calor tipo casco e tubo:

- Podem ser projetados para qualquer aplicação.
- São utilizados para amplas faixas de vazão, temperatura e pressão.
- São aplicados a processos com grandes áreas de troca de calor (acima de 5000 m<sup>2</sup>), pressões superiores a 30 bar e temperaturas maiores que 260 °C.
- Pode ser construído com diferentes materiais, possibilitando a operação com fluidos corrosivos.

Um dos principais componentes deste tipo de trocador de calor, é o feixe tubular ou feixe de tubos. Trata-se de um conjunto de tubos, sustentado por um esqueleto metálico e fixados nas extremidades por dois espelhos, com tubos retos, conforme Figura 5a ou fixado somente por um espelho, quando os tubos possuem o formato de U, conforme Figura 5b.

Figura 5 - a) Trocador de calor com tubos retos e b) com tubos em U.



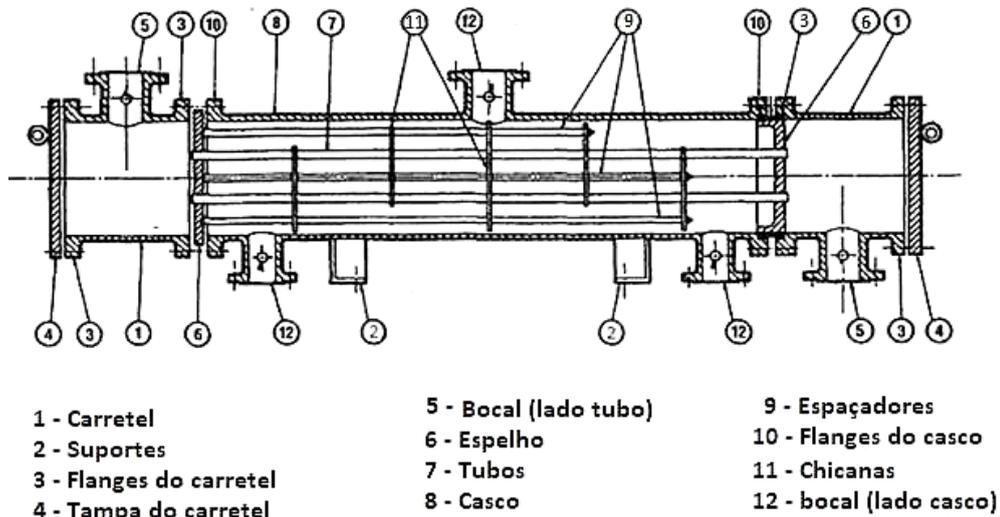
Fonte: <https://www.vikrantheatexchangers.com/tube-bundles.php> (2023).

Dentre as configurações existentes para trocadores de calor, os do tipo casco e tubo são os mais utilizados nas indústrias em seus diversos processos, pois apresentam fácil operação, alta confiabilidade e grande robustez (Mortean, 2017). Por este motivo, a partir deste ponto, focaremos somente no detalhamento do trocador de calor tipo casco e tubo.

### 2.2.2 Componentes do trocador de calor tipo casco e tubo.

Como este trabalho se desenvolverá a partir da análise da soldagem dos componentes mais importantes deste tipo de trocador, a partir da Figura 6 se detalham os principais componentes assim como as suas respectivas características técnicas.

Figura 6 - Principais componentes de um trocador de calor tipo casco e tubo.



Fonte: Adaptado de TEMA (2007).

1. Carretel: local onde circula o fluido do lado tubo, antes e depois de sua passagem pelo interior dos tubos do feixe.
2. Suportes: estrutura de sustentação externa e de fixação em sua base definitiva.
3. Flange do carretel: componente responsável pela ligação entre o carretel e o casco.
4. Tampa do carretel: elemento de fechamento do carretel, também utilizado para inspeção no espelho, sem a necessidade de remoção total do carretel.
5. Bocal (lado tubo): segundo Araújo (2002), são seções de tubos soldadas aos carretéis, com flanges para conexão da tubulação, por onde entra e sai o fluido do lado do tubo.
6. Espelho: são placas perfuradas (onde cada furo corresponde a um tubo do feixe), presas nas extremidades dos tubos, vedando-os através da união tubo-espelho, para que os fluidos do lado casco e lado tubo não se misturem. (Araújo, 2002).

7. Tubos: componente por onde escoo o fluido do lado tubo, gerando a troca de calor. Um conjunto de tubos sustentado por chicanas e unidos, em suas extremidades aos espelhos, formam o feixe tubular.
8. Casco: corpo cilíndrico, onde em seu interior circula o fluido do lado casco e onde ocorre a troca de calor.
9. Espaçadores: elementos responsáveis pela manutenção do distanciamento fixo entre as chicanas.(Araújo, 2002).
10. Flange do casco: responsável pela ligação entre o casco e o carretel.
11. Chicanas: servem como estrutura de sustentação para os tubos do feixe, contra flexão e vibração, além de servir para direcionar o fluido do lado casco, possibilitando uma melhor troca de calor. (Araújo, 2002; TEMA, 2007).
12. Bocal (lado casco): Segundo Araújo (2002), são seções de tubos soldadas ao casco, com flanges para conexão da tubulação, por onde entra e sai o fluido do lado casco.

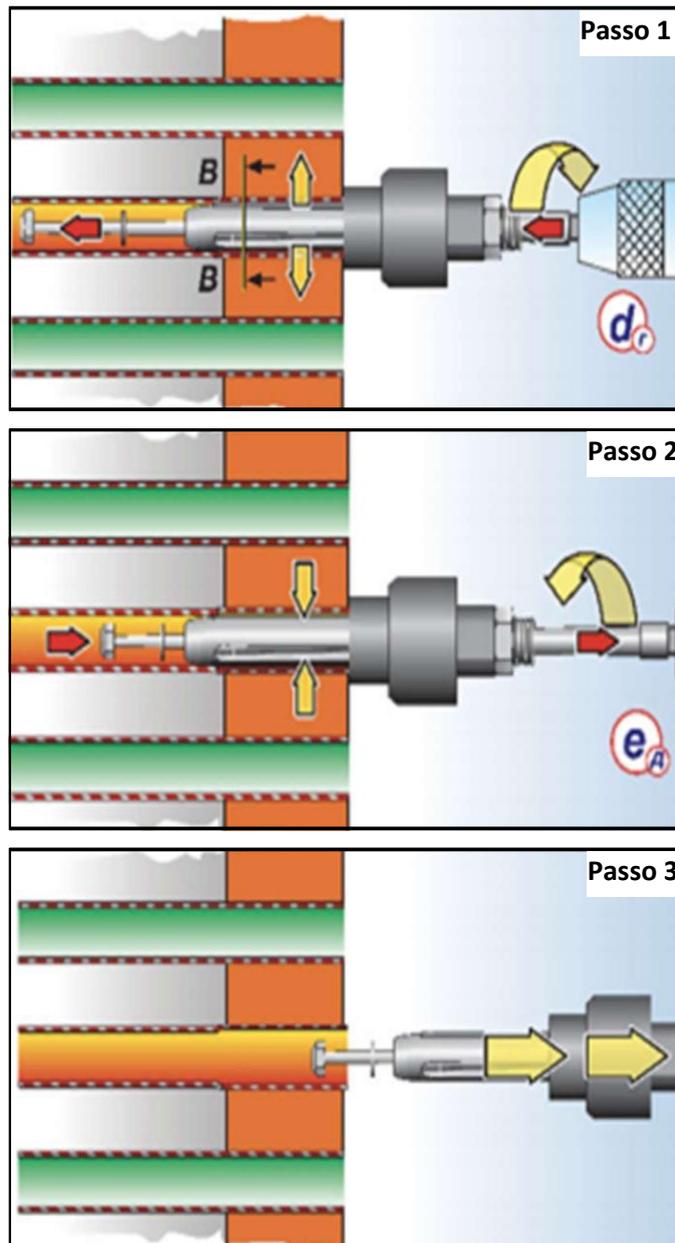
### 2.2.3 União tubo-espelho em trocadores de calor casco e tubo.

As uniões do espelho com os tubos podem ser expandidas ou soldadas. No primeiro caso, a norma ISO 16812, 2007 especifica que “A união tubo-espelho deverá ser somente expandida, a menos que especificado ou aprovado de outra forma pelo comprador”. A expansão ocorre quando um mandril é inserido em um dos tubos do feixe, e após seu acionamento, gira em sentido horário, fazendo com que sua haste central cônica avance no sentido axial ao tubo, pressionando gradativamente os seus rolos contra a parede interna do tubo, provocando o esmagamento da parede externa do tubo contra a superfície interna do furo do espelho, vedando-o definitivamente, como mostrado no passo 1 da Figura 7.

Na sequência o mandril é novamente acionado, agora no sentido anti-horário, fazendo com que a haste cônica seja retraída, deixando de pressionar os rolos, até permanecer totalmente livre para que seja removido, conforme mostrado no passo 2 da Figura 7.

Essa expansão deverá ser aplicada em todos os tubos do feixe tubular. Por último, ao ser retirado o mandril, verifica-se que houve uma deformação plástica no tubo conforme passo 3 da Figura 7, deformação esta que pode ser medida com uso de um micrômetro interno tubular.

Figura 7 - Esquema de união tubo-espelho expandida.

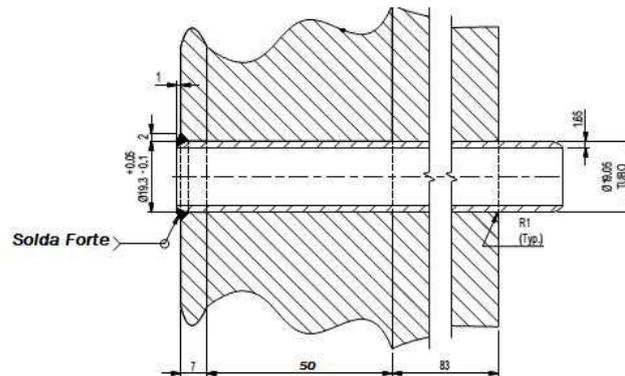


Fonte: Adaptado do catálogo mandris para expandir tubos - Maus, acessado em 20/07/2020, pelo site: [http://www.mausitalia.it/catalogs/67\\_te-l2-webpdf\\_POR.pdf](http://www.mausitalia.it/catalogs/67_te-l2-webpdf_POR.pdf).

Se as uniões são especificadas como soldadas, deverão seguir um dos seguintes métodos:

- a) Soldagem forte: é uma solda dimensionada de modo que a resistência do projeto seja igual ou maior que a resistência axial do tubo, especificado pelo código de projeto de pressão. Esse processo de soldagem é obrigatório para trocadores de calor com pressão de operação acima de 7.000 kPa ou 1.000 psi, conforme esquema apresentado na Figura 8 (ISO 16812, 2007).

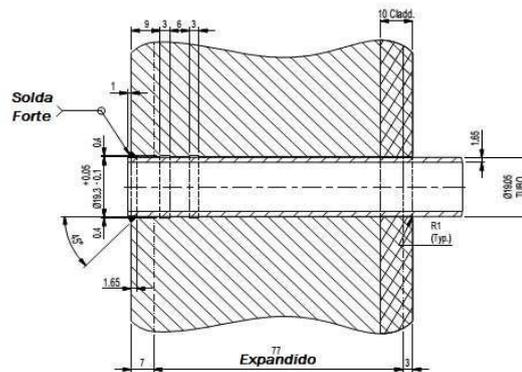
Figura 8 - Esquema de soldagem forte.



Fonte: Aguilar y Salas Brasil, divulgação autorizada pelo anexo IV (2020).

- b) Soldagem forte e expandida: além do processo de soldagem forte, os tubos também podem ser expandidos, conforme Figura 9 (ISO 16812, 2007).

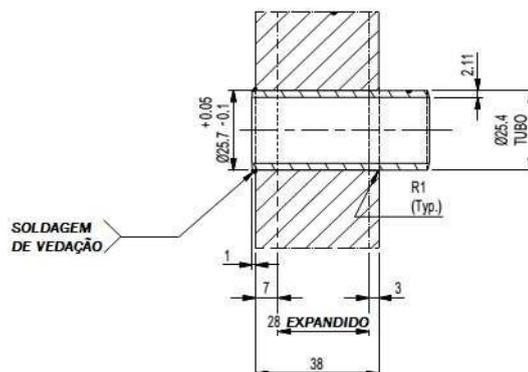
Figura 9 - Esquema de soldagem forte e expandida.



Fonte: Aguilar y Salas Brasil, divulgação autorizada pelo anexo IV (2020).

- c) Soldagem de vedação: é uma solda de resistência não especificada, aplicada na união tubo-espelho expandida com o único propósito de reduzir o potencial de vazamento, conforme a Figura 10 (ISO 16812, 2007). Esse será o tipo de soldagem selecionada para desenvolvimento deste trabalho.

Figura 10 - Esquema de soldagem de vedação.



Fonte: Aguilar y Salas Brasil, divulgação autorizada pelo anexo IV (2020).

Já a seção UW-20 do código ASME VIII (2019, p. 143), que trata exclusivamente da soldagem da união tubo-espelho, divide a soldagem forte em duas categorias:

- a) Solda de força total: que corresponde a uma solda dimensionada para suportar um esforço igual ou superior ao esforço axial sofrido pelo tubo, além de fornecer a estanqueidade da união tubo-espelho.
- b) Solda de força parcial: é uma solda dimensionada baseando-se nos esforços mecânicos, que agem em todas as direções do tubo, e também nas cargas térmicas atuantes, além de fornecer a estanqueidade da união tubo-espelho.

A Figura 11 apresenta um exemplo da soldagem dos tubos de um trocador de calor tipo casco e tubo, com tubos retos.

Figura 11 - Exemplo de uma união tubo-espelho, com alguns tubos sem soldar.



Fonte: Aguilar y Salas Brasil, divulgação autorizada pelo anexo IV (2020).

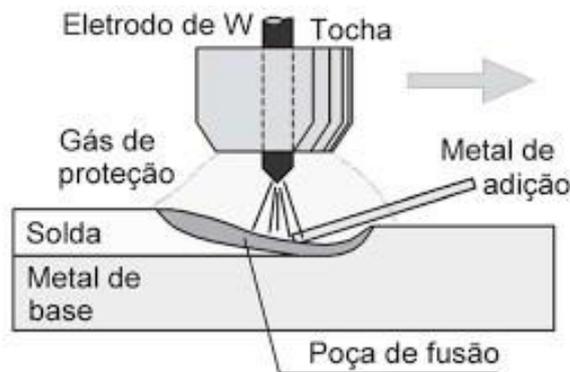
### 2.3 Soldagem TIG

A sigla TIG (Tungsten Inert Gas) é utilizada para descrever o processo de soldagem onde o arco elétrico é criado entre um eletrodo de tungstênio, não consumível, e o metal de base, protegidos por uma atmosfera de gás inerte. Este arco elétrico é responsável pelo aquecimento e fusão do metal de base e do metal de adição (vareta), formando a poça de fusão que durante sua solidificação gera a união dos metais. Em algumas aplicações, por exemplo na soldagem de chapas com pequenas espessuras (da ordem de 1 a 2 mm), não se utiliza metal de adição. Para esses casos a soldagem é designada como soldagem autógena (Modenesi, Marques e Santos, 2012).

Processo de soldagem TIG foi patenteado na década de 20, mas somente veio ser utilizado, em grande escala, na década de 40 pela indústria aeronáutica, aplicada nos assentos dos aviões que tinham sua estrutura metálica fabricadas em liga de

magnésio. É um processo disponibilizado também de forma automática e muito utilizado na soldagem dos aços inoxidáveis, ligas de alumínio, ligas de magnésio, ligas de titânio, principalmente pela excelente qualidade e boa aparência do cordão de solda, sendo considerado o processo de soldagem a arco, onde é possível obter o melhor controle das variáveis. A Figura 12 ilustra, de forma esquemática, a execução do processo TIG (Waimer, Brandi e Mello, 1992).

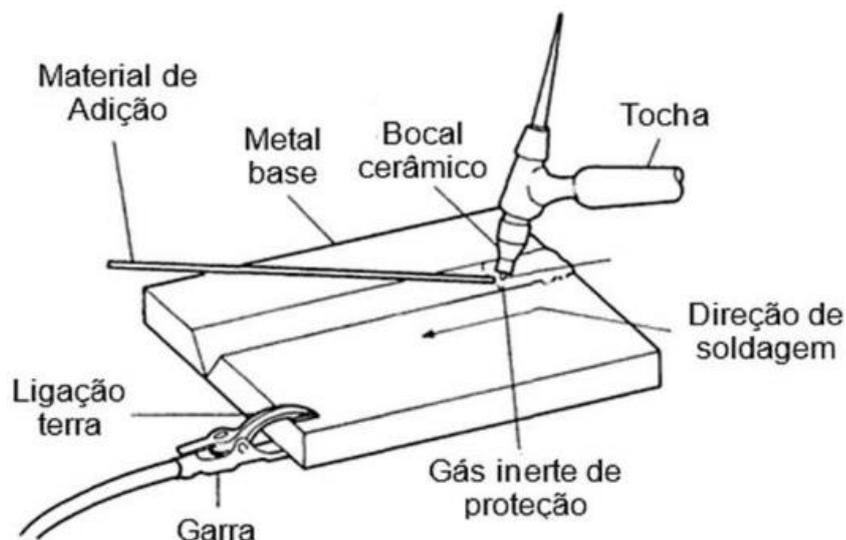
Figura 12 - Esquemático do processo TIG.



Fonte: Modenesi *et al.* (2009).

No processo de soldagem TIG, ilustrado esquematicamente na Figura 13, o material de adição (também chamado de metal de adição ou vareta) é inserido manualmente na poça de fusão, de forma descontínua, de acordo com a habilidade do soldador e necessidade de preenchimento da junta (Martins, 2018).

Figura 13 - Configuração típica da soldagem TIG.



Fonte: Muncaster (1991).

Os principais consumíveis, no processo de soldagem TIG são material de adição (varetas ou arames) e gases de proteção. Alguns autores também consideram os eletrodos de tungstênio como um elemento consumível, pois estes se desgastam durante a soldagem e precisam ser afiados, provocando redução de comprimento até não ser mais possível utilizá-lo, forçando sua substituição (Muncaster, 1991).

O processo de soldagem TIG tem como principal vantagem o excelente acabamento visual com pouquíssimo ou nenhum respingo, conforme pode ser visto na Figura 14, além de permitir um excelente controle na penetração, sendo frequentemente utilizado em soldagem de passe de raiz. Como desvantagens tem-se a baixa taxa de deposição, provocando uma produtividade inferior comparando com outros processos de soldagem a arco e a necessidade de muita habilidade do soldador. (Marques, Modenesi e Bracarense, 2009)

Figura 14 - Exemplo de uma conexão soldada pelo processo TIG convencional.



Fonte: Aguilar y Salas Brasil, divulgação autorizada pelo anexo IV (2020).

### 2.3.1 Soldagem TIG orbital autógena.

Uma variação do TIG é o processo de soldagem orbital para união tubo-espelho, podendo também ser realizada de forma autógena, em metal de adição (Marques, Modenesi e Bracarense, 2009). Para este tipo de soldagem é necessário um cabeçote especial, composto de um mandril, uma tocha e uma câmara inerte, conforme a Figura 15.

Figura 15 - Exemplo de cabeçote especial de soldagem para união tubo-espelho em trocadores de calor. Cabeçote TX38P - Fabricante: Orbitalun.



Fonte: [https://www.orbitalun.com/en/products/product-details/tx\\_38p.html](https://www.orbitalun.com/en/products/product-details/tx_38p.html) acessado em 22/10/2022.

Essa inovação do processo de soldagem TIG, com aplicação exclusiva para união tubo-espelho, garante eliminar o cansaço do operador na execução de uma atividade repetitiva (soldagem de grande quantidade de tubos), assim como a alta precisão, padronização da qualidade das soldas e fácil utilização, não requerendo a necessidade de um soldador experiente. Produz impactos significativos na redução do consumo de gás e, principalmente, reduz o tempo de soldagem, onde o mesmo operador pode manusear/supervisionar mais de uma máquina ao mesmo tempo (POLYSOUDE, 2020).

O mandril é inserido no tubo a ser soldado e, através de sua expansão mecânica, fornece a fixação correta do cabeçote, garantindo que a tocha percorra todo o perímetro do tubo, realizando a soldagem.

Toda essa operação ocorre num cabeçote de soldagem enclausurado, demonstrado na Figura 16, para que a soldagem ocorra em atmosfera inerte, proporcionando altíssima proteção contra oxidação. Essa atmosfera inerte é gerada através da inserção do gás argônio, na câmara de soldagem do cabeçote de soldagem (POLYSOUDE, 2020).

Figura 16 - Câmera de soldagem, onde é gerado uma atmosfera inerte.



Fonte: [https://www.orbitalum.com/en/products/product-details/tx\\_38p.html](https://www.orbitalum.com/en/products/product-details/tx_38p.html) acessado em 28/11/2021.

A maleabilidade oferecida pelo sistema possibilita a realização de soldagem autógena, onde os metais de bases são fundidos, entre si, sem a necessidade de utilização do metal de adição. Essa característica resulta numa importante vantagem no ponto de vista metalúrgico, principalmente para ligas de difícil soldabilidade, como o titânio. (Marques, Modenesi e Bracarense, 2009)

## 2.4 Fluidos corrosivos

O processo de corrosão, que ocorre em sua grande maioria de forma espontânea e em materiais metálicos, é a reação de transformação dos materiais quando submetidos a ação física, química ou eletroquímica, no meio onde está inserido, provocando sua deterioração de tal modo que suas características, como a durabilidade e resistência mecânica, deixam de satisfazer os fins a que se destinam (Frauches-Santos *et al.*, 2014).

Em alguns casos, somente a aplicação da proteção anticorrosiva mais usual, os revestimentos inibidores de corrosão mais popularmente chamada de pintura, não é eficaz, é preciso projetar equipamentos com materiais resistentes à corrosão levando em consideração sua aplicação, pois depende tanto da natureza do meio, das características dos fluidos e as condições que estes estejam expostos (Vieira, 2013; Justina e Bastos, 2018).

Como a corrosão é uma realidade na indústria e responsável por aproximadamente metade das falhas dos materiais, muito tempo e dinheiro são investidos em pesquisas para desvendar os princípios do processo da corrosão, assim como as soluções em proteções anticorrosivas, tornando-se um desafio no campo da

engenharia de equipamentos. Quando o processo de troca térmica, realizado no interior dos trocadores de calor, ocorre com fluidos corrosivos, espera-se um equipamento com alta durabilidade e excelente resistência à corrosão, e que justifique os valores investidos, a fim de reduzir a probabilidade de acidentes com danos materiais ou danos pessoais irreparáveis (Vieira, 2013; Frauches-Santos *et al.*, 2014).

Os materiais tradicionais na fabricação de trocadores de calor incluem bronzes, ligas de alumínio, latão, aço carbono, ligas de cobre, aços inoxidáveis e ligas de níquel. No entanto, uma variedade de materiais especiais está se tornando cada vez mais popular. A liga 617, uma superliga à base de níquel com adições de cromo, molibdênio e cobalto, que é aprovada para 982 °C e outras ligas aprovadas para 898 °C, são a liga 556, liga 800H, e a liga 330 (Dewson e Li, 2005).

No entanto, o titânio é outro material usado em trocadores de calor, aplicados em áreas nas quais os aços inoxidáveis austeníticos não fornecem suficiente resistência à corrosão. Para trocadores de calor nos quais o meio de resfriamento é água do mar, água salobra ou água poluída, os tubos de titânio comercialmente puro apresentam melhor comportamento frente à corrosão.

## 2.5 Titânio

O titânio é um metal de transição, com densidade de 4,51 g/cm<sup>3</sup> (60% menor que o ferro), ponto de fusão de 1668 °C e excelente resistência a corrosão (Bauer, 2007; Moraes e Seer, 2015). Outras propriedades do titânio estão listadas na Tabela 1.

Tabela 1 - Propriedades do titânio.

Propriedades	Ti
Número Atômico	22
Peso atômico	47,90 u.a.
Temperatura de Fusão	1668 °C
Módulo de Elasticidade	105 GPa
Densidade	4,51 g/cm <sup>3</sup>
Dureza	100 a 300 HV
Resistência a tração	315 a 660 MPa
Ponto de ebulição	3260°C
Tensão de escoamento	215 a 530 MPa

Fonte: ASM Handbook (2004).

O titânio foi descoberto em 1791 por William Gregor, mas o seu nome foi conferido poucos anos depois por Martin Heinrich Klaproth, quando em suas pesquisas encontrou esse elemento no minério de rutilo ( $\text{TiO}_2$ ). Ainda, segundo o referido autor, como o titânio é um metal muito reativo, sua obtenção na forma pura, a partir do minério de rutilo ( $\text{TiO}_2$ ), era extremamente difícil. Foi então que Winhem Kroll desenvolveu seu processo de refino, sendo por isso considerado o pai da indústria do titânio (Bauer, 2007).

Atualmente, com o aumento da utilização de metais nobres na construção de equipamentos, com objetivo de garantir o funcionamento ininterrupto e o aumento de sua vida útil, a indústria enfrenta muitos desafios no campo das tecnologias de soldagem, principalmente em ambientes corrosivos. Assim, as ligas de titânio são cada vez mais utilizadas em componentes internos dos trocadores de calor, devido à sua alta resistência à corrosão, principalmente onde o meio de resfriamento é a água rica em cloretos e sulfetos, combinados com altas temperaturas, o que gera um ambiente extremamente corrosivo (Górka *et al.*, 2020).

Em resumo, o titânio é aproximadamente 45% mais leve que o aço, 60% mais pesado que o alumínio, e três vezes mais resistente do que qualquer um deles. Embora tenha um custo relativamente alto, inicialmente, e requerer um processo de soldagem complexo, devido à importância da proteção gasosa, o uso do titânio garante redução de custos durante o ciclo de vida devido à sua longa vida útil, que gera redução dos custos de manutenção e reparo (Luck e Fulcer, 2007), (TITANIUM INFORMATION GROUP TWI, 1999)

### 2.5.1 Metalurgia do titânio e suas ligas

Devido as suas características, mencionadas na seção anterior, o titânio tem grande aplicabilidade na aviação, na biomedicina, tem uso estrutural e em aplicações criogênicas. Na indústria química, muitos dos componentes dos equipamentos são fabricados em titânio. O titânio é comercializado em seu formato puro, também chamado de comercialmente puro, ou em forma de ligas (Vicente e Ryu, 2022). Uma das características do titânio é a possibilidade de alterar sua estrutura alfa (hexagonal compacta) para a fase beta (cúbica de corpo centrado), dependendo da quantidade e dos elementos de liga adicionados. Cada elemento químico tem sua influência distinta, possibilitando variações de microestruturas, tornando o titânio uma ótima opção para processos mais complexos, comparando com outras ligas não ferrosas. (MELO, 2007).

Titânio comercialmente puro e suas propriedades: Também conhecido por c.p., possui teor de titânio entre 98,635 a 99,5 em peso%. Na temperatura ambiente possui uma estrutura hexagonal compacta (HC) denominada alfa ( $\alpha$ ) e na temperatura de 885 °C transforma-se em estrutura cúbica de corpo centrado (CCC) denominada beta ( $\beta$ ). Os elementos residuais encontrados, conforme Tabela 2, são o carbono, oxigênio, nitrogênio e o ferro. O oxigênio fortalece a solução sólida na fase alfa ( $\alpha$ ) e sua variação, nas propriedades de tração dos graus 1 a 4 do titânio c.p., reflete esse ponto. Nos graus do titânio c.p., os teores de oxigênio e ferro são cuidadosamente controlados durante a formulação da liga, pois esses fatores têm um efeito importante na resistência do produto final (Lütjering e Williams, 2003).

Na Tabela 2, foi apresentado os graus do titânio c.p., onde é predominantemente a fase alfa ( $\alpha$ ) com pequena fração volumétrica da fase beta ( $\beta$ ). O titânio c.p. é normalmente fabricado por laminação, em formato de chapa, e possui a característica de excelente soldabilidade. Avaliando sua resistência à tração e à fadiga, os valores encontrados são inferiores quando comparadas com o aço e às ligas de titânio. Quanto ao módulo de elasticidade, apresentam valores intermediários em comparação com o aço (Lütjering e Williams, 2003; ASM Handbook, 2004; Melo, 2007).

Tabela 2 - Composição nominal das ligas de titânio comercialmente puras.

Grau	C	O	N	Fe	Outros	$\sigma_{rup}$ (MPa)	Alongamento mínimo (%)
Grau 1	0,10	0,18	0,03	0,20	-	240	24
Grau 2	0,10	0,25	0,03	0,30	-	343	20
Grau 3	0,10	0,35	0,05	0,30	-	440	18
Grau 4	0,10	0,40	0,05	0,30	-	550	20
Grau 7	0,10	0,25	0,03	0,30	0,12/0,25Pd	343	20
Grau 11	0,10	0,18	0,03	0,20	0,12/0,25Pd	240	24
Grau 12	0,10	0,25	0,03	0,30	0,2/0,4Mo e 0,6/0,9Ni	480	12

Fonte: Lütjering e Williams (2003); Melo (2007).

Ligas de titânio: As diferenças de suas propriedades mecânicas estão diretamente relacionadas com os elementos de liga adicionados aos tratamentos térmico ou mecânico aplicado durante o processo de fabricação.

Os elementos de liga têm a capacidade de alterar, aumentando ou diminuindo, a temperatura de transformação entre as fases alfa-beta, estabilizando a microestrutura desejada, na temperatura de trabalho, e por isso são chamados de elementos estabilizantes. Os elementos químicos adicionados na liga definem em qual classificação esta se enquadra, podendo ser alfa, alfa-beta e beta (Lütjering e Williams, 2003; Melo, 2007; Vicente e Ryu, 2022).

Ligas alfa: Os elementos químicos estabilizantes da fase alfa são: alumínio, gálio, germânio, carbono, oxigênio e nitrogênio. Sendo o alumínio o principal deles promovendo o aumento da resistência à tração, resistência à fluência e módulo de elasticidade. Porém, o valor do alumínio na liga é limitado aos 7%, pois acima desse percentual provoca fragilidade da liga. Já o carbono, o nitrogênio e o oxigênio são endurecedores poderosos, fragilizando a liga pois reduzem sua ductibilidade e tenacidade (Melo, 2007; Vicente e Ryu, 2022).

Uma das principais características dessas ligas é a possibilidade de alteração do tamanho de grão, de acordo com o elemento estabilizante utilizado, estando diretamente relacionada com resistência ao escoamento e/ou resistência à fluência (Lütjering e Williams, 2003; Melo, 2007).

Ligas beta: Os elementos químicos estabilizantes da fase beta são vanádio, hidrogênio, molibdênio, tântalo, nióbio, silício, manganês, cromo, ferro, cobalto, níquel e cobre. O ferro age na redução da resistência à fluência. O molibdênio tem como característica melhorar a temperabilidade e a resistência mecânica em elevadas temperaturas e o nióbio melhora a resistência a oxidação em elevadas temperaturas (Lütjering e Williams, 2003; Vicente e Ryu, 2022). Segundo Melo (2007) As ligas beta são metaestáveis e a precipitação da fase alfa na fase metaestável beta proporciona o aumento da resistência mecânica da liga. As ligas com fase beta chamam atenção por oferecer tenacidade à fratura superior as ligas alfa-beta, com a vantagem, ainda, de grandes seções serem suscetíveis a tratamento térmico.

Ligas alfa-beta: As ligas mais utilizadas e conhecidas são Ti6Al4V ou ASTM grau 5. Como característica marcante, essas ligas podem ser tratadas termicamente com objetivo de aumentar sua resistência mecânica. O tratamento térmico também define a forma de sua microestrutura, podendo

ser equiaxial, acicular ou alguma combinação das duas (Lütjering e Williams, 2003; Melo, 2007).

### 2.5.2 Soldagem do titânio

Este subcapítulo tem como objetivo fornecer um guia prático de aconselhamento na soldagem de titânio, pelo processo TIG. A informação tem como base certos aspectos técnicos que devem ser considerados durante a soldagem deste metal.

O processo TIG é técnica de união mais aplicada ao titânio, mas que exige condições específicas e adequadas para sua realização. A seleção do eletrodo de tungstênio tem relação direta com a qualidade da solda, com indicação para o eletrodo com tório (EWTh-2) ou lantânio (EWLa-1.5), sendo este último o mais recomendável pois não há elementos radioativos em sua composição química (AWS D10.6, 2000).

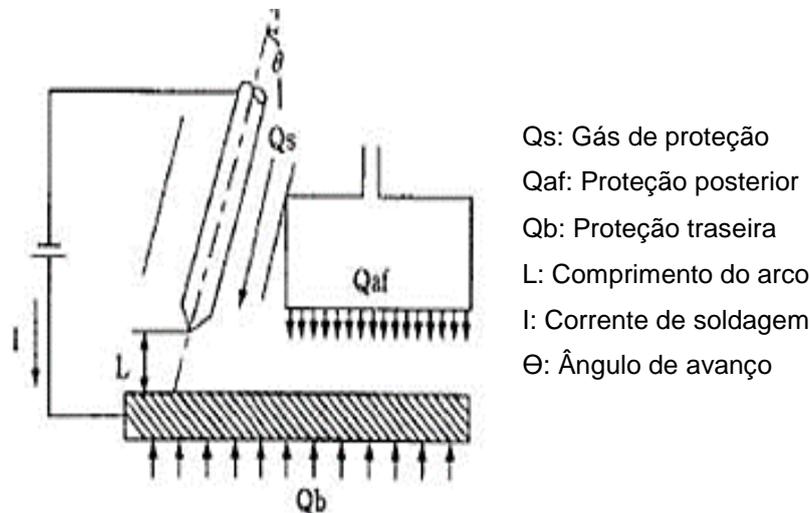
Outro fator extremamente importante para a soldagem do titânio é a correta execução da preparação e limpeza das amostras. Durante a preparação, normalmente realizada em máquinas operatrizes, deve-se evitar o aquecimento excessivo das amostras além do cuidado de remoção das rebarbas, eliminando também os cantos vivos, que podem provocar porosidade na solda. A limpeza, para remoção de óxidos, pode ser mecânica, através de uso de escova de aço inoxidável, ou química, com uso de acetona ou álcool isopropílico, para remoção de vestígios de lubrificantes, assim como, o suor oriundo do manuseio. Após a limpeza das peças devem ser utilizadas luvas limpas para o manuseio das amostras (AWS D10.6, 2000).

Segundo a AWS (2007) seção D1.9, Código de soldagem estrutural - Titânio, as cores azul, violeta, verde, cinza e branco indicam contaminação atmosférica do titânio soldado por arco de tungstênio (TIG). Em certas aplicações, cordões de solda exibindo as cores citadas podem sofrer redução da resistência e perda ductilidade, e devem ser rejeitados (AWS, 2007; Luck e Fulcer, 2007).

O titânio pertence à família de metais chamados de metais reativos, o que significa que eles apresentam elevada afinidade pelo oxigênio. Na temperatura ambiente, o titânio reage com oxigênio para formar o dióxido de titânio, camada impermeável que resiste à interação com a atmosfera envolvente, e dá ao titânio sua famosa resistência à corrosão (Titanium information group. Welding Titanium. TWI, 1999).

Na Figura 17 observa-se o esquema típico para a soldagem TIG do titânio. As principais diferenças em relação ao processo TIG de outros materiais, são os dispositivos de proteção gasoso (purga) posterior e traseiro.

Figura 17 - Diagrama esquemático da soldagem TIG do titânio.

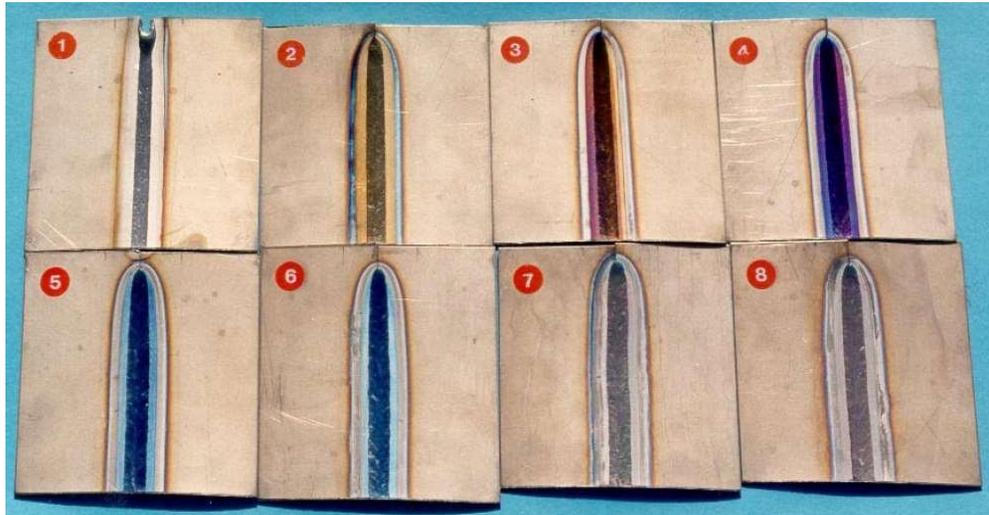


Fonte: Adaptado de Otani (2007).

Como não é fácil garantir uma proteção gasosa total ao longo do cordão de solda, somente com o gás de proteção que sai da tocha, faz-se necessário fornecer uma proteção adicional, posterior a tocha, com o intuito de garantir que o titânio não tenha contato com o oxigênio durante sua solidificação. Também é necessário fornecer outra proteção adicional, para proteger a parte traseira da zona de solda (Otani, 2007).

Quando aquecido, acima de 427 °C, o titânio torna-se altamente reativo e combina-se facilmente com o oxigênio, nitrogênio, hidrogênio e carbono. A camada de óxido deve ser removida, pois a absorção intersticial desses óxidos fragilizará o cordão de solda, reduzindo a sua integridade. Estes óxidos apresentam algumas tonalidades de cores que estão relacionadas com as diferentes espessuras da camada de óxido. As cores para avaliação do titânio podem ser vistas na Figura 18 e Tabela 3 (Titanium information group. Welding Titanium. TWI, 1999; AWS D10.6, 2000; Luck, e Fulcer, 2007).

Figura 18 - Padrões de coloração do titânio, com diferentes níveis de contaminação.



Fonte: Titanium information group. Welding Titanium - TWI (1999).

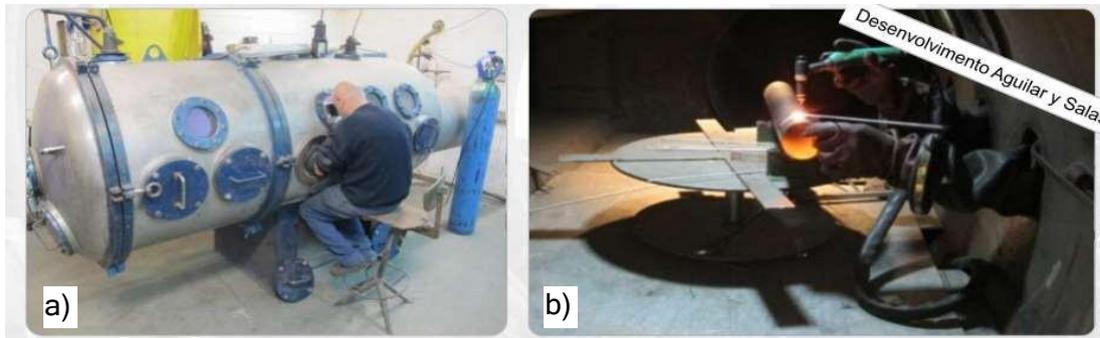
Tabela 3 - Avaliação da soldagem relacionada a sua coloração.

Nr	Cor	Interpretação
1	Prateado	Proteção gasosa correta, satisfatória
2	Palha clara	Leve contaminação mas é aceitável
3	Palha escura	Leve contaminação mas é aceitável
4	Azul escuro	Contaminação pesada mas pode ser aceitável dependendo da aplicação
5	Azul claro	Contaminação pesada, inaceitável
6	Cinza azulado	Contaminação muito pesada, inaceitável
7	Cinza	Contaminação muito pesada, inaceitável
8	Branco	Contaminação muito pesada, inaceitável

Fonte: Titanium information group. Welding Titanium - TWI (1999).

Considerando o conceito citado acima, onde o contato do oxigênio com o titânio, em sua forma líquida, é extremamente prejudicial a soldagem pois provoca sua contaminação, alguns fabricantes de equipamentos em titânio constroem câmaras de vácuo, para aplicações em soldagem de peças de pequeno porte, garantindo que a soldagem seja realizada em uma atmosfera de argônio totalmente controlada, conforme apresentado na Figura 19. O soldador executa a soldagem TIG, pela parte externa da câmara, manuseando a tocha e as peças através de luvas adaptadas, somente após a confirmação que a todo oxigênio foi removido, através de uma bomba de vácuo, e que o gás inerte (argônio) foi inserido gerando uma pressão positiva, maior que a pressão externa (Luck e Fulcer, 2007).

Figura 19 - a) Câmara de vácuo desenvolvida pela Aguilar y Salas para soldagem de pequenas peças de titânio. b) Interior da câmara.



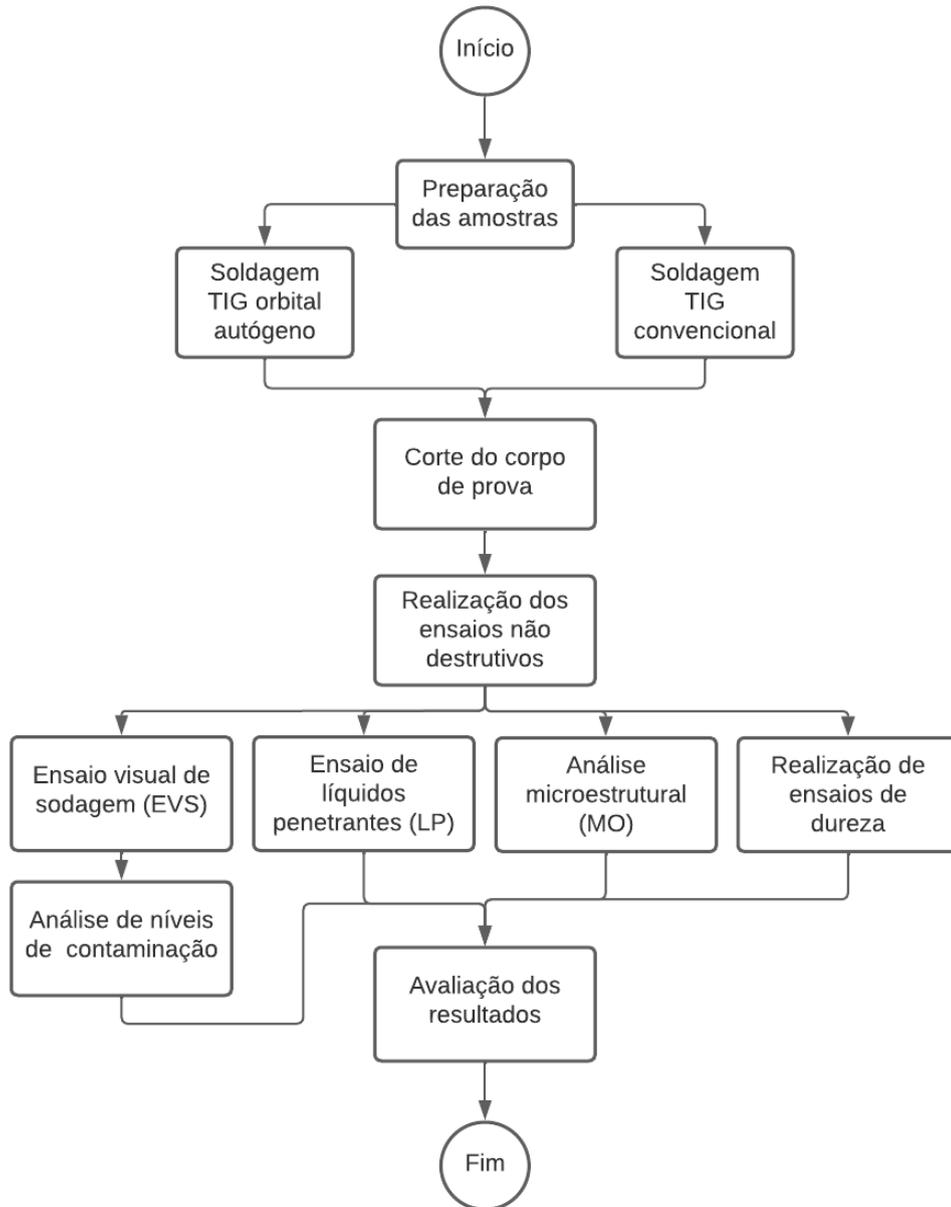
Fonte: Fotos retiradas do site

<http://www.aguilarysalas.com.br/files/AguilarYSalasApresentacaoGrupo2014.pdf>, acessado em 31/05/2022.

### 3. MATERIAIS E MÉTODOS

Nesta seção serão abordados os procedimentos experimentais, com base em todas as informações detalhadas na revisão bibliográfica, durante a execução da soldagem do corpo de prova nas duas condições de estudo, para posterior análise comparativa. Foram seguidas as etapas de acordo com o fluxograma da Figura 20.

Figura 20 - Fluxograma da metodologia experimental resumida utilizada ao longo do trabalho.



Fonte: Elaborado pelo autor (2023)

### 3.1 Materiais

Os materiais utilizados neste trabalho, para a confecção do corpo de prova e execução da soldagem, foram: chapa de titânio SB-265 Gr.7, tubo de titânio SB-338 Gr.2 e vareta de titânio ER-Ti-02, além do gás argônio, com pureza de 100%, responsável pela atmosfera inerte durante o processo de fusão dos materiais.

A composição química, assim como as propriedades mecânicas da chapa de titânio SB-265 Gr.7, com dimensões de 400 mm de comprimento, 300 mm de largura e 11 mm de espessura, utilizada na fabricação do corpo de prova, pode ser encontrada na Tabela 4 e Tabela 5, a seguir, e no Anexo I, denominado de Certificado de matéria prima do fornecedor Thyssenkrupp Titanium S.p.A.

Tabela 4 - Composição química da Chapa de Titânio SB-265 Gr.7.

<b>Composição Química (%) – SB-265 Gr.7</b>				
C	Pd	Fe	N	H
0,012	0,150	0,07	0,005	0,0011

Fonte: Certificado de material do fabricante, conforme anexo I (2021).

Tabela 5 - Propriedades mecânicas da Chapa de Titânio SB-265 Gr.7.

<b>Propriedades Mecânicas</b>		
Limite de escoamento (MPa)	Resistência à tração (MPa)	Alongamento (%)
385	492	2

Fonte: Certificado de material do fabricante, conforme anexo I (2021).

A composição química, assim como as propriedades mecânicas do tubo de titânio SB-338 Gr.2, de diâmetro de 25,4 mm, espessura de 1,24 mm e comprimento de 100 mm, utilizado na fabricação do corpo de prova, pode ser encontrada na Tabela 6 e Tabela 7, a seguir, e no Anexo II, denominado de Certificado de matéria prima do fornecedor CSM TECH CO.,LTD.

Tabela 6 - Composição química e propriedades mecânicas do tubo de titânio SB-338 Gr.2.

<b>Composição Química (%) – SB-338 Gr.2</b>				
C	O	Fe	N	H
0,012	0,0511	0,070	0,009	0,0014

Fonte: Certificado de material do fabricante, conforme anexo II (2021).

Tabela 7 - Propriedades mecânicas do tubo de titânio SB-338 Gr.2.

<b>Propriedades Mecânicas</b>		
<b>Limite de escoamento (MPa)</b>	<b>Resistência à tração (MPa)</b>	<b>Alongamento (%)</b>
392	492	40

Fonte: Certificado de material do fabricante, conforme anexo II (2021).

A composição química da vareta de solda ER-Ti-02, de diâmetro de 0,8 mm, utilizado na soldagem do corpo de prova, através do processo TIG convencional, pode ser encontrada na Tabela 8, a seguir, e no Anexo III, denominado de Certificado de matéria prima do fornecedor Torresintitânio.

Tabela 8 - Composição química da vareta de solda ER-Ti-02.

<b>Composição Química (%) – ER-Ti-02</b>				
C	Pd	Fe	N	H
0,01	0,09	0,05	0,01	0,004

Fonte: Certificado de material do fabricante, conforme anexo III (2021).

### 3.2 Preparação da amostra para soldagem

A chapa de titânio SB-265 Gr.7 foi usinada num equipamento CNC SORALUCE, modelo SL 5000, com a finalidade de fabricar os furos de diâmetro 25,7 mm (sem bisel), com tolerância de 25,75 mm (+0,05 mm) e 25,6 mm (-0,1 mm), onde foram instalados os tubos de titânio, para receber a soldagem de vedação, simulando um espelho de trocador de calor, tipo casco e tubo, conforme ilustrado na Figura 21 e a Figura 22a.

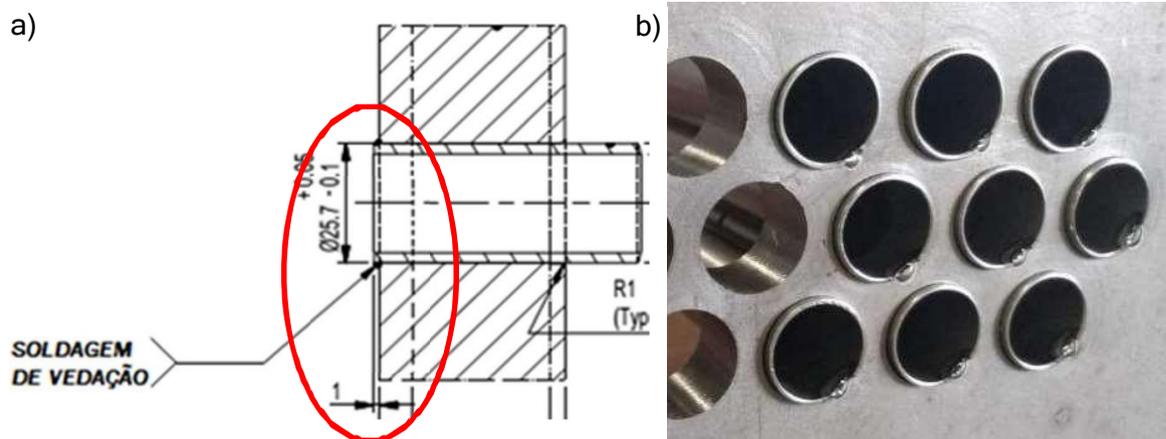
Figura 21 - Chapa de titânio usinada.



Fonte: Elaborado pelo autor (2021).

Os 18 tubos de titânio SB-338 Gr.2 foram montados na chapa de titânio SB-265 Gr.7, de tal forma que a face do tubo ficasse a uma distância de 1 mm, em relação a face da chapa, conforme ilustrado na Figura 22(a-b).

Figura 22 - Montagem do tubo na chapa de titânio. (a) Desenho e (b) montagem.



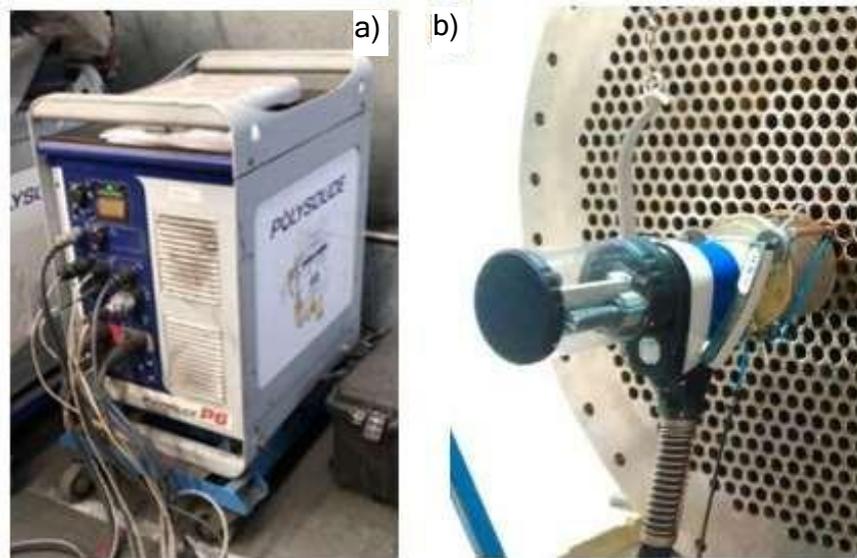
Fonte: Aguilar y Salas Brasil, divulgação autorizada (anexo IV, 2020). Elaborado pelo autor (2021).

A chapa, os tubos, o eletrodo de tungstênio e as varetas de solda foram limpos, com o uso de acetona e pano sem fiapos, para remoção de vestígios do fluido de corte, utilizado no processo de corte e usinagem, assim como a remoção dos óxidos, proveniente do manuseio de forma incorreta. Após a limpeza, as peças foram fixadas em dispositivos de aço inoxidável e manuseados com luvas limpas.

### 3.3 Soldagem TIG orbital autógena

Para aplicação do procedimento de soldagem TIG orbital autógena, utilizou-se uma fonte de potência POLYSOULD P6, conforme ilustrado na Figura 23(a) com uma vazão média entre 10 L/min de gás de proteção 100% argônio e eletrodo de tungstênio EWTh-2. Também se utilizou o cabeçote TS 8/75, com câmara de gás inerte, do mesmo fabricante da fonte, conforme ilustrado na Figura 23(b).

Figura 23 - (a) Fonte de soldagem Polysoud - P6 e (b) cabeçote TS 8/75 com câmara inerte.



Fonte: Aguilari y Salas Brasil, divulgação autorizada (anexo IV, 2020).

Como resultado da aplicação do processo de soldagem TIG orbital autógena, conforme a Figura 24, é possível identificar uma uniformidade e padronização dos cordões de solda, devido ao processo robotizado e sem interferência humana, com exceção do segundo furo da primeira linha, que ficou como solda incompleta e não será avaliado neste trabalho.

Figura 24 - Tubos soldados com o processo TIG orbital autógena.

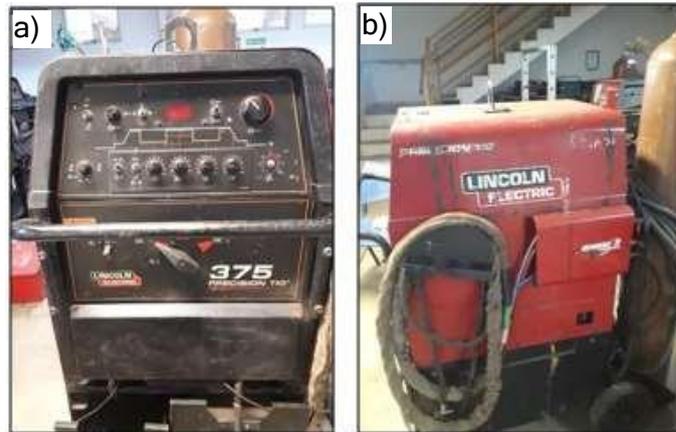


Fonte: Elaborado pelo autor (2020).

### 3.4 Soldagem TIG

Para a soldagem TIG convencional, utilizou-se uma fonte de potência 375 PRECISION TIG, do fabricante LINCOLN ELECTRIC, com o alimentador de arame conjugado, conforme ilustrado na Figura 25, com uma vazão média de 15 L/min de gás de proteção 100% argônio e eletrodo de tungstênio EWTh-2.

Figura 25 - Fonte de soldagem: 375 PRECISION TIG.



Fonte: Aguilary Salas Brasil, divulgação autorizada (anexo IV, 2020).

Como resultado da aplicação do processo de soldagem TIG, conforme a Figura 26, é possível identificar a inexistência de uniformidade e a despadronização dos cordões de solda, devido ao processo ser totalmente manual. Onde, com uma das mãos, o soldador movimenta a tocha e com a outra mão ele realiza a alimentação, ou aproximação da vareta, na poça de fusão.

Figura 26 - Tubos soldados com o processo TIG convencional.



Fonte: Elaborado pelo autor (2020).

### 3.5 Compilação dos dados da soldagem do corpo de prova

Durante a soldagem dos 18 tubos, 9 tubos em cada um dos processos estudados, várias informações foram coletadas, conforme demonstrado na Tabela 9. De posse desses dados, é possível aprimorar a comparação dos dois processos de soldagem, buscando relações entre os dados de entrada (*inputs*) e dados de saída (*outputs*) com as análises metalúrgicas e END, que foram realizados. Ambos os processos de soldagem apresentam características visuais distintas, que facilmente as identificam, não gerando dúvidas de qual processo de soldagem foi usado.

Tabela 9 - Dados colhidos durante a soldagem do corpo de prova.

LINHA	TUBO	PROCESSO / ELETRODO DE TUNGSTÊNIO USADO	TIPO	CORRENTE(A)	TENSÃO(V)	VEL. DE AVANÇO (cm/min)	TEMP. (°C)	APORTE TÉRMICO (J/mm)	GÁS
1	1	GTAW EWTh-2	AUTOMÁTICO	86	8,5	8,4	44	313,3	Ar 100%
	2		AUTOMÁTICO	88	8,6	8,4	40	324,3	
	3		AUTOMÁTICO	86	8,3	8,4	38	305,9	
	4		MANUAL	71	9,3	6,1	36	383,4	
	5		MANUAL	73	9,6	7,2	38	350,4	
	6		MANUAL	74	10	8,2	40	324,9	
2	1		AUTOMÁTICO	87	8,5	8,4	30	316,9	
	2		AUTOMÁTICO	89	8,6	8,4	40	328,0	
	3		AUTOMÁTICO	85	8,3	8,4	44	302,4	
	4		MANUAL	72	9,1	8,2	36	287,6	
	5		MANUAL	71	9,5	9,2	40	263,9	
	6		MANUAL	73	9,8	7,6	41	338,9	
3	1		AUTOMÁTICO	87	8,4	8,4	28	313,2	
	2		AUTOMÁTICO	88	8,5	8,4	40	320,6	
	3		AUTOMÁTICO	86	8,3	8,4	44	305,9	
	4		MANUAL	73	9,4	7,1	36	347,9	
	5		MANUAL	71	9,4	6,9	40	348,2	
	6		MANUAL	75	9,6	8,8	40	294,5	

Fonte:

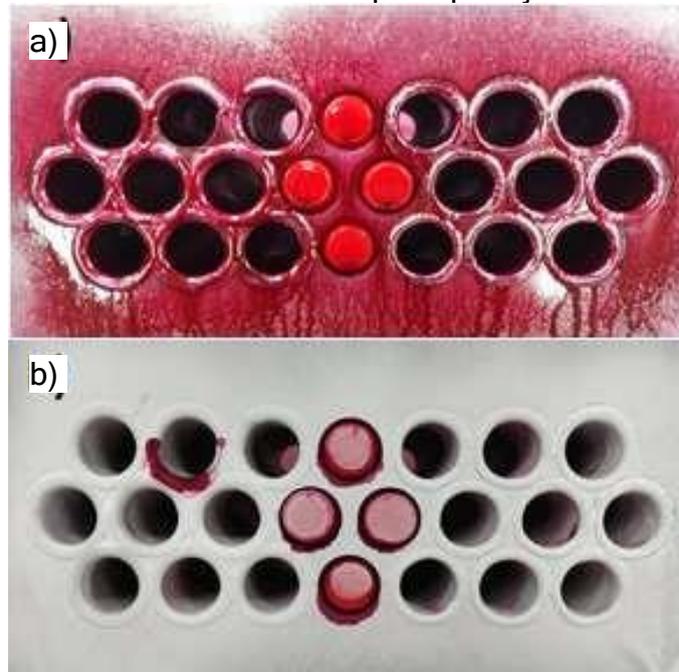
Elaborado pelo autor (2022).

### 3.6 Avaliação da soldagem por meio de ensaios não destrutivos (END).

Uma das principais informações colhidas da inspeção visual da soldagem de titânio é a avaliação se a proteção gasosa usada foi eficaz. A coloração da região soldada indica a espessura da camada de óxido criada quando o titânio, em sua forma líquida na poça de fusão, teve contato com o oxigênio.

O ensaio não destrutivo por líquido penetrante foi realizado, antes do corte do corpo de prova, para verificar a existência de descontinuidades superficiais nas soldas realizadas. Para o ensaio, aplicou-se o líquido penetrante Metal Check VP 30 na região soldada, conforme Figura 28 a), e após 15 minutos, foi removido o excesso utilizando o removedor Metal Check E-59. Esperou-se mais 10 minutos, tempo recomendado para a correta penetração, e foi aplicado o revelador Metal Check D-70, conforme Figura 27(b), que agiu durante 20 minutos. Todos os materiais utilizados no ensaio foram disponibilizados pelo INTM (“ABNT NBR 16450:2016 - Ensaio não destrutivo - Líquidos Penetrantes”, 2016).

Figura 27 - Etapas realizadas no ensaio por LP: (a) aplicação do líquido penetrante; (b) resultado final do ensaio após aplicação do revelador.



Fonte: Elaborado pelo autor (2021).

### 3.7 Ensaio de dureza

Segundo o guia de boas práticas para soldagem do titânio - TWI (1999), uma alternativa para avaliação da soldagem do titânio c.p. é a realização do ensaio de dureza em campo. Este ensaio foi realizado com intuito de checar como esta propriedade mecânica se comporta, em cada um dos dois processos de soldagem objetos desse estudo, além de identificar presença de contaminação, que poderá indicada com valores de durezas acima do valores previstos na Tabela 1.

Para o ensaio foi utilizado um durômetro portátil modelo ISH-PHA-U, do fabricante INSIZE, disponibilizado pelo laboratório da GRI Brazil. Esse é o modelo de durômetro indicado para medições em campo, seja durante a fabricação do trocador de calor ou durante as manutenções corretivas (reparos) quando são identificados vazamentos na soldagem de união tubo-espelho. Foram executadas três medições de dureza, para cada um dos processos de soldagem.

### 3.8 Fluorescência de raio-X (FXR)

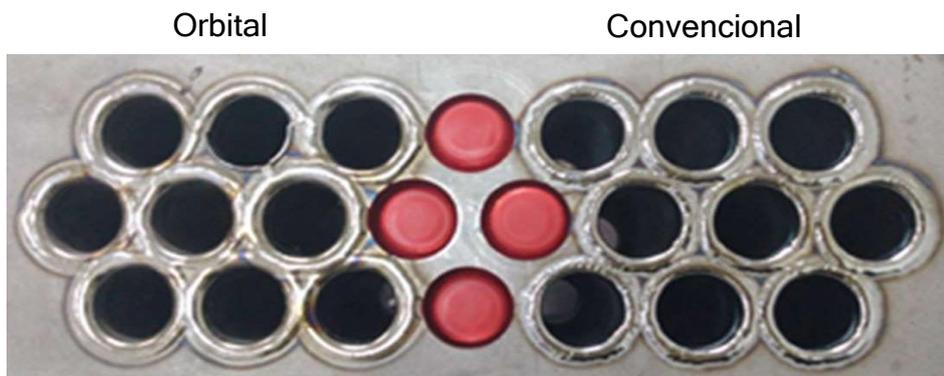
Para analisar a composição química da zona fundida (ZF) e comparar a composição química do metal de base (MB) com os valores que constam no certificado de material (anexo I), foi realizado o ensaio de fluorescência de raio-X (FRX), através do espectrômetro HORIBA, modelo MESA-50, com a seguinte parametrização: tensão de 15 kV, tempo médio de 60 s, corrente de 200  $\mu$ A e colimador de 1,2 mm, disponibilizado pelo INTM.

## 4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 4.1 Avaliação das soldaduras por ensaio não destrutivo (END)

Após a realização da soldagem, o corpo de prova foi submetido ao ensaio visual de soldagem (EVS), conforme norma ABNT NBR315:2007, onde não foi detectado nenhuma descontinuidade superficial (Figura 28).

Figura 28 - União tubo-espelho soldado por TIG orbital e convencional.



Fonte: Elaborado pelo autor (2022).

Também foi analisado o critério de aceitação da contaminação, através da coloração do cordão de solda, segundo TWI (1999), conforme a Tabela 10.

Tabela 10 - Resultado da inspeção visual do corpo de prova.

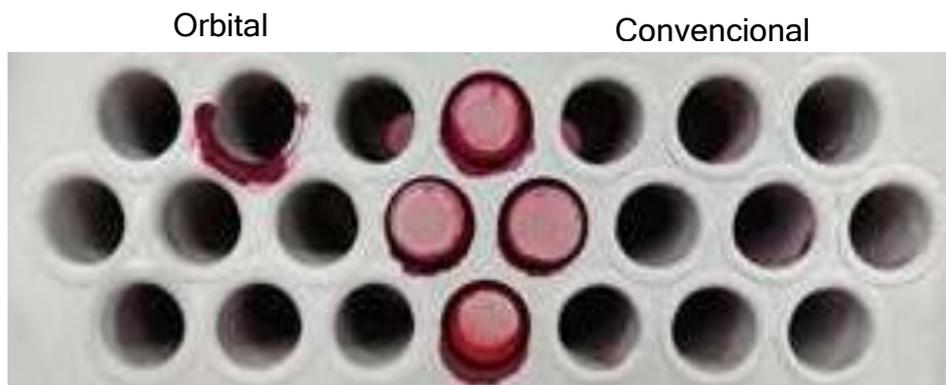
LINHA	TUBO	TIPO	COLORAÇÃO ENCONTRADA	AValiaÇÃO
1	1	AUTOMÁTICO	Prateado + palha clara a 120°	Aceitável
	2	AUTOMÁTICO	Soldagem interrompida	Não avaliada
	3	AUTOMÁTICO	Prateado + palha clara a 180°	Aceitável
	4	MANUAL	Prateado	Aceitável
	5	MANUAL	Prateado	Aceitável
	6	MANUAL	Prateado	Aceitável
2	1	AUTOMÁTICO	Prateado + palha clara a 0°, 60° e 120°	Aceitável
	2	AUTOMÁTICO	Prateado + palha clara a 60° e 120°	Aceitável
	3	AUTOMÁTICO	Prateado	Aceitável
	4	MANUAL	Prateado	Aceitável
	5	MANUAL	Prateado	Aceitável
	6	MANUAL	Prateado	Aceitável
3	1	AUTOMÁTICO	Prateado + palha clara a 60°	Aceitável
	2	AUTOMÁTICO	Prateado + palha escura a 0° e palha leve a 60°	Aceitável
	3	AUTOMÁTICO	Prateado + palha escura a 0° e azul escuro a 260°	Aceitável
	4	MANUAL	Prateado	Aceitável
	5	MANUAL	Prateado	Aceitável
	6	MANUAL	Prateado	Aceitável

Fonte: Elaborado pelo autor (2022).

No procedimento da inspeção quando toda a circunferência da junta soldada possui cor uniforme define-se somente a classificação TWI. Para amostras com alguma heterogeneidade de coloração, foi identificado também a orientação, em ângulo no sentido horário, da heterogeneidade (Titanium information group. Welding Titanium. TWI, 1999; “ABNT NBR NM 315:2007 - Ensaio não destrutivo - Ensaio Visual”, 2007). Todos os cordões foram aprovados, de acordo com a coloração apresentada, com exceção do tubo 2 da linha 1, pois devido a problemas técnicos do equipamento, esse tubo não teve a soldagem finalizada.

Seguidamente foi realizado o ensaio por líquido penetrante (LP), conforme ilustrado na Figura 29. Nenhuma descontinuidade superficial foi evidenciada, comprovando a integridade mecânica da solda, com exceção do tubo 2 da linha 1, pois devido a problemas técnicos do equipamento de soldagem, esse tubo não teve a soldagem finalizada.

Figura 29 - Resultado revelado pelo ensaio de líquido penetrante.



Fonte: Elaborado pelo autor (2022).

#### 4.2 Ensaio de dureza Vickers

No ensaio de dureza, foi verificada a diferença entre os dois processos de soldagem, conforme a Tabela 11. O valor de dureza medido na chapa SB-265 Gr.7 foi de  $111,7 \pm 20$  HV, que corresponde ao limite inferior da escala do titânio (100 HV), citado na Tabela 1. Para a média das três medições realizadas para o processo TIG orbital o valor da dureza foi  $126,7 \pm 20$  HV, enquanto para o TIG convencional foi de  $154,3 \pm 20$  HV.

Tabela 11 - Tabela comparativa de dureza.

	<b>Chapa Titânio SB-265 Gr.7</b>	<b>TIG orbital (autógena)</b>	<b>TIG convencional</b>
1º teste	111 ± 20 HV	126 ± 20 HV	161 ± 20 HV
2º teste	110 ± 20 HV	125 ± 20 HV	148 ± 20 HV
3º teste	114 ± 20 HV	129 ± 20 HV	154 ± 20 HV
<b>Média</b>	<b>111,7 ± 20 HV</b>	<b>126,7 ± 20 HV</b>	<b>154,3 ± 20 HV</b>

Fonte: Elaborado pelo autor (2023)

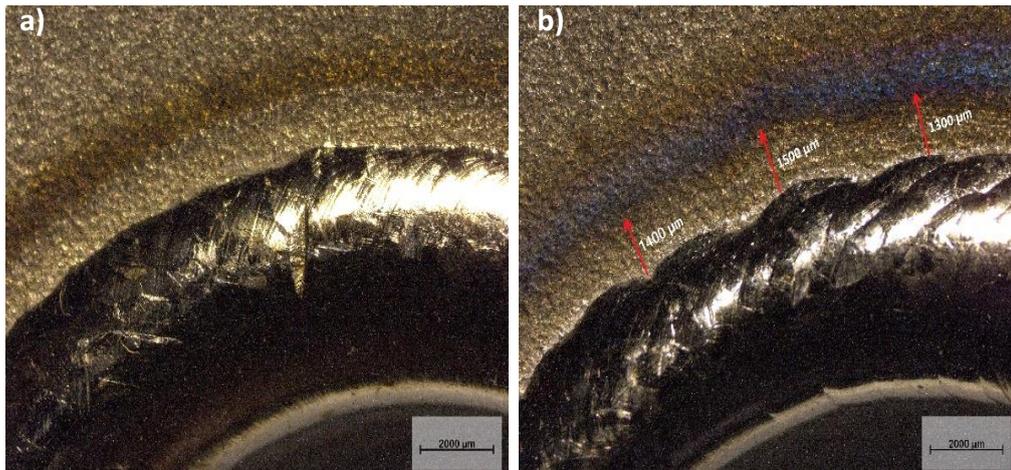
Como as informações de dureza não constam na seção II do código ASME, que trata da especificação de materiais, foram conferidas as medidas do metal de base (MB), chapa de titânio SB-265 Gr.7, usados neste estudo, conforme Tabela 11, para comparar com as durezas medidas nos cordões de solda.

Os resultados encontrados são similares com os resultados das literaturas utilizadas neste trabalho, onde ficou demonstrado que o menor valor de dureza foi observada no processo TIG orbital autógena, pois está relacionado com o menor aporte térmico, evidenciado anteriormente na Tabela 9, em comparação com o processo TIG convencional. O aporte térmico rege as taxas de resfriamento nas soldas e, portanto, tem relação direta com a microestrutura da ZF e da ZTA.

#### 4.3 Caracterização por estereoscopia

Na análise macroscópica foi identificado que as colorações da ZTA dos dois processos de soldagem apresentaram diferença, conforme Figura 30. No processo TIG orbital a proteção gasosa, dentro da câmara de soldagem, foi mais eficiente do que a proteção gasosa produzida pelo TIG no processo convencional, devido as colorações apresentadas. No processo TIG convencional foi identificado a coloração azul escuro, que indica contaminação, porém aceitável segundo as boas práticas para soldagem do titânio, TWI (1999), que só considera a solda reprovada caso a coloração azulada na ZTA esteja a menos de 0,762 mm (0,03 in) da solda.

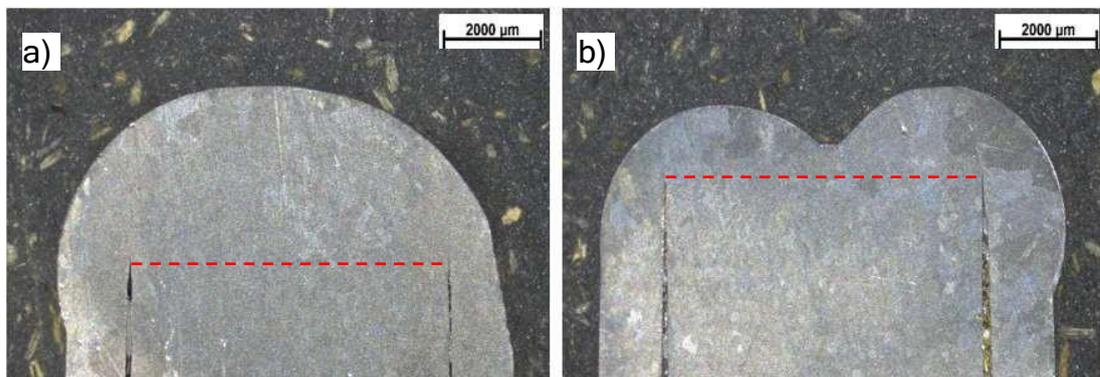
Figura 30 - ZTA (a) TIG orbital; (b) TIG convencional.



Fonte: Elaborado pelo autor (2022).

Analisando a geometria da solda, percebe-se facilmente falta de padronização no reforço, comparando os dois lados do mesmo tubo soldado, nos dois processos de soldagem, conforme Figura 31. Na mesma figura também se percebe diferença no comprimento fundindo da interface tubo-espelho, comparando as linhas vermelhas tracejadas dos dois processos de soldagem.

Figura 31 - Região da solda que foi analisada. a) TIG orbital; b) TIG convencional.



Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

#### 4.4 Fluorescência de raio-X (FRX)

No ensaio de FRX foram medidos três pontos em cada lado das amostras, dos dois processos, totalizando 12 medidas, conforme a Tabela 12 e a Figura 32. Analisando os resultados das médias dos valores coletados, obteve-se o valor de 97,2% de titânio no processo TIG Orbital e 98,9% de titânio no processo TIG convencional.

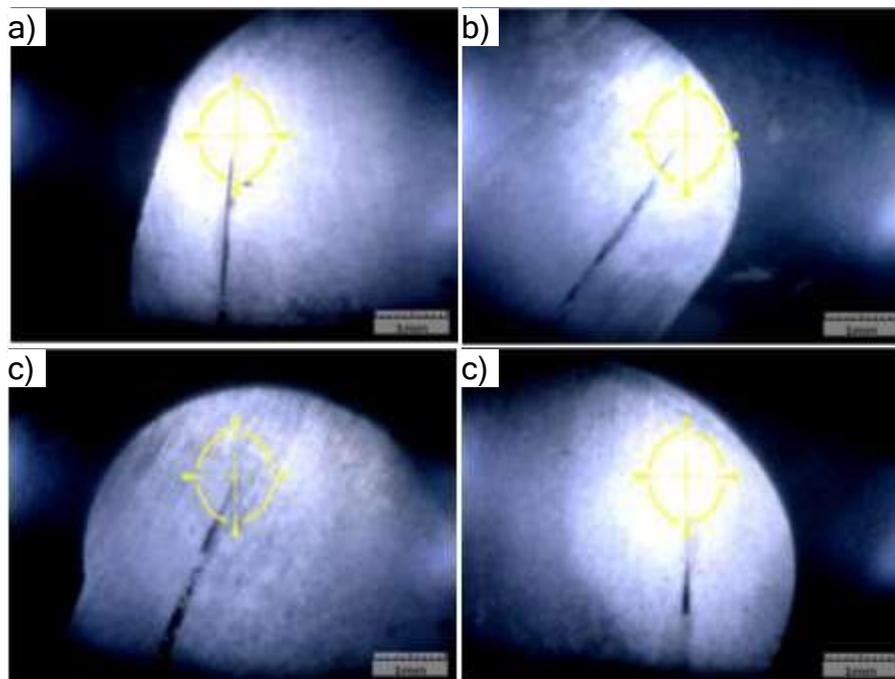
Tabela 12 - Informações coletadas do ensaio de FRX, na região da zona fundida (ZF).

Ponto	Localização na amostra	TIG orbital	TIG convencional
		Ti (wt%)	Ti (wt%)
P1	Lado esquerdo	97,4	99,1
P2	Lado esquerdo	96,9	98,2
P3	Lado esquerdo	92,3	97,6
P4	Lado direito	99,4	99,1
P5	Lado direito	98,0	99,9
P6	Lado direito	99,5	99,6
<b>Média</b>		<b>97,2</b>	<b>98,9</b>

Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

Em ambos processos percebeu-se leve redução do percentual de titânio, comparado com os valores descritos no certificado de matéria prima da chapa (anexo I) e do tubo (anexo II), sendo o valor médio do processo TIG orbital com uma redução de titânio ainda maior.

Figura 32 - Ensaio de FRX. a) Lado esquerdo, TIG orbital; b) Lado direito, TIG orbital; c) Lado esquerdo, TIG convencional; d) Lado direito, TIG convencional.



Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

Os resultados encontrados eram esperados, pois no processo TIG orbital foram fundidos dois materiais com elevado percentual de titânio em sua composição química, a chapa (anexo I) e o tubo (Anexo II). Já no processo TIG convencional existe um terceiro material fundido durante a soldagem, que é a vareta de solda, que também apresenta percentual elevado de titânio em sua composição química (anexo III), assim como a

chapa (anexo I) e o tubo (Anexo II), que contrubuiu para a manutenção do alto percentual do titânio.

## 5. CONCLUSÕES

Os resultados do processo de soldagem TIG orbital autógena foram satisfatórios para a soldagem de vedação em união tubo espelho de trocadores de calor tipo casco-tubo, principalmente pelos benefícios da padronização e qualidade proporcionados pela automação do processo TIG convencional, confirmando a possibilidade de sua substituição.

Em ambos processos de soldagem houve uniformidade das soldas, considerando os nove tubos soldados em cada processo. Na prática, essa uniformidade poderá ser afetada pelo cansaço do soldador relacionado a quantidade de tubos soldados. No processo TIG orbital o cansaço do soldador não é considerado, além da possibilidade de utilização de vários cabeçotes de soldagem no mesmo espelho trabalhando ao mesmo tempo.

O resultado do ensaio visual de solda (EVS) foi equivalente nos dois processos de soldagem, pois em ambos processos não evidenciou-se descontinuidades visuais.

O resultado do ensaio de líquidos penetrantes (LP) foi equivalente nos dois processos de soldagem, pois em ambos processos não evidenciou-se descontinuidades superficiais.

Avaliando o nível de contaminação das soldas, através de suas colorações, percebeu-se que no processo de soldagem TIG orbital houve leve contaminação em alguns pontos de algumas soldas, mesmo usando uma câmara especial para contenção do gás inerte. Todos os pontos onde evidenciou-se essa leve contaminação, foram aprovados de acordo com o padrão de cores previstos no guia de boas práticas para soldagem do titânio (Titanium information group. Welding Titanium. TWI, 1999). No processo TIG convencional a coloração da solda foi uniforme, porém está totalmente relacionado com a habilidade do soldador.

Avaliando o nível de contaminação das zonas termicamente afetadas (ZTA), ficou evidenciado contaminação, identificada pela cor azul escuro, no processo de soldagem TIG convencional. Essa contaminação é aceitável pois está localizada acima de 0,762mm do cordão da solda. Na ZTA do processo de soldagem TIG orbital a coloração evidenciada foi a cor prata, que demonstra que não houve contaminação alguma.

Comparando as durezas, percebeu-se que no processo de soldagem TIG orbital houve um menor aporte térmico durante a soldagem, indicado pelos valores de durezas mais baixos que os valores de dureza comprovados no processo de soldagem TIG convencional.

No ensaio de macrografia percebeu-se falta de padronização no reforço das soldas, entre os dois lados do mesmo tubo, possivelmente provocado pelos diferentes movimentos de soldagem: ascendente e descendente. Essa falta de padronização não deve gerar impactos na solda por se tratar de uma solda de vedação, que segundo a ISO 16812 (2007), é uma solda onde sua resistência não é especificada, para aplicações específicas em união tubo-espelho expandida em trocadores de calor tipo casco-tubo, com o único propósito de reduzir o potencial de vazamento.

É esperado que a engenharia de projeto do equipamento seja capaz de opinar qual a profundidade mínima de fusão recomendada, com isto em mãos os procedimentos podem ser aprimorados.

## 6. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- Como houveram resultados semelhantes, nas comparações entre os processos, gostaria de avaliar a soldagem TIG convencional, sem o uso do metal de adição, e comparar com os resultados obtidos neste trabalho;
- Sugerir para o código ASME uma definição de comprimento mínimo para fusão entre a interface tubo-espelho, mesmo sendo uma soldagem de vedação já expansionada, para as aplicações com fluídos letais onde os vazamentos precisam ser evitados;
- Realizar análise comparativa de custos dos dois processos de soldagem;
- Estudar a influência da vazão de gás de purga na qualidade da solda;

## REFERÊNCIAS

ABEQ. A indústria química e o seu desenvolvimento no âmbito da engenharia. **ABEQ - Associação Brasileira de Engenharia Química.**, 2014.

ABIQUIM. O desempenho da Indústria Química Brasileira. **Associação Brasileira da Indústria Química. ABIQUIM**, 2020.

**ABNT NBR 16450:2016 - Ensaios não destrutivos - Líquidos Penetrantes**, 2016.

**ABNT NBR NM 315:2007 - Ensaios não destrutivos - Ensaio Visual**, 2007.

ARAÚJO, E. C. C. **Trocadores de Calor**. São Carlos: EdUFSCar, 2002.

**ASM Handbook**. [s.l.] ASM International, 2004. v. 9,

**ASME section IX: qualification standard for welding**. New York. Section IX: qualification standard for welding and brazing procedures, welders, brazers, and welding and brazing operators. 2017.

AWS D1.9 - Structural welding code - Titanium. AWS – American Welding Society. 2007.

AWS D10.6 - Recommended Practices for Gas Tungsten Arc Welding of Titanium Piping and Tubing – American Welding Society. 2000.

BAUER, J. R. DE O. **Propriedades mecânicas do titânio comercialmente puro e da liga Ti-6Al-4V fundidos em diferentes ambientes**. São Paulo: Universidade de São Paulo - USP, 2007.

Dewson, S., & Li, X. (2005). **Selection criteria for the high temperature reactor intermediate heat exchanger**. In Proceedings of ICAPP (Vol. 5, pp. 15-19).

FAIRBANKS, M. Perspectiva 2017 - Indústria Química: Setor volta a crescer, mas pede reformas amplas para sair da estagnação. **Revista Química e Derivados**, 2017.

FRAUCHES-SANTOS, C.; ALBUQUERQUE, MARIANA. A.; OLIVEIRA, MÁRCIA. C. C.; ECHEVARRIA, A. A Corrosão e os Agentes Anticorrosivos. **Revista Virtual de Química**, Volume 6, n. 2, p. 293–309, 2014.

GÓRKA, J.; PRZYBYŁA, M.; CHUDZIO, A.; ŁADAK, D.; SZMUL, M. **Qualifying the TIG orbital welding technology of titanium pipes with a perforated bottom**. Poland: Silesian University of Technology, 26 mar. 2020.

INCROPERA, F.; DEWITT, D. **Fundamentos de Transferência de Calor e Massa**. 6. ed.[s.l.] LTC, 2008.

ISO 16812. **ISO 16812:2007 Petroleum, petrochemical and natural gas industries - Shell-and-tube heat exchangers**, 2007. Acesso em: 13 jul. 2020.

JORGE ANDREY WILHELMS GUT. **Configurações ótimas para trocadores de calor a placas**. São Paulo: Universidade de São Paulo - USP, 2003.

JUSTINA, E. D. D.; BASTOS, T. E. Revestimento Epóxi Novolac de Alto Desempenho à Corrosão para Aplicação em Superfícies Ferrosas Preparadas por Meio de Ferramentas Mecânicas, nos Serviços de Manutenção Industrial. **INTERCORR2018 - ABRACO**, 2018.

LEVENSPIEL, O. **Engineering Flow and Heat Exchange**. 3ª ed. Corvallis, OR, USA: OregonState University, 2014.

LUCK, J.; FULCER, J. Welding Journal. **Titanium Welding 101: Best GTA Practices**, p. 26a 31, 2007.

LÜTJERING, G.; WILLIAMS, J. C. **Titanium**. 2ª Edição. Ed. New York: Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2003.

MARQUES, P. V.; MODENESI, P. J.; BRACARENSE, A. Q. **Soldagem Fundamentos e Tecnologia**. 3ª ed. Belo Horizonte: UFMG, 2009.

MARTINS, K. **DESENVOLVIMENTO E CARACTERIZAÇÃO DE TECNOLOGIA PARA ALIMENTAÇÃO DINÂMICA DE ARAME NO PROCESSO GTAW**, 2018. Acesso em: 30 jul. 2021.

MAUS. **Catálogo mandris para expandir tubos – Maus**. Disponível em: <[http://www.mausitalia.it/catalogs/67\\_te-l2-webpdf\\_POR.pdf](http://www.mausitalia.it/catalogs/67_te-l2-webpdf_POR.pdf)>. Acessado em: 20/07/2020.

MELO, A. L. V. **Análise das propriedades de chapas de Ti ASTM grau 5 (Ti6Al4V) soldadas por laser Nd:YAG**. Rio de Janeiro: Instituto Militar de Engenharia-IME, Programa de Pós-Graduação Ciência dos Materiais, 2007.

MODENESI, P. J.; MARQUES, P. V.; SANTOS, D. B. **Introdução à Metalurgia da Soldagem**. Belo Horizonte: UFMG, 2012.

MORAES, L. C.; SEER, H. J. **Recursos minerais de Minas Gerais - Titânio**, UFMG, 2015. Acessado em: 23 dez. 2020.

MORTEAN, M. V. V. **TROCADORES DE CALOR COMPACTOS SOLDADOS POR DIFUSÃO: FABRICAÇÃO E MODELAGEM**. Florianópolis: Universidade Federal de Santa Catarina, 2017.

MUNCASTER, P. W. **Practical Guide to TIG (GTA) Welding**. England: Elsevier, 1991. OTANI, T. Titanium welding technology. Nippon Steel Technical Report, v.95, 2007.

PICCHI, I. B. D. M. **SOLDAGEM DISSIMILAR POR ELETROESCÓRIA COM FITA DE CHAPAS DE AÇO CARBONO CLADEADO COM AÇO INOXIDÁVEL 904L E PASSE DE ACABAMENTO EM INCONEL 625**. Recife-PE: UFPE, 2021.

POLYSOUDE. **Orbital tube to tubesheet welding as versatile solution.**

Disponível em:

<<https://www.polysoude.com/orbital-and-automated-welding/orbital-tube-to-tubesheet-welding/>>. Acessado em: 20/07/2020.

SHEILA M.C. **Estudo da soldabilidade a laser do titânio comercialmente puro grau 2 empregado em sistemas pneumáticos de aeronaves.** São Paulo: Universidade de São Paulo -USP, 2012.

TAVARES, A. **A CADEIA PRODUTIVA DA INDÚSTRIA QUÍMICA NO CONTEXTO DA ECONOMIA CIRCULAR.** Rio de Janeiro: UFRJ, 2018.

TEMA. **Standarts of the Tubular Exchanger Manufactures Association.** 9ª Edição. NewYork: 2007.

**Titanium information group. Welding Titanium. TWI.** UK: [s.n.]. v. 3.

VICENTE, A.; RYU, Y. **Soldagem do titânio e suas ligas,** 2022.

VIEIRA, M. G. S. **ESTUDO DOS PROCESSOS DE CORROSÃO E BIOCORROSÃO CAUSADOS POR FLUIDOS DA INDÚSTRIA DE PETRÓLEO.** Recife-PE: UFPE, 2013.

WAIMER, E.; BRANDI, S. D.; MELLO, F. D. H. DE. **Soldagem - Processos e Metalurgia.** São Paulo: Edgard Blucher LTDA, 1992.

ANEXO A - CERTIFICADO DE MATÉRIA PRIMA DO CHAPA DE TITÂNIO SB-265 GR.7

**ThyssenKrupp Titanium s.p.a.**  
 A Company of ThyssenKrupp Stainless  
 Via B. Bini, 218 - 05100 TERNI - ITALY  
 Tel.: +39-0744-545411 - Fax: +39-0744-470900

**CERTIFICATO DI COLLAUDO N° 2007 - 0342**

CLIENTE / CUSTOMER: **CAP.CO SRL**  
 VIA L. EINAUDI, 1  
 BUSTO ARSIZIO - VA

MATERIALE: **Titanium GR. 07**  
 MATERIAL: **Titanium GR. 07**  
 MANIFATTURA: **LAMIERE PLATES TOLES**  
 PRODUCT: **LAMIERE PLATES TOLES**  
 PROFUGERSTAND: **ASME SB 265-04 add.06 GR.7 SECT. II PART B**

INSPEZIONE: **(EN10204/3.1)**  
 ORIGINAL: **PO 07**  
 COMMANDER DU CLIENT N°: **90710046**  
 BESTELLUNG N°: **90710046**  
 ORGANE N°: **04**  
 CONVALENT N°: **04**  
 WERKS N°: **04**

POS. REP. POS. DATE: **February 22 2007**

**IGO** **TUV**

**RESULTATI DELLE PROVE / TEST RESULTS / RESULTATS DES ESSAIS / ERGEBNIS DER PRÜFUNGEN**

N° TEST / TEST N° / ESSAI N° / PRÜF-NR.	DIMENSIONI (MM) / DIMENSIONS / DIMENSIONS / ABMESSUNGEN	N° PEZZI / PIECES / VPIECES / STÜCKEN	FINITURA / FINISH / VFINISH / ABSCHLUS	PESO / WEIGHT / GEWICHT / KG	PRELIEVO / SENSU		TRAZIONE / TRACTION / ZUGVERSUCH				PREGIA / PLAGE / VPLAGE / RÜSTVERSUCH	ENERGIA DI ROTTURA / ENERGY OF FRACTURE / ENERGIE DE RUPTURE / SCHÜSSARBEIT	TEMPERATURA DI PROVA / TEST TEMPERATURE / PRÜFTEMPÉRATUR	% EACH	% TOTAL	% TI
					(1)	(2)	Y <sub>0.2</sub> %	% 1%	T <sub>5</sub>	E %						
A 7051	11,00 1800,00 1900	1	1	180	T	T	385	492	29	20 °C						
					T	T	337	493	35	20 °C						
					C	T										
					C	L										

CHARACTERISTICHE RICHIESTE - REQUIRED CHARACTERISTICS - CHARACTERISTIQUES REQUIÈRES - ANFORDERUNGEN: **1275-450**  
**1275-450**

NOTE:  
 1. MATERIAL ALSO ACCORDING TO ASTM B265-05 SPEC. AND DIRECTIVE 97/23/EC, ANNEX 1, PAR. 4.3.

1) Sampling - Location - Ort  
 T = Top - "Tête - Kopf"  
 C = Edge - "Brennen - Rand - Flans"

2) Size - Direction - Richtung  
 T = Transverse - "Transvers - "Traverse - Quers"  
 L = Longitudinal - "Longitudinal - Long - Längs"

ThyssenKrupp Titanium S.p.A.  
 FIRMA DEL RESPONSABILE INCARICATO  
 SIGNATURE DU RESPONSABLE CHARGE  
 UNTERSCHRIFT DES VERANTWORTLICHEN  
**Roberto Clementini**

STATO DI FORNITURA - STATE OF DELIVERY: **ANNEALED AND PICKLED. THE MATERIAL SUPPLIED IS IN COMPLIANCE WITH THE REQUIREMENTS OF THE ORDER.**  
 ETAT DE LIVRAISON - LIEFERSTAND:

ANEXO B - CERTIFICADO DE MATERIA PRIMA DO TUBO DE TITANIO SB-338 GR.2

**CSM TECH CO.,LTD**

☎ (+86)-21-58770128  
 Fax: (+86)-21-58770148

Customer / Besteller / Client  
**AGUILAR Y SALAS,S.A.**  
**CALLE IRLANDA S/N 08520**  
**LES FRANQUESES DEL VALLES SPAIN**

**MATERIAL TEST REPORT**  
 ACCORDING TO EN 10204 3.1.  
 ISO 9001:2008 LLOYD ' S APPROVAL  
 CERTIFICATE NO.QAC6007825  
 PED 2014/68/EU ANNEX I  
 PARAGRAPH 4.3 COMPLIANCE  
 CERTIFICATE NO.QAC6007825A

Certificate No.CSMHX-SH17081  
 Prüfbescheinigung-Nr.  
 Certificate No.

Page No. 1 OF 2  
 Blatt Nr.  
 Page No.

Date/ValidDate: 2017/05/26  
 Certified that, unless otherwise stated below, the whole of the below mentioned materials have been manufactured, test and inspected in accordance with the terms of the contract/order applicable thereto and conform fully to the standards/specifications quoted hereon and the requirements of the :  
 Es worden bescheinigt, dass alle hier aufgeführten Lieferpositionen inspiziert und geprüft worden sind und, soweit nicht anders angegeben, der Spezifikation und dem o.a. Vertrag entsprechen.

Nous certifions que, sauf spécifications indiquées ci-dessous, tous les produits mentionnés ci-dessous ont été fabriqués, essayés et contrôlés conformément aux conditions du contrat ou de la commande, conformes et sont entièrement conformes aux normes ou spécifications mentionnées ici et aux exigences de :  
 For Huaxia Group.  
 Authorised Signatory / Der Werksachsverständige / Unspekteur Autorisê

L/C NO.:5197330101600

Product Description & dimensions /  
 Dimensions du Matêriel  
**TITANIUM SEAMLESS TUBES**  
 Size: OD25.4 X 1.24(AW) X 487(-0/+5)MM

Authorised Signatory / Der Werksachsverständige / Unspekteur Autorisê  
 Werkstoff (Normbezeichnung) & Abmessungen / Description et

Proforma Invoice No.: 011816/9999  
 Auftrag-Nr. / Vertrag-Nr.  
 No. de la Commande / Contrat du Client

Quantity /  
 Quantité  
**460PCS/2243.42M**

Weight or Length  
 Gewicht oder Länge  
 Poids ou Longueur:

Mill Batch No.  
 Lot-Nr.  
 Lot No.  
**XD11**

Heat No.:  
**HB1703-2538-1**

Delivery  
 Condition:  
**ANNEALED**

Inspector  
 DII  
 Kontrolleur  
 Inspecteur

Manufacture according to: ASME SB338 GR.2

**Chemical Composition/Analyse Weight %:**

	Fe	C	N	H	O	Ti	Residual
Specification (max)	0.30	0.08	0.03	0.015	0.25	Remainder	each≤0.10 total≤0.40
TOP	0.070	0.012	0.009	0.0014	0.051	Remainder	<0.10 <0.40
BOTTOM	0.068	0.011	0.008	0.0013	0.050	Remainder	<0.10 <0.40

**Mechanical Properties:**

Specification	Tensile Strength (Mpa)	Yield Strength, 0.2% (Mpa)	Elongation (%)
Analyse	345(Min) 492/491	Min/Max 275/450 392/400	Min.20% 40/40
ULTRASONIC TEST	HYDROSTATIC TEST	EDDY CURRENT TEST	FLATTENING TEST
Acceptable	Acceptable	Acceptable	Acceptable
Dimension:	Length	Outside DIA.	Wall Thickness
Acceptable	Acceptable	Acceptable	Acceptable
		VISUAL INSPECTIONS	FLARING TEST
		Straightness	Acceptable
		Squareness of cut	Acceptable

-----END OF CERTIFICATE / ENDE-----



**CSM TECH CO.,LTD**



*[Handwritten signature]*

## ANEXO C - CERTIFICADO DE MATERIA PRIMA DA VARETA DE SOLDAGEM ER-TI-02

## Torresintitanio

## RAPPORTO DI COLLAUDO E PROVA / Test Report n° 350/2014

NS. LOTTO / Our Lot : TT 15-459  
 NS. RIF. - CERT / Our Ref. - Cert : TT 116 - 2014-7-14  
 PRODOTTO / Product : Titanium Wire, dia. 3,2 x 1000 mm  
 Titanium Wire, dia. 0,8 mm  
 QUANTITÀ / Quantity : Tot. 120 Kg  
 Tot. 7 Kg  
 NORMATIVE / Specifications : ERTI 2, AWS A 5.16, EN 10204-3.1  
 COLATA - LOTTO / Heat - Lot : HN2013-2-31125S  
 CONDIZ. DI FORNIT. / Condit. of delivery : Annealed

COMPOSIZIONE CHIMICA / Chemical Composition (Ladle Analysis)								
COLATA / Heat	Fe (%)	O (%)	C (%)	N (%)	H (%)	Residual Each (%)	Residual Total (%)	Ti (%)
HN2013-2-31125S	0,05	0,09	0,01	0,01	0,004	<0,10	<0,40	Balance

## NOTE / Remarks

Visual Inspection and Dimensional Inspection : Acceptable.

IL PRESENTE RAPPORTO CONTIENE DATI RICAVATI DAL CERTIFICATO DEL PRODUTTORE E/O DAL RAPPORTO DEL LABORATORIO CHE HA ESEGUITO LE PROVE. LA DOCUMENTAZIONE E' DISPONIBILE C/O CQ TORRESIN TITANIO s.r.l.  
 This is to report that the above test results are correct as per mill certificate and/or laboratory test certificate. The documentation is available at Torresin Titanio s.r.l. QC Department.

DATA / Date 28/07/14

TORRESIN TITANIO  
 QUALITY DEPT

TORRESIN TITANIO s.r.l. - Via Del Santo 246, 35010 LIMENA (PD) - ITALY  
 Tel. +39 049 88 44 711, Fax +39 049 88 44 754, E-mail: [info@titanio.com](mailto:info@titanio.com)  
 VA-VAT 04124040280 - N. R.E.A. PD 0363602 - Capitale Sociale € 100.000,00



Cert. n° 501009552 Rev.1

## ANEXO D - DECLARAÇÃO DE APOIO TÉCNICO-CIENTÍFICO DA AGUILAR Y SALAS BRASIL



Aguilar y Salas Brasil Ltda  
Zona Industrial 3 Gleba Leste  
Suape – Engenho Mercês – Ipojuca/PE Brasil  
CNPJ: 12.107.388/0002-94

---

Ipojuca, 28 de abril de 2020.

**Para:** Programa Pós-Graduação em Engenharia Mecânica/  
Universidade Federal de Pernambuco

A **Aguilar y Salas Brasil**, inscrita sob o CNPJ 12.107.388/0002-94, vem por meio desta declarar apoio técnico-científico ao aluno Thiago Henrique Bezerra de Santana, vinculado ao curso de mestrado do Departamento de Engenharia Mecânica/UFPE, orientado pelo Prof. Dr. Tiago Felipe de Abreu Santos.

O objetivo da parceria é apoiar o desenvolvimento do projeto de pesquisa intitulado: “EFEITO DA SOLDAGEM DO TITÂNIO PELO PROCESSO TIG CONVENCIONAL E TIG ORBITAL AUTÓGENO, EM SOLDA TUBO-ESPELHO DE TROCADORES DE CALOR”, com a disponibilização de desenhos, procedimentos de soldagem e matéria prima para fabricação de corpos de provas.

Este tema é relevante para o desenvolvimento de trocadores de calor, tanto na formação em nível de pós-graduação, como na interação universidade-empresa, se enquadrando como um arranjo produtivo local.

  
  
**Aguilar y Salas Brasil, LTDA.**  
\_\_\_\_\_  
Manuel Salas **Director**  
Diretor Geral de Aguilar y Salas Brasil