

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA  
CENTRO TECNOLÓGICO DE JOINVILLE  
CURSO DE ENGENHARIA NAVAL

VITOR FREIRE BANDEIRA

DOS DIFERENTES TIPOS DE TROCADORES DE CALOR AO TROCADOR  
CASCO-PLACAS: ESTUDOS DE CASOS

Joinville

2017

VITOR FREIRE BANDEIRA

DOS DIFERENTES TIPOS DE TROCADORES DE CALOR AO TROCADOR  
CASCO-PLACAS: ESTUDOS DE CASOS

Trabalho apresentado ao Curso de Graduação em Engenharia Naval da Universidade Federal de Santa Catarina como parte dos requisitos para a obtenção do título de Engenheiro Naval.

Orientador: Alexandre Mikowski, Dr. Fís.

Coorientador: Wagner M. Pachekoski, Dr. Eng.

Joinville

2017

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,  
através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Universitária da UFSC.

Bandeira, Vítor Freire

DOS DIFERENTES TIPOS DE TROCADORES DE CALOR AO TROCADOR  
CASCO-PLACAS : ESTUDOS DE CASOS / Vítor Freire Bandeira ;  
orientador, Alexandre Mikowski, coorientador, Wagner  
Maurício Pachekoski, 2017.

49 p.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) -  
Universidade Federal de Santa Catarina, Campus Joinville,  
Graduação em Engenharia Naval, Joinville, 2017.

Inclui referências.

1. Engenharia Naval. 2. Trocadores de calor. 3.  
Comportamento Mecânico. 4. Análise de Materiais. I.  
Mikowski, Alexandre . II. Pachekoski, Wagner Maurício. III.  
Universidade Federal de Santa Catarina. Graduação em  
Engenharia Naval. IV. Título.

Vítor Freire Bandeira

**DOS DIFERENTES TIPOS DE TROCADORES DE CALOR AO TROCADOR  
CASCO-PLACAS: ESTUDOS DE CASOS**

Este Trabalho de Conclusão de Curso foi julgado adequado para obtenção do título de bacharel em Engenharia Naval, pela Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico de Joinville.

Joinville (SC), 30 de novembro de 2017.

Prof. Luís Fernando Peres Calil, Dr. Eng.  
Coordenador do Curso de Engenharia Naval

**Banca Examinadora:**

Prof. Alexandre Mikowski, Dr. Fís.  
Orientador e Presidente da Banca

Prof. Kleber Vieira de Paiva, Dr. Eng.  
Membro da Banca – UFSC/Joinville

Prof. Thiago Antonio Fiorentin, Dr. Eng.  
Membro da Banca – UFSC/Joinville

## RESUMO

O trocador de calor PSHE – *Plate and Shell Heat Exchanger* – é um tipo de trocador de calor casco-placas. Esse equipamento apresenta, em seu núcleo, uma construção em placas arredondadas, soldadas e projetadas para operar a altas pressões e temperaturas. Falhas neste tipo de permutador foram registradas em curtos períodos de operação. Com o intuito de identificar os modos de falha ocorridos neste tipo de equipamento e obter um referencial bibliográfico sobre o tema, uma metodologia de pesquisa é proposta e um levantamento teórico é realizado. Durante a etapa de pesquisa, o trabalho concentrou-se em obter informações acerca de falhas estruturais em distintos tipos de trocadores de calor. Com a apresentação dos resultados, os estudos de casos pesquisados foram descritos e conclusões úteis ao campo de trocadores de calor casco-placas foram obtidas. Concluiu-se, quanto à metodologia, que mais bancos de dados poderiam ter sido utilizados no levantamento teórico. Entretanto, considerando que o ramo de pesquisa é relativamente novo, acredita-se que foi possível estabelecer um embasamento teórico de possíveis soluções aplicáveis a trocadores, cujos modos de falha estejam relacionados a processos corrosivos ou à concentração de tensões. Além disso, agregou-se material para a avaliação de futuras tomadas de decisão quanto ao emprego ou manutenção de trocadores de placas soldadas.

**Palavras-chaves:** Trocadores de Calor. PSHE. Levantamento Bibliográfico. Comportamento Mecânico. Análise de Materiais.

## ABSTRACT

A Plate and Shell Heat Exchanger is manufactured with round welded plates in its core. These plates are designed to withstand high pressures and temperatures. Failures in this kind of heat exchanger were registered in a short operating period. In order to obtain the failure modes present in this equipment and a theoretical framework concerning this field of study, a research methodology was proposed and a theoretical survey was carried out. During the research stage, this work focused on obtaining information on structural failures in different types of heat exchangers. Presenting the results, researched cases were described, and useful information on the field of plate and shell heat exchangers were obtained. As for the methodology, it was concluded that more databases could be used in the research phase. However, considering that the researched field is relatively new, it's believed that it was possible to establish a theoretical basis of possible solutions applicable to heat exchangers, which failure modes are related to corrosive processes or to stress concentration. In addition, new material was assembled with the intention to assess future decision-making process, regarding the use or maintenance of welded plate exchangers.

**Keywords:** Heat Exchangers. PSHE. Bibliographic Survey. Mechanical Behavior. Material Analysis.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Mecanismos de Transferência. ....	13
Figura 2 – Esquema estrutural de um PSHE.....	14
Figura 3 – Escoamento entre placa e casco. ....	15
Figura 4 – Materiais Empregados na Fabricação das Placas. ....	16
Figura 5 – Estruturas cristalinas para fase alfa e beta do titânio, respectivamente...	18
Figura 6 – Seção transversal esquemática de junta de topo por fusão.....	21
Figura 7 – Processo de soldagem TIG.....	22
Figura 8 – Resultados da Pesquisa 1, dados brutos.....	27
Figura 9 – Resultados da Pesquisa 1, dados selecionados.....	28
Figura 10 – Resultados da Pesquisa 2, dados brutos.....	28
Figura 11 – Resultados da Pesquisa 2, dados selecionados.....	29
Figura 12 – Localização das trincas.....	31
Figura 13 – Esquema de um Trocador de Placas Gaxetadas.....	32
Figura 14 – Modelo geométrico da região de solda entre tubo e placa do tubo.....	33
Figura 15 – Descrição da falha estudada em trocador casco e tubos.....	35
Figura 16 – Região soldada com baixa magnificação.....	36
Figura 17 – Distribuição da malha para o modelo da junta soldada.....	37
Figura 18 – Distribuição de Tensão de Von-Mises resultante do modelo.....	37
Figura 19 – Diagrama do processo de soldagem a laser.....	39
Figura 20 – Diagrama do Processo.....	39
Figura 21 – Esquema de uma placa e quatro possíveis formas de ondulações.....	41
Figura 22 – Possíveis arranjos de caminhos num trocador de placas.....	41
Figura 23 – Vista de corte da seção de duas placas corrugadas soldadas.....	42
Figura 24 – Distribuição da malha na seção analisada.....	42

## LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Níveis de Impureza para Titânio CP.....	17
Quadro 2 – Propriedades Mecânicas do Titânio Grau 1. ....	19
Quadro 3 – Características dos tipos de aço inoxidável.....	20
Quadro 4 – Composição Química dos Aços 316 e 316L.....	21
Quadro 5 – Propriedades Mecânicas dos Aços 316 e 316L. ....	21
Quadro 6 – Resultados da Pesquisa 1, dados brutos. ....	25
Quadro 7 – Resultado da Pesquisa 1, dados selecionados. ....	26
Quadro 8 – Resultados da Pesquisa 2, dados brutos. ....	26
Quadro 9 – Resultado da Pesquisa 2, dados selecionados. ....	27

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>9</b>
1.1	OBJETIVOS .....	10
1.2	ORGANIZAÇÃO DO TCC .....	11
<b>2</b>	<b>FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA .....</b>	<b>12</b>
2.1	PRINCÍPIOS DE FUNCIONAMENTO DE UM TROCADOR DE CALOR.....	12
2.2	TROCADOR DE CALOR PSHE .....	13
2.3	MATERIAIS.....	16
2.3.1	Titânio Grau 1 .....	16
2.3.2	Aço Inoxidável 316L .....	19
2.4	PROCESSOS DE SOLDAGEM .....	21
<b>3</b>	<b>METODOLOGIA .....</b>	<b>24</b>
<b>4</b>	<b>ANÁLISE DE RESULTADOS .....</b>	<b>30</b>
4.1	MODOS DE FALHA LIGADOS A PROCESSOS CORROSIVOS .....	30
4.2	MODOS DE FALHA LIGADOS À CONCENTRAÇÃO DE TENSÕES.....	33
4.3	CONTRIBUIÇÕES PARA A ÁREA DE PESQUISA .....	40
<b>5</b>	<b>CONSIDERAÇÕES FINAIS .....</b>	<b>44</b>
5.1	CONCLUSÃO .....	44
5.2	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS .....	45

## 1 INTRODUÇÃO

O mercado mundial de petróleo e gás passa por um período de mudanças, levando em consideração tanto a oferta, quanto à demanda do produto em questão. Um crescimento na demanda de combustíveis derivados do petróleo pode ser observado nas economias emergentes, tais como China, Índia e Oriente Médio. Além disso, a demanda em mercados bem estabelecidos (Estados Unidos e Europa) foi reduzida ou está se desacelerando. No lado da oferta, há um crescimento potencial na exploração de óleo e gás em águas profundas.

Deve-se entender que, após as crises do petróleo nas décadas de 70 e 80, muito do debate sobre o mercado mundial deste setor girou em torno da capacidade limitada de oferta. Vale comentar que, para o departamento de Energia, Informação e Administração dos EUA (EIA), a maior causa de preocupação é o fato de as maiores reservas de combustíveis fósseis se encontrarem em países membros da Organização dos Países Exportadores de Petróleo (OPEC).

Entretanto, nesse período recente, caso se levem em consideração medidas históricas, sustenta-se um alto valor para os preços do barril de petróleo. Ocorre que novos desenvolvimentos e melhorias nas tecnologias de extração tornaram-se mais comuns, permitindo que novas fontes entrem no mercado e, assim, auxiliem no crescimento da oferta.

Neste contexto, o setor de exploração de petróleo *offshore* está desenvolvendo formas mais simples e mais eficientes de processamento e transporte de óleo e gás.

Trocadores de calor são dispositivos que realizam a troca de energia térmica entre dois ou mais fluidos de diferentes temperaturas. Neste campo, dentre as novas tecnologias empregadas em plataformas de petróleo, pode-se incluir o trocador de calor casco-placas, também conhecido pela denominação em inglês *Plate and Shell Heat Exchanger* (PSHE). Este apresenta, em seu núcleo, uma construção em placas arredondadas, soldadas e projetadas para operar a altas pressões e temperaturas. As principais vantagens desse maquinário, em relação a trocadores de calor tubulares, são o seu baixo peso e pouco espaço ocupado, características pelas quais o sistema está sendo empregado em plataformas offshore, por exemplo; significando, portanto,

uma vantagem competitiva para a empresa. Esse design compacto, além das excelentes características de transferência de calor, possibilita o uso deste equipamento em uma grande variedade de processos nas indústrias química, automotiva, óleo-gás, dentre outras.

Grandes empresas do setor fazem uso desses trocadores de calor para a condensação da mistura de gases resultantes da exploração de poços de petróleo, o que exige do equipamento elevada resistência à pressão e a grandes diferenças de pressão internas.

A problemática envolvendo trocadores de calor se encontra na vida útil desses equipamentos. Em diversos casos documentados, equipamentos apresentaram falhas estruturais em períodos de operação mais curtos do que o esperado. Uma falha nesse equipamento corresponde, muitas vezes, a uma parada na planta de produção da empresa para que as devidas análises e reparos sejam efetuados. O custo para uma empresa, decorrente dessas horas improdutivas, é muito elevado.

Como será abordado adiante, por tratar-se de uma estrutura completamente soldada, este tipo de trocador está mais suscetível a falhas por fadiga na região do cordão de solda. Outros mecanismos de falha encontrados na literatura estão relacionados aos fenômenos de incrustação e corrosão. Considerando isto, este trabalho almeja, por meio de um levantamento teórico, apresentar um conjunto de soluções, viáveis às empresas da área, para prolongar a vida útil dos trocadores em operação; e disponibilizar material de análise para futuras decisões de projeto quanto ao emprego, manutenção, análise de falhas e comportamento mecânico destes trocadores de calor.

## 1.1 OBJETIVOS

O objetivo geral do presente trabalho é apresentar um levantamento teórico, cujo conteúdo contemple material introdutório sobre o campo de pesquisa, e, através de estudos de casos, material para realização de análises e tomadas de decisão quanto ao emprego e manutenção de um trocador PSHE. No desenvolvimento deste objetivo, propõe-se como objetivos específicos:

- Entender o funcionamento de um trocador de calor;

- Descrever os materiais empregados na fabricação de trocadores PSHE;
- Propor uma metodologia de pesquisa;
- Compreender os fenômenos relacionados à falha estrutural em trocadores de calor;
- Avaliar estudos de casos de distintos tipos de trocadores de calor e obter conclusões úteis ao tipo PSHE;
- Investigar avanços na área de trocadores do tipo casco-placas.

## 1.2 ORGANIZAÇÃO DO TCC

O primeiro capítulo desse trabalho se ocupa em delimitar o tópico de estudo e a problemática envolvendo a estrutura de um trocador de calor de placas soldadas. Explicitada a importância da realização deste levantamento bibliográfico, apresentam-se os objetivos dessa pesquisa.

Na etapa seguinte, apresenta-se uma fundamentação teórica, com o intuito de revelar o campo de pesquisa e relembrar conceitos essenciais à compreensão do trabalho.

No terceiro capítulo, descreve-se a modalidade de pesquisa realizada e propõe-se uma metodologia para tal.

O quarto capítulo se encarrega de exibir os principais resultados do levantamento teórico. Primeiramente, dividem-se os estudos de caso conforme os modos de falha de trocadores de calor observados nos artigos. Em seguida, destacam-se contribuições na área de estudo.

Finalmente, no último capítulo, indicam-se as principais conclusões obtidas; realiza-se uma avaliação crítica sobre a metodologia empregada e trazem-se propostas para trabalhos futuros.

## 2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Nesta etapa descreve-se o objeto de análise deste trabalho - trocadores de calor, mais especificamente os trocadores do tipo casco-placas. Primeiramente, realiza-se uma breve descrição do funcionamento de um trocador de calor, e suas características básicas. Em seguida, faz-se a descrição dos materiais mais comumente utilizados na produção de tais trocadores de calor. Por fim, apresentam-se as técnicas de soldagem consideradas neste estudo.

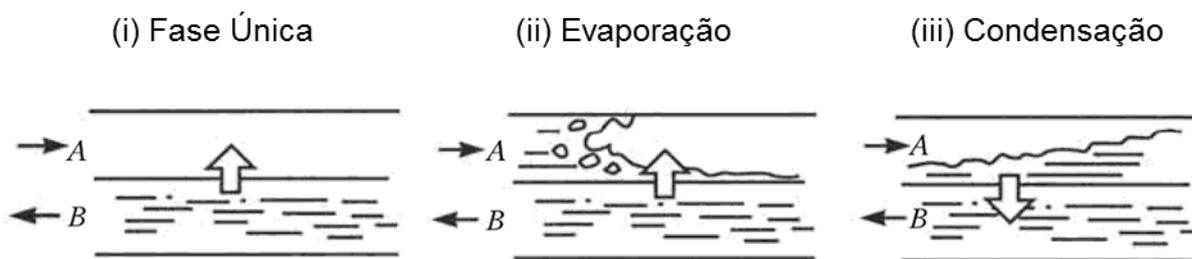
### 2.1 PRINCÍPIOS DE FUNCIONAMENTO DE UM TROCADOR DE CALOR

O processo de troca de calor entre dois fluidos a diferentes temperaturas separados por uma parede sólida pode ocorrer, basicamente, através de três mecanismos de transferência nos equipamentos em análise. Sendo estes:

1. Convecção de fase única em ambos os lados;
2. Convecção de fase única em um lado e convecção de duas fases no outro lado;
3. Convecção de duas fases em ambos os lados.

A Figura 1, adaptada de Kakaç (2012), demonstra esses princípios de transferência. As Figuras 1.ii e 1.iii demonstram duas possíveis situações de transferência ocorrendo com duas fases. No primeiro desses casos, o fluido A está sendo evaporado ao receber o calor do fluido B. Já no segundo, o fluido A está sendo condensado ao ceder calor para o fluido B. A troca de calor com duas fases pode ocorrer também em ambos os lados, por exemplo, em um lado o fluido sendo condensado e do outro lado um fluido sofrendo evaporação. A natureza desses mecanismos influencia no desempenho do equipamento já que, como se sabe, a condutividade térmica dos fluidos é alterada em fases distintas.

Figura 1 – Mecanismos de Transferência.



Fonte: Adaptado de Kakaç (2012).

Posto isto, deve-se observar que o sentido do escoamento também corresponde a um importante parâmetro em trocadores. Há três arranjos de fluxo possíveis: paralelo, no qual os fluidos entram no trocador pelo mesmo lado e fluem na mesma direção; contracorrente, em que os fluidos escoam em direções opostas; e fluxo cruzado, no qual a direção com que um fluido escoa pela superfície do trocador forma um ângulo reto com a direção do outro fluido. Essa última configuração pode ocorrer com ambos os fluidos não misturados ou com um fluido misturado e o outro não.

## 2.2 TROCADOR DE CALOR PSHE

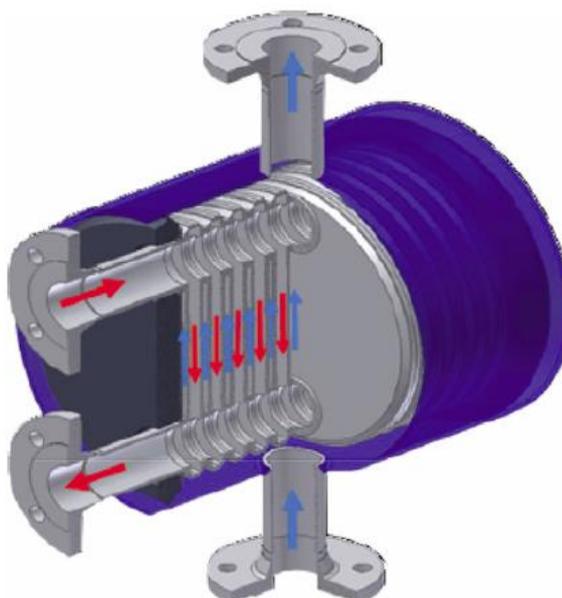
Diferentes tipos de trocadores de calor são, geralmente, descritos em função de suas geometrias construtivas. Dentre estas, os tipos tubular, placa e superfície estendida são os mais notáveis (KAKAÇ, 2012). Ainda, agrupados por esses *designs* estão:

- i. Trocadores de Calor Tubulares
  - a. Trocadores Tipo Duplo Tubo
  - b. Trocadores Tipo Casco e Tubos
  - c. Trocadores Tubo-espiral
- ii. Trocadores de Calor a Placas
  - a. Trocador de Placas Planas
  - b. Trocador de Placas em Espiral
  - c. Trocador de Placas em Lamelas

A configuração multitubular é a mais comumente empregada em indústrias de diversos setores. Um dos principais motivos para este fato é a flexibilidade deste tipo de *design* e facilidade de fabricação. Trocadores de placas são menos utilizados em indústrias de processos químicos, porém muito difundidos para o resfriamento de circuito de água em plataformas *offshore*.

O trocador de calor *Plate & Shell Heat Exchanger* apresenta, em seu núcleo, uma construção em placas onduladas de forma arredondada que estão alojadas em um vaso de pressão, como pode ser observado na Figura 2. Este trocador representa a combinação das melhores qualidades dos trocadores de placa plana e trocadores tipo casco e tubos. O primeiro possui alta taxa de transferência de calor, é compacto e gera pouca incrustação, entretanto é composto por muitas juntas de vedação e apresenta limitações de pressão e temperatura. O segundo opera a altas pressões e temperaturas, não possui juntas e tem pequenas quedas de pressão, porém, as taxas de transferência de calor são inferiores, o equipamento é pesado e demanda espaço, além de produzir muita incrustação.

Figura 2 – Esquema estrutural de um PSHE.

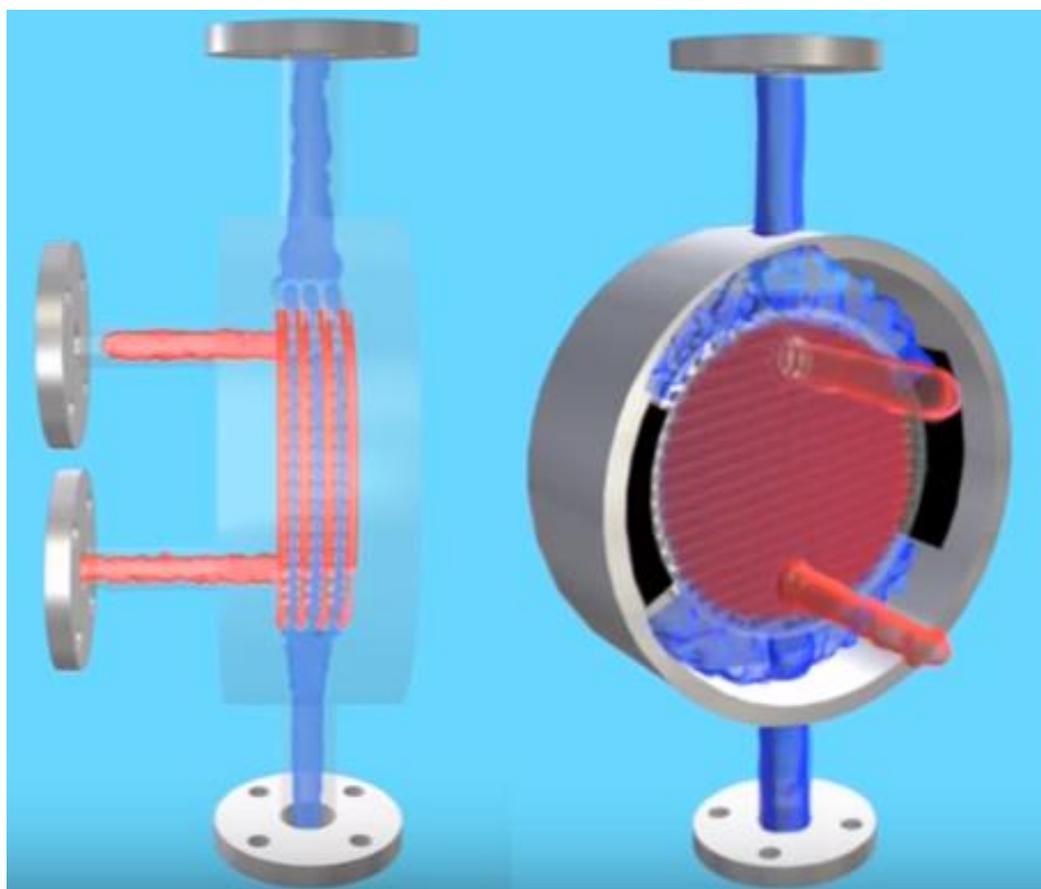


Fonte: Freire (2014).

Em síntese, os trocadores de calor PSHE apresentam um largo intervalo de operação; altas pressões de projeto; larga área de transferência de calor; e podem ser empregados em combinações líquido/líquido, líquido/gás e gás/gás.

As placas onduladas, produzidas em diversos materiais e diâmetros, são agrupadas por soldas e dispostas no casco, por onde irá passar um fluxo que correrá pela superfície externa das chapas. Enquanto isso um outro fluido irá correr entre as placas. Dessa forma, os fluidos não se misturam e aproveitam toda a área superficial das chapas para a troca de calor. Uma representação esquemática pode ser observada na Figura 3.

Figura 3 – Escoamento entre placa e casco.



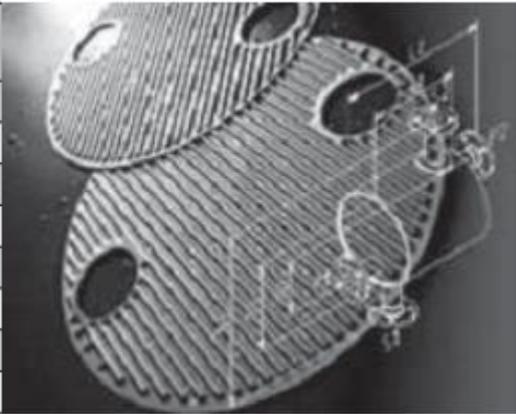
Fonte: Adaptado de Vahterus (2014).

A Figura 4 foi retirada do catálogo de um fabricante deste tipo de equipamento. Nela, são apresentados os principais materiais utilizados para fabricar as placas corrugadas do trocador. Essas placas são fabricadas de finas chapas metálicas, nas quais são impressas as ondulações desejadas. Também é possível observar, nesta

figura, um exemplo do padrão de ondulações impresso nas chapas. Mais adiante, no presente trabalho, direciona-se o foco da pesquisa a placas fabricadas com os materiais: AISI 316L e Titânio (mais especificamente, titânio grau 1). Com isto em vista, faz-se uma revisão teórica sobre estes materiais, retomando conceitos essenciais para a compreensão dos artigos levantados pela metodologia empregada.

Figura 4 – Materiais Empregados na Fabricação das Placas.

Plates
AISI 316L
AISI 904L
254 SMO
Hastelloy
Duplex
Titânio
Nickel
Other on request



Fonte: Adaptado de Spirax-Sarco (2017).

## 2.3 MATERIAIS

Os permutadores de calor em questão são muito versáteis quanto ao tipo de material empregado em sua fabricação. O casco e as placas do trocador podem ser fabricados em materiais distintos, com o intuito de obter-se um equipamento mais eficiente e robusto.

Conforme fabricante, os materiais mais comumente empregados na fabricação de trocadores PSHE são: AISI 316L, AISI 904L, 254 SMO, Hastelloy, Duplex, Titânio e Níquel. Dentre os metais e ligas citados, o Titânio e os Aços Inoxidáveis serão tomados como objetos de estudo neste trabalho e por isso suas propriedades estão descritas nos tópicos subsequentes.

### 2.3.1 Titânio Grau 1

O elemento titânio possui número atômico 22, peso atômico 47,9, com uma densidade específica aproximadamente 60 por cento menor do que a do ferro. O

minério rutilio ( $\text{TiO}_2$ ), também conhecido como dióxido de titânio puro, é refinado para a obtenção do titânio comercialmente puro (Ti CP). Este apresenta teores de pureza na faixa de 98% à 99,5%. Sabe-se que as propriedades físicas dos materiais irão variar conforme a quantidade de impurezas neles presentes. Assim, o grau de impurezas determina a classificação dos quatro tipos de titânio denominados comercialmente puros.

O Grau 1 de titânio é o primeiro das quatro classes de titânio comercialmente puro. Os graus de 1 à 4 são não-ligados e considerados comercialmente puros, ou CP. Geralmente, a elasticidade e a resistência à tração aumentam com o número de grau para estas classes puras. A diferença em suas propriedades físicas é principalmente devido à quantidade de elementos intersticiais. Titânio CP é usado para aplicações de resistência à corrosão, em que o custo, a facilidade de fabricação e a soldagem são importantes.

Esse é o mais macio e mais dúctil destes graus. Além disso, o titânio grau 1 é altamente conformável, apresenta excelente resistência à corrosão e alta resistência ao impacto. Grau 1 é uma boa solução para moldagem a frio e em ambientes corrosivos. A ASTM B86-10 (*Standard Specification for Titanium and Titanium Alloy Seamless Pipe*) fornece os padrões para chapas e placas de titânio comercialmente puro. O Quadro 1, a seguir, pode ser utilizado como referência para a diferenciação dos 4 graus de titânio CP.

Quadro 1 – Níveis de Impureza para Titânio CP.

Elemento	Grau 1	Grau 2	Grau 3	Grau 4
Nitrogênio, % max.	0,03	0,03	0,05	0,05
Carbono, % max.	0,08	0,08	0,08	0,08
Hydrogênio, % max.	0,015	0,015	0,015	0,015
Ferro, % max.	0,2	0,3	0,3	0,5
Oxigênio, % max.	0,18	0,25	0,35	0,4

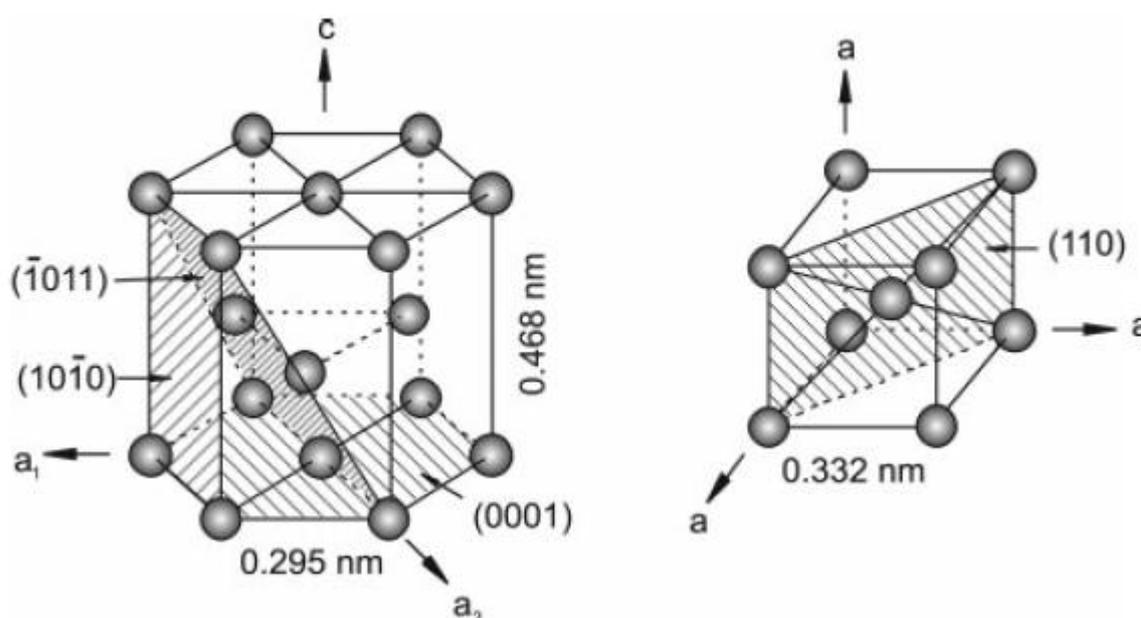
Fonte: Adaptado de Fort Wayne Metals (2016).

Assim como vários outros metais (por exemplo, Ca, Fe, Co, Zr, Sn, Ce e Hf), o titânio pode cristalizar em várias estruturas cristalinas. Contudo, cada modificação é apenas estável dentro de intervalos de temperatura particulares. A transformação

completa de uma estrutura cristalina para outra é chamada de transformação alotrópica; a respectiva temperatura de transformação é chamada de temperatura de transição.

Para valores de temperatura abaixo de  $882,5^{\circ}\text{C}$ , o titânio e suas ligas estão na fase alfa ( $\alpha$ ) e apresentam estrutura cristalina hexagonal compacta. Entretanto, para valores de temperatura superiores a  $882,5^{\circ}\text{C}$ , o titânio e suas ligas estão em fase beta ( $\beta$ ) e apresentam uma estrutura cúbica de corpo centrado. Há também ligas que apresentam as duas fases à temperatura ambiente. Essas estruturas podem ser visualizadas na Figura 5, com seus planos mais densamente empacotados e direções destacadas.

Figura 5 – Estruturas cristalinas para fase alfa e beta do titânio, respectivamente.



Fonte: Leyens (2003, p. 4).

A existência das duas estruturas cristalinas diferentes e temperatura de transformação alotrópica correspondente é de importância central, uma vez que são a base para a grande variedade de propriedades alcançadas pelas ligas de titânio. Além disso, tanto a deformação plástica quanto a taxa de difusão estão intimamente relacionadas à estrutura cristalina do material. No caso do Ti, a rede cristalina hexagonal causa a anisotropia do comportamento mecânico para o titânio. As propriedades mecânicas do titânio grau 1 são apresentadas no Quadro 2.

Quadro 2 – Propriedades Mecânicas do Titânio Grau 1.

Dureza, Brinell	120
Dureza, Knoop	132
Dureza, Vickers	122
Limite de Resistência a Tração	240 MPa
Limite de Escoamento	170 - 310 MPa
Deformação	24%
Módulo de Elasticidade	105 GPa
Módulo de Cisalhamento	45 GPa
Coefficiente de Poisson	0.37
Impacto Charpy	310 J

Fonte: Adaptado de ASM (2016).

### 2.3.2 Aço Inoxidável 316L

Os aços inoxidáveis são ligas formadas, basicamente, por ferro e cromo; além de níquel, molibdênio e outros elementos. Para ser classificado como aço inoxidável, a liga deve conter no mínimo 12% de cromo. Esse elemento é responsável pela formação de uma camada superficial protetora uniforme de óxido de cromo, quando a superfície da peça é exposta ao oxigênio.

É possível agrupar os diversos tipos de aço inoxidáveis conforme sua estrutura cristalina e o mecanismo de endurecimento empregado. Algumas dessas ligas são apresentadas no Quadro 3. O aço inoxidável ASME 316L é um aço austenítico de estrutura CFC.

Uma observação deve ser feita quanto à presença de níquel na composição química desses aços. Deve-se notar que o níquel é um elemento estabilizador da fase austenítica. Esse elemento atua aumentando o campo de austenita e, desta forma, praticamente elimina a ferrita de ligas ferro-cromo-carbono. Isto quer dizer que, se o teor de carbono estiver abaixo de 0,03%, os carbonetos não se formam e o aço é constituído de austenita à temperatura ambiente (ASKELAND & PHULÉ, 2008, p. 405).

Quadro 3 – Características dos tipos de aço inoxidável.

Liga	%C	%Cr	%Ni	Outros	Mecanismo de Endurecimento	Limite de Resistência [MPa]	Limite de Escoamento [MPa]	Deformação [%]
<b>Austeníticos</b>								
201	0,15	17	5	6,5% Mn	Recozido	655	310	40
304	0,08	19	10	-	Recozido	517	207	30
304	0,08	19	10	-	Encruado	1.276	965	9
316	0,08	17	12	2,5% Mo	Recozido	517	207	30
321	0,08	18	10	0,4% Ti	Recozido	586	241	55
<b>Ferríticos</b>								
430	0,12	17	-	-	Recozido	448	207	22
442	0,12	20	-	-	Recozido	517	276	20
<b>Martensíticos</b>								
416	0,15	13	-	0,6% Mo	Temperado e Revenido	1.241	965	18
431	0,20	16	2		Temperado e Revenido	1.380	1.034	16
440C	1,10	17	-	0,7% Mo	Temperado e Revenido	1.965	1.896	2

Fonte: Adaptado de Askeland & Phulé (2008, p. 404).

Aços inoxidáveis austeníticos possuem excelente ductilidade, conformabilidade e resistência à corrosão. A resistência do material é obtida pelo endurecimento por solução sólida, podendo, ainda, ser trabalhado a frio para aumentar a resistência mecânica. Vale comentar que o efeito do processo de encruamento nesses aços é mais intenso do que nos aços inoxidáveis ferríticos.

Quanto às principais características desse tipo de aço inox, em geral, pode-se dizer que possuem alta tenacidade à fratura em baixas temperaturas, já que não apresentam temperatura de transição dúctil-frágil; e que não são ferromagnéticos, o que é vantajoso para muitas aplicações, em especial na área da saúde (ASKELAND & PHULÉ, 2008).

O Quadro 4 apresenta a composição química dos aços 316 e 316L. Observa-se que a única alteração entre esses aços é a porcentagem máxima de carbono. Espera-se que essa diferença na composição química resulte em um material com limite de escoamento inferior, o que se confirma no Quadro 5. Isto é, o aço 316 é um material com módulo de tenacidade superior e, em geral, mais resistente ao surgimento de trincas.

Quadro 4 – Composição Química dos Aços 316 e 316L.

Tipo	C <sub>max</sub>	Mn <sub>max</sub>	Si <sub>max</sub>	P <sub>max</sub>	S <sub>max</sub>	Cr	Ni	Mo	N <sub>2,max</sub>
316	0,08	2,00	1,00	0,045	0,030	16,00 a 18,00	10,00 a 14,00	2,00 a 3,00	0,10
316L	0,03	2,00	1,00	0,045	0,030	16,00 a 18,00	10,00 a 14,00	2,00 a 3,00	0,10

Fonte: Adaptado de Kloeckner Metals (2017).

Quadro 5 – Propriedades Mecânicas dos Aços 316 e 316L.

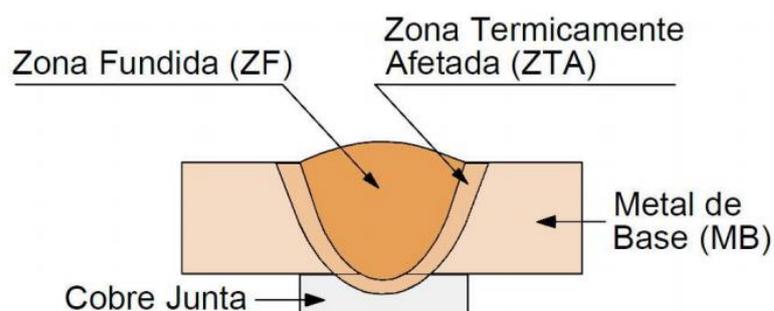
Tipo	Limite de Resistência à Tração [MPa]	Limite de Escoamento [MPa]	Alongamento [%]	Dureza [HRB]
316	588	294	50	79
316L	567	294	50	79

Fonte: Adaptado de Kloeckner Metals (2017).

## 2.4 PROCESSOS DE SOLDAGEM

A soldagem é um processo metalúrgico de união que consiste na fusão dos metais com ou sem a presença de metal de preenchimento para formação da junta, a configuração da junta é dada pela Figura 6. Como pode-se observar, a superfície gerada por esse processo de união é constituída por três zonas: cordão de solda, zona termicamente afetada (ZTA) e metal de base. Sabe-se que a qualidade da junta obtida é um fator importante na determinação da resistência do metal soldado.

Figura 6 – Seção transversal esquemática de junta de topo por fusão.

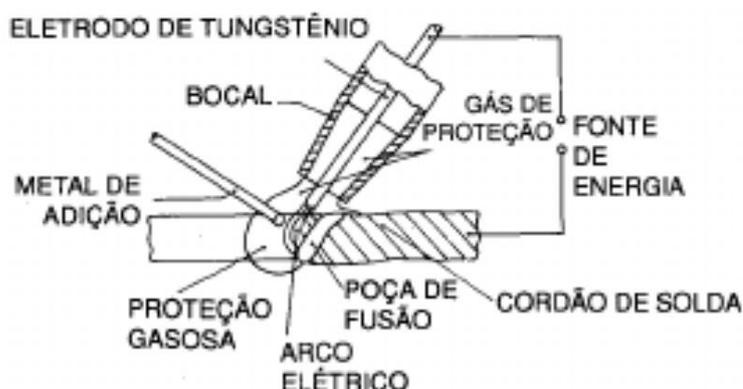


Fonte: Marques (2005, p. 33)

Para realizar a soldagem do titânio, pode-se utilizar os processos: MIG (*metal inert gas*), TIG, plasma, feixe de elétrons, laser e a brasagem com radiação infravermelha. Como mencionado anteriormente, o titânio é um material de alta reatividade, ou seja, cuidados devem ser tomados para que o mesmo não reaja com elementos atmosféricos durante o processo de soldagem. Levando isto em consideração, os processos TIG (*Tungsten Inert Gas*) e laser, ambos sob atmosfera de gás protetor, são mais indicados na soldagem do titânio (PIVETA, 2013).

O processo TIG utiliza como fonte de calor um arco elétrico mantido entre um eletrodo não consumível de tungstênio e o metal de base. A proteção da região de soldagem é realizada através de um fluxo de gás inerte. Esse processo de soldagem pode ser realizado de forma manual ou automática, com ou sem metal de adição. A Figura 7 apresenta um esquema do processo.

Figura 7 – Processo de soldagem TIG.



Fonte: Brandi, et al (1992).

O processo de soldagem pela utilização de energia do laser como fonte de calor (Nd:YAG) é muito empregado para a união do titânio e suas ligas. Conforme Piveta (2013), o laser é uma energia eletromagnética que consiste de uma corrente monocromática e colimada. Diferentemente de outros processos de soldagem, devido à alta taxa de energia, durante a soldagem a laser não ocorre contato com a área a ser soldada. Fato este que minimiza alterações dimensionais da junta e dispensa a necessidade de metais de adição. Outra vantagem que este processo de união apresenta é que não necessita de vácuo, não é influenciado por campos magnéticos e não produz raios X. A principal desvantagem na aplicação deste método é o custo do equipamento.

Todos os processos de soldagem a arco são aplicáveis a juntas de aço inoxidável. Conforme Singh (2012), plasma e arco submerso, também, são possíveis métodos de união.

Um aço inoxidável austenítico, como é o caso do ASME 316L, tem alto coeficiente de expansão térmica e baixa condutividade térmica. Por esses motivos, quando sujeito a processos de soldagem, é especialmente suscetível a distorções durante o processo (SINGH, 2012, p. 196).

Neste ponto, cabe observar que soldas de estrutura 100% austenítica são mais suscetíveis a trincas, e um percentual de fase ferrítica é essencial para controlar essa suscetibilidade. Além disso, em soldas de material inoxidável austenítico, geralmente, pequenas poças de ferrita delta são formadas (SINGH, 2012, p. 197).

### 3 METODOLOGIA

Os critérios para categorizar um tipo de pesquisa variam de acordo com o enfoque dado pelo autor. Ander-Egg, por exemplo, divide o campo em: pesquisa básica pura, ou fundamental, e pesquisa aplicada. Esta segunda caracteriza-se por seu interesse prático, ou seja, preocupa-se com que os resultados sejam aplicados ou utilizados na solução de problemas que ocorrem na realidade. Outro autor, Rummel, define pesquisa bibliográfica, simplesmente, como uma pesquisa que se utiliza de material escrito (MARCONI & LAKATOS, 2013, p. 6-7).

A pesquisa bibliográfica, ou de fontes secundárias, abrange toda bibliografia já tornada pública em relação ao tema de estudo, desde publicações avulsas, boletins, jornais, revistas, livros, pesquisas, monografias, teses, material cartográfico etc., até muitos meios de comunicação orais: rádio, gravações em fita magnética e audiovisuais: filmes e televisão (MARCONI & LAKATOS, 2013, p. 57).

Desta forma, o pesquisador, com essa modalidade de pesquisa, é posto em contato direto com o que foi escrito, dito ou filmado sobre determinado assunto.

A pesquisa bibliográfica, para Marconi e Lakatos (2013, p. 57), não consiste de mera repetição do que já foi dito ou escrito sobre certo assunto, mas propicia o exame de um tema sob novo enfoque ou abordagem.

Conforme Marconi e Lakatos (2013, p. 48), o levantamento de dados é o primeiro passo de qualquer pesquisa científica, assim, com vistas à descrição de conceitos e técnicas de análise aplicados ao trocador PSHE, promoveu-se um levantamento de publicações em torno do tema trocador de calor (*heat exchanger*). Dito isto, a metodologia empregada consiste em agrupar palavras-chave de domínio mais amplo com palavras que descrevam os interesses específicos da pesquisa, ou seja, parte-se de um contexto mais geral para um mais particular. Outro ponto considerado para realizar esse agrupamento é não fazer uso de muitos vocábulos, ou vocábulos demasiadamente restritivos, para que não se percam resultados importantes.

Isto posto, pode-se delimitar três contextos em que se encaixariam as palavras-chave. O primeiro deve definir o equipamento. Em seguida, indica-se o que se pretende estudar quanto ao equipamento; e, por último, aponta-se uma característica ou especificidade do contexto de estudo.

As palavras-chave combinadas estão listadas no Quadro 6. Neste ponto do trabalho, vale ressaltar que as buscas realizadas na plataforma Scopus consideraram títulos, resumos e palavras-chave dos artigos. Já as realizadas no banco de dados Science Direct contemplam todos os campos disponíveis no site. Evidentemente, os resultados obtidos - dados brutos - foram filtrados posteriormente. Dentre os critérios utilizados para realizar esse filtro, pode-se citar o seguinte: a preferência dada a artigos com menos de 10 anos, ou seja, publicados a partir de 2006; a exclusão de revisões de conferências, notas em revistas e artigos não revisados por pares; e, quando conveniente, restringiu-se a busca a periódicos da área de materiais.

Quadro 6 – Resultados da Pesquisa 1, dados brutos.

Palavras-chave		Plataformas		
		Scopus	Science Direct	Scielo
1	Heat Exchanger AND PSHE	17	14	0
2	Heat Exchanger AND Mechanical Behavior	94	333	1
3	Heat Exchanger AND Mechanical Behavior AND Titanium	1	70	0
4	Heat Exchanger AND Mechanical Behavior AND Titanium Grade 1	0	0	0
5	Heat Exchanger AND Mechanical Behavior AND Stainless Steel	0	120	0
6	Heat Exchanger AND Mechanical Behavior AND Stainless Steel 316L	0	4	0
7	Heat Exchanger AND Material Analysis	47	51	2
8	Heat Exchanger AND Material Analysis AND Titanium	1	15	2
9	Heat Exchanger AND Material Analysis AND Titanium Grade 1	0	0	0
10	Heat Exchanger AND Material Analysis AND Stainless Steel	0	19	0
11	Heat Exchanger AND Material Analysis AND Stainless Steel 316L	0	1	0
<b>Totais</b>		<b>160</b>	<b>627</b>	<b>5</b>

Fonte: Autor (2017).

O mesmo procedimento foi aplicado à plataforma Scielo, entretanto não foram obtidos bons resultados com os conjuntos de palavras-chave estabelecidos. Optou-se, então, por realizar uma pesquisa mais geral somente com a palavra-chave: “Heat Exchanger”. Foram encontrados 102 resultados, destes nenhum foi selecionado por não se enquadrar no foco da pesquisa.

Quanto aos resultados encontrados no Quadro 7, é importante entender que o número de artigos selecionados pode apresentar artigos ou dissertações repetidas de uma plataforma para outra. Ainda, ao se deparar com o símbolo “-”, o leitor deste relatório deve entender que não houve artigos selecionados através daquele agrupamento de palavras-chave, pois a pesquisa ficou muito ampla e não foi possível limitar suficientemente o número de artigos a serem avaliados.

Quadro 7 – Resultado da Pesquisa 1, dados selecionados.

Palavras-chave		Plataformas		
		Scopus	Science Direct	SciELO
1	Heat Exchanger AND PSHE	3	3	0
2	Heat Exchanger AND Mechanical Behavior	1	-	0
3	Heat Exchanger AND Mechanical Behavior AND Titanium	0	0	0
4	Heat Exchanger AND Mechanical Behavior AND Titanium Grade 1	0	0	0
5	Heat Exchanger AND Mechanical Behavior AND Stainless Steel	0	1	0
6	Heat Exchanger AND Mechanical Behavior AND Stainless Steel 316L	0	0	0
7	Heat Exchanger AND Material Analysis	4	1	0
8	Heat Exchanger AND Material Analysis AND Titanium	0	0	0
9	Heat Exchanger AND Material Analysis AND Titanium Grade 1	0	0	0
10	Heat Exchanger AND Material Analysis AND Stainless Steel	0	1	0
11	Heat Exchanger AND Material Analysis AND Stainless Steel 316L	0	1	0
<b>Totais</b>		<b>8</b>	<b>7</b>	<b>0</b>

Fonte: Autor (2017).

Nota-se que as combinações mais específicas de palavras-chave não produziram resultados nas plataformas, o que demonstra a importância e originalidade do trabalho que será realizado.

Uma das pretensões desse levantamento é obter informações quanto à região de solda entre as placas do trocador de calor PSHE, sendo assim, uma nova pesquisa foi realizada com esse enfoque. Observa-se, no Quadro 8 e Quadro 9, que muitos trabalhos foram realizados com ênfase na avaliação de soldas em trocadores de calor, o que dificultou a filtragem dos dados brutos para encontrar artigos relevantes a essa pesquisa.

Quadro 8 – Resultados da Pesquisa 2, dados brutos.

Palavras-chave		Plataformas		
		Scopus	Science Direct	SciELO
12	Heat Exchanger AND Weld*	1391	6968	1
13	Heat Exchanger AND Plate Weld*	22	4593	0
14	Heat Exchanger AND Plate Weld* AND Laser	1	885	0
15	Heat Exchanger AND Plate Weld* AND Plasma	1	1413	0
<b>Totais</b>		<b>1415</b>	<b>13859</b>	<b>1</b>

Fonte: Autor (2017).

Quadro 9 – Resultado da Pesquisa 2, dados selecionados.

Palavras-chave		Plataformas		
		Scopus	Science Direct	Scielo
12	Heat Exchanger AND Weld*	-	-	0
13	Heat Exchanger AND Plate Weld*	1	-	0
14	Heat Exchanger AND Plate Weld* AND Laser	-	3	0
15	Heat Exchanger AND Plate Weld* AND Plasma	0	0	0
<b>Totais</b>		<b>1</b>	<b>3</b>	<b>0</b>

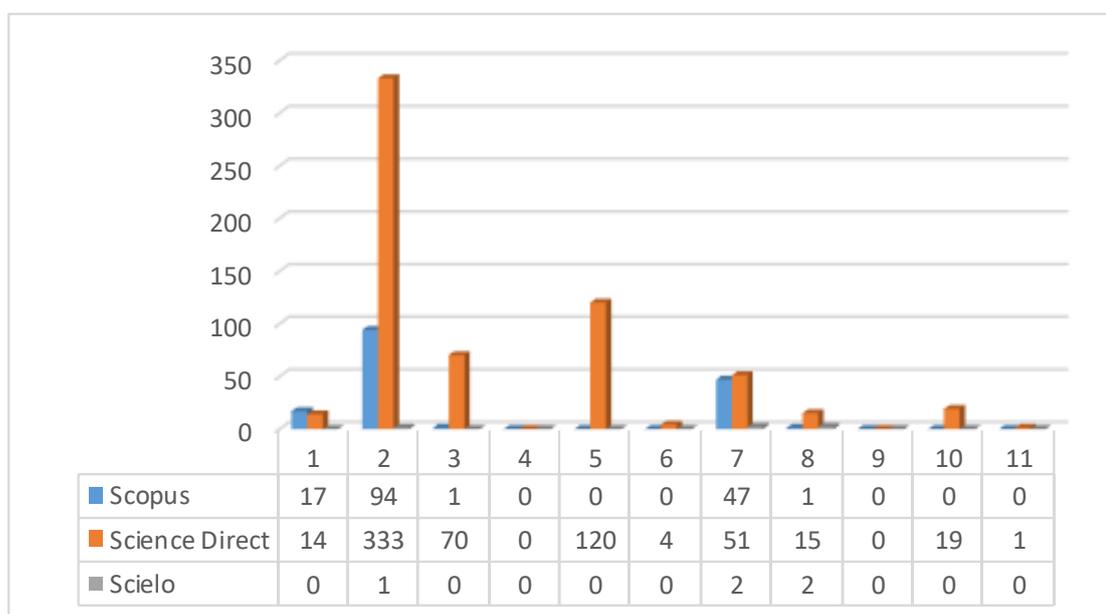
Fonte: Autor (2017).

Por fim, o resultado da pesquisa apontou 16 artigos e um livro. Dentre estes, dois artigos foram repetidos entre as plataformas Scopus e Science Direct - um no conjunto 1 e outro no 7, conforme Quadro 6.

Uma observação deve ser feita quanto à ausência de dissertações e teses referentes à área pesquisada, no resultado final. Estas não foram excluídas da pesquisa durante a seleção de dados. As plataformas utilizadas não indicaram esses grupos de resultados. Caso haja necessidade de se incluir esse tipo de trabalho no levantamento bibliográfico, uma plataforma mais abrangente como o Google Acadêmico pode ser utilizada.

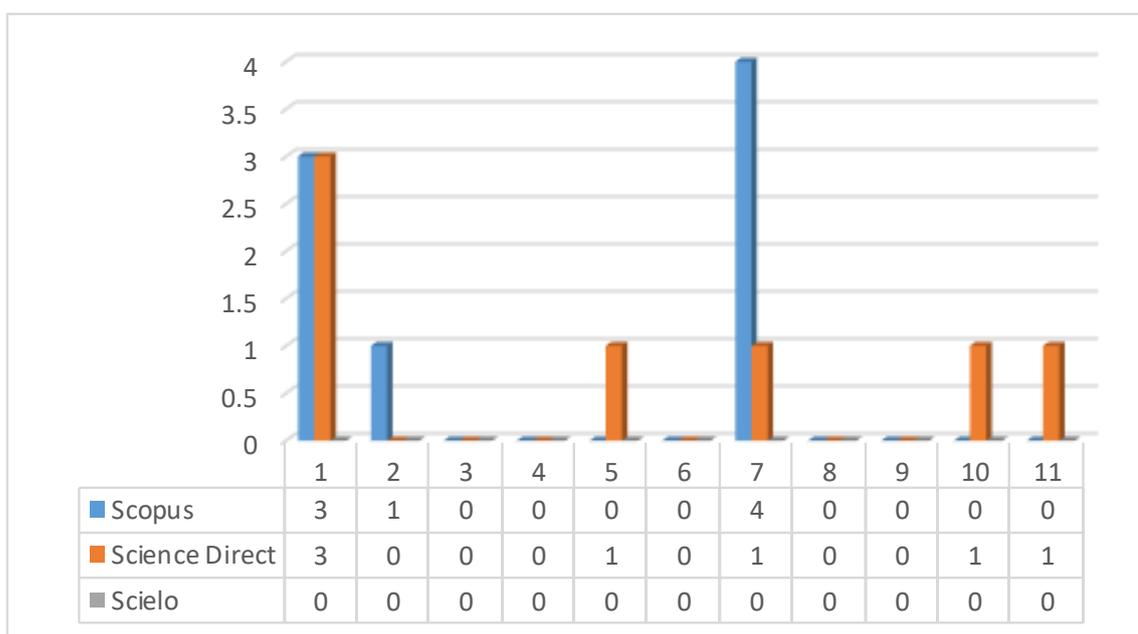
A seguir, os resultados são apresentados de forma gráfica, conforme Figura 8, Figura 9, Figura 10 e Figura 11.

Figura 8 – Resultados da Pesquisa 1, dados brutos.



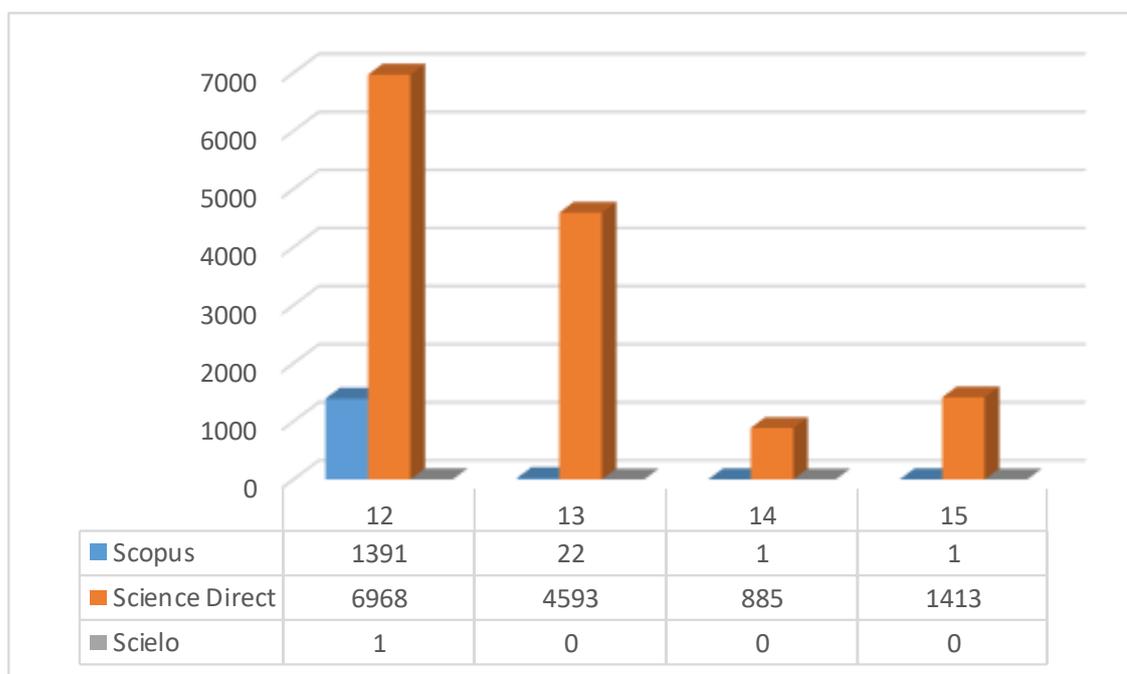
Fonte: Autor (2017).

Figura 9 – Resultados da Pesquisa 1, dados selecionados.



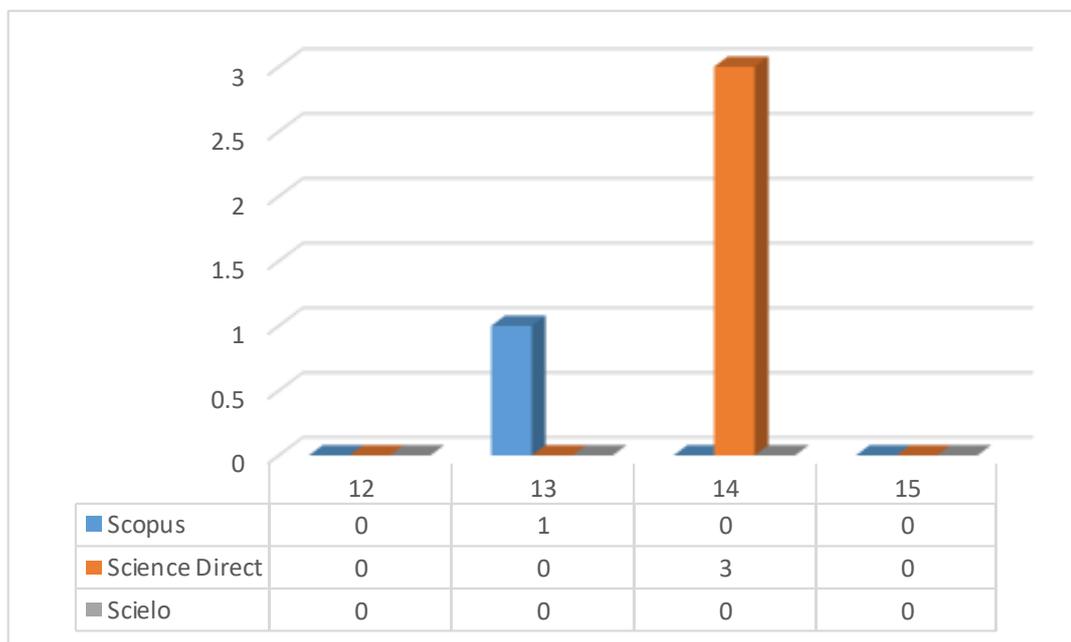
Fonte: Autor (2017).

Figura 10 – Resultados da Pesquisa 2, dados brutos.



Fonte: Autor (2017).

Figura 11 – Resultados da Pesquisa 2, dados selecionados.



Fonte: Autor (2017).

Constata-se, com os dados apresentados na Metodologia, que o campo de pesquisa é relativamente novo e pouco explorado. O que justifica direcionar estes estudos de casos não somente a trocadores de calor do tipo casco-placas, mas também a outros tipos de trocador; realçando exatamente o que é comum a todos eles, no que diz respeito particularmente ao seu emprego, manutenção e análise de falhas.

A partir de então, conceitos e técnicas aplicados aos outros tipos de trocadores de calor, nos estudos de casos, serão apreciados e, quando possível, adaptados ao permutador PSHE.

No decorrer deste trabalho, apresentam-se as técnicas de análise utilizadas pelos pesquisadores estudados, dando-se destaque aos resultados por eles obtidos. Neste momento do trabalho, é possível identificar artigos que se ocupam especificamente da teoria de trocadores de placa e, ao final, destacam-se as principais contribuições observadas.

## 4 ANÁLISE DE RESULTADOS

A seguir, dividem-se os principais resultados do levantamento teórico, conforme os modos de falha de trocadores de calor observados nos artigos. Deve-se ter em mente que, em muitos casos, as falhas da estrutura dos trocadores decorrem da combinação de efeitos de processos distintos. Ou seja, em certos casos, não há como avaliar somente um modo de falha.

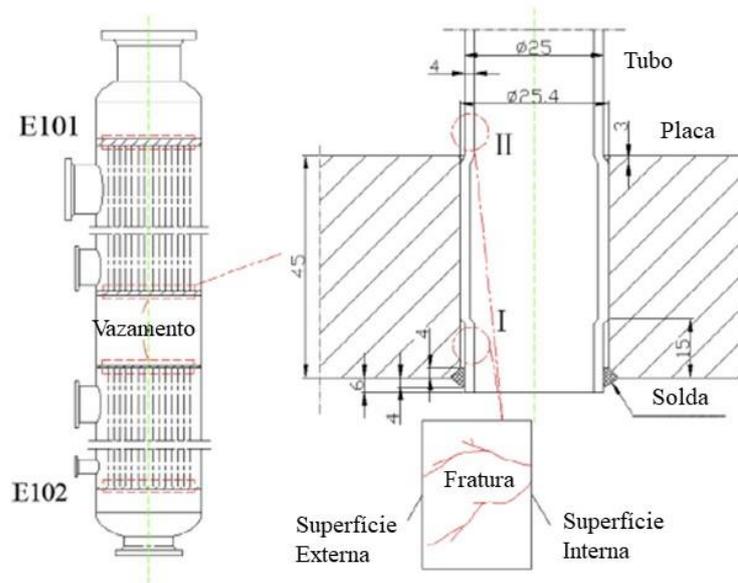
### 4.1 MODOS DE FALHA LIGADOS A PROCESSOS CORROSIVOS

O trabalho realizado por Xu (2015) trata de um trocador de calor do tipo tubular. Este tipo consiste de um casco, normalmente um vaso de pressão, com vários tubos em seu interior. Por meio de uma investigação das condições de operação; análise da composição química do material e produtos corrosivos; e testes metalográficos de corpos de prova com a presença Xude trincas, o autor conclui que as falhas encontradas são resultantes de fragilização por corrosão sob tensão, modo de falha também conhecido pela sigla inglesa SCC, ou *Stress Corrosion Cracking*. O material estudado corresponde a um aço inoxidável austenítico. Neste caso, SCC pode ocorrer quando este material é, simultaneamente, submetido a uma tensão e um fluido corrosivo.

Dois tubos com a presença de falha foram avaliados, um constituído pelo aço TP304H e o outro pelo aço TP304 (conforme notação ASME). Para avaliar a microestrutura, testes de metalografia ótica foram realizados. Como esperado, ambos apresentaram uma metalografia similar. A microestrutura corresponde a grãos austeníticos e algumas inclusões não metálicas. Através deste teste, o autor pôde concluir que as fraturas não se originaram devido à deterioração do material, já que não havia mudanças na estrutura metalográfica original.

As fraturas podem ser observadas nas zonas I e II da Figura 12. As superfícies internas dos tubos apresentavam corrosão e as fraturas se originaram desta superfície interna e se propagaram para a superfície externa dos tubos.

Figura 12 – Localização das trincas.



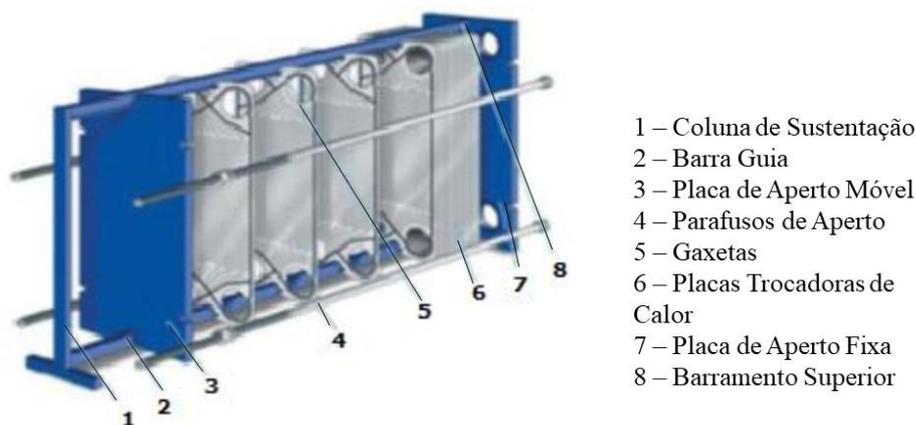
Fonte: Adaptado de Xu (2015).

A composição química dos produtos corrosivos foi examinada por meio de Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV), Espectroscopia por Dispersão de Energia (ou *Energy Dispersive Spectrometer*, EDS) e Difração de Raios X (DRX). Por meio destas análises, Xu (2015) concluiu que o vapor que passava pelos tubos foi contaminado por cloro. E a razão básica para a falha é SCC de aço inoxidável austenítico em vapor a altas temperaturas com cloro.

Para aplicações de trocadores em sistemas contendo líquidos na faixa de temperatura entre 0 e 90°C, o crescimento microbiológico não é incomum. Huttunen-Saarivirta (2012) trata do processo corrosivo influenciado pela presença de microorganismos. Uma forma de corrosão pode ser iniciada ou propagada, por exemplo, por bactérias, algas e fungos. O autor trata de um trocador de calor de aço inoxidável AISI 304, com falhas registradas após 3 anos de operação. Considerações são feitas quanto à presença das microestruturas austenítica e ferrítica neste aço e quanto ao ataque preferencial sofrido pela fase ferrítica. As análises microestruturais foram realizadas por microscopia óptica e de varredura, EDS, microscopia de transmissão de elétrons (*transmission electron microscopy*, TEM), e DRX.

Em outro artigo, Panahi (2017) investiga a falha em um trocador de calor de placas gaxetadas, conforme Figura 13. O material das placas é o aço inoxidável 304. Este trocador opera em uma planta de tratamento de gás natural.

Figura 13 – Esquema de um Trocador de Placas Gaxetadas.



Fonte: Adaptado de Panahi (2017).

O gás natural é composto por uma mistura de hidrocarbonetos e uma certa quantidade de impurezas - CO<sub>2</sub>, O<sub>2</sub>, N, H<sub>2</sub>S e He são as mais comuns, conforme Lopes (2003). Essas impurezas podem originar vários problemas operacionais na planta, como corrosão em dutos, e por isso devem ser removidas. Dentre as diversas formas empregadas na retirada desses contaminantes, utilizam-se sistemas micro emulsionados com o uso de aminas.

Entendido o meio de operação, deve-se ter em mente que este trocador apresentou falhas nas regiões de juntas (gaxetas). Entretanto, diferentemente dos demais trocadores estudados neste trabalho de revisão, as juntas deste trocador são feitas de material elastômero. Fato que não invalida as conclusões para prevenção de falha obtidas pelo autor, já que essas condições de operação e processo corrosivo inerente ocorrem também em um trocador de placas unidas por solda.

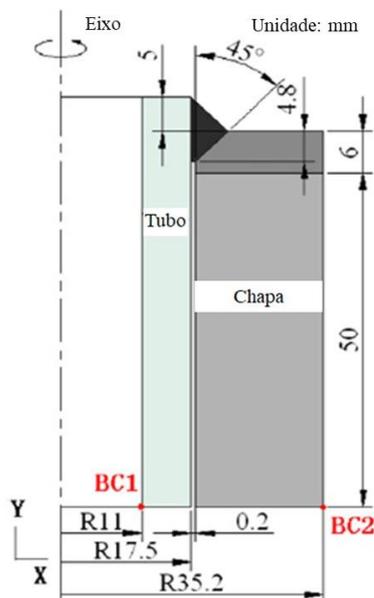
Panahi (2017) conclui que o principal motivo para a falha observada foi uma corrosão intergranular acompanhada de altos níveis de tensões na região de junta, o que originou as trincas nesta região do trocador de calor. Para prevenir essas causas, é possível: tratar as impurezas de outra forma, reduzindo a corrosividade do ambiente de operação; utilizar um aço inoxidável mais recessivo, como é o caso do aço 316L (foco de estudo); e controlar fontes externas de estresse, que, no caso de permutadores de placas gaxetadas, pode ser decorrente do ajuste dos parafusos de aperto. Já em trocadores de placas soldadas, esse estresse pode advir, em geral, de

tensões residuais na região de solda, assim como de outras formas de concentração de tensões, problemáticas discutidas no tópico a seguir.

#### 4.2 MODOS DE FALHA LIGADOS À CONCENTRAÇÃO DE TENSÕES

Xu (2012) realizou investigações numéricas quanto a tensões residuais na região de solda de um trocador casco e tubos. Um problema comum neste tipo de permutador de calor é a evolução de trincas na região de solda do tubo com suas placas – a Figura 14 exemplifica o objeto da discussão. O modelo de elementos finitos axi-simétrico foi utilizado para investigar a região. O estresse residual é calculado utilizando como dado de entrada uma distribuição de temperatura, a qual é obtida por meio de uma análise térmica realizada com o auxílio do software ABAQUS.

Figura 14 – Modelo geométrico da região de solda entre tubo e placa do tubo.



Fonte: Adaptado de Xu (2012).

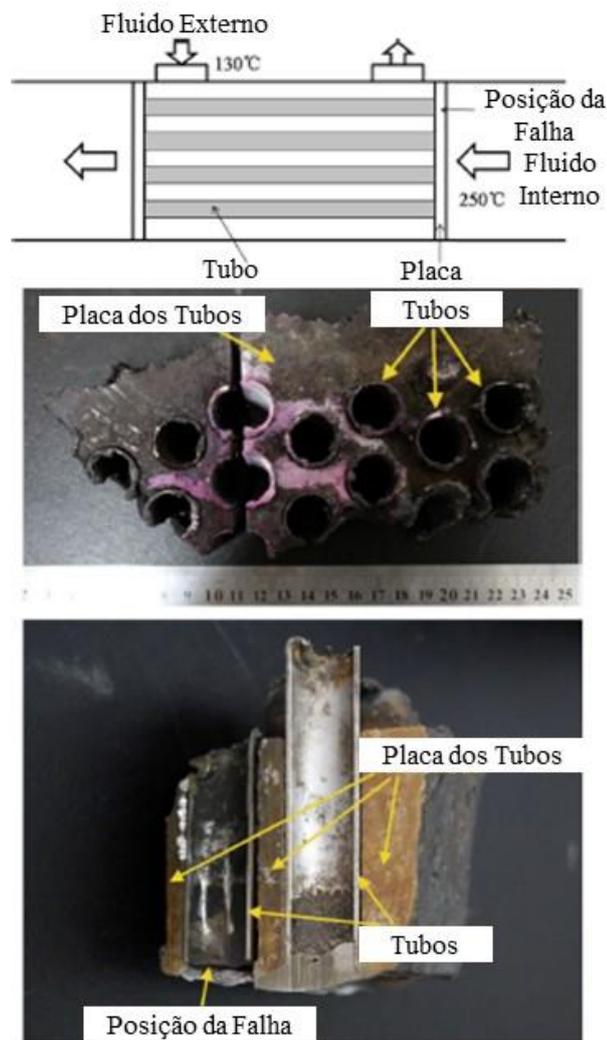
Conforme o autor, as propriedades do material relevantes para avaliar a tensão residual são o módulo de elasticidade, limite de escoamento (também conhecida como tensão de escoamento), coeficiente de Poisson e coeficiente de expansão térmica. Concluiu-se que uma distribuição de tensões descontínua foi

gerada na interface entre a zona termicamente afetada e o metal de base. A tensão residual máxima de Von-Mises ocorre no metal de base próximo a essa interface.

Parâmetros de soldagem como energia de soldagem, temperatura de pré-aquecimento, distância da junta e o diâmetro do tubo soldado foram estudados e todos alteram os valores de tensões residuais. Entretanto, a energia de soldagem tem pouca influência na tensão residual, já que esta propriedade mecânica, quando atinge seu valor máximo, é determinada pelo fato de o limite de escoamento do metal de base ser maior do que o da região do cordão de solda. Essa discrepância entre os limites de escoamento causa uma distribuição de tensão residual irregular. Ainda se observou que, com o aumento da distância da junta de soldagem, ocorre o aumento no pico de tensão residual. Outra conclusão importante deste trabalho, que pode ser extrapolada para avaliações de outros tipos de permutadores de calor, é que o aumento da temperatura de pré-aquecimento corresponde a um menor valor de pico para a tensão residual. Por fim, o autor observa que, em outra etapa de análise, deve-se verificar a influência da temperatura de soldagem e tensões residuais considerando o efeito de um tubo no outro.

Outro estudo com foco na região soldada entre tubos e placas dos tubos foi desenvolvido por Long (2016). As falhas, similares às do artigo anteriormente comentado, podem ser observadas na Figura 15. Os tubos - feitos de aço inoxidável 304 – foram soldados, por MIG sem metal de adição, às placas feitas de liga SA516 Gr.70.

Figura 15 – Descrição da falha estudada em trocador casco e tubos.

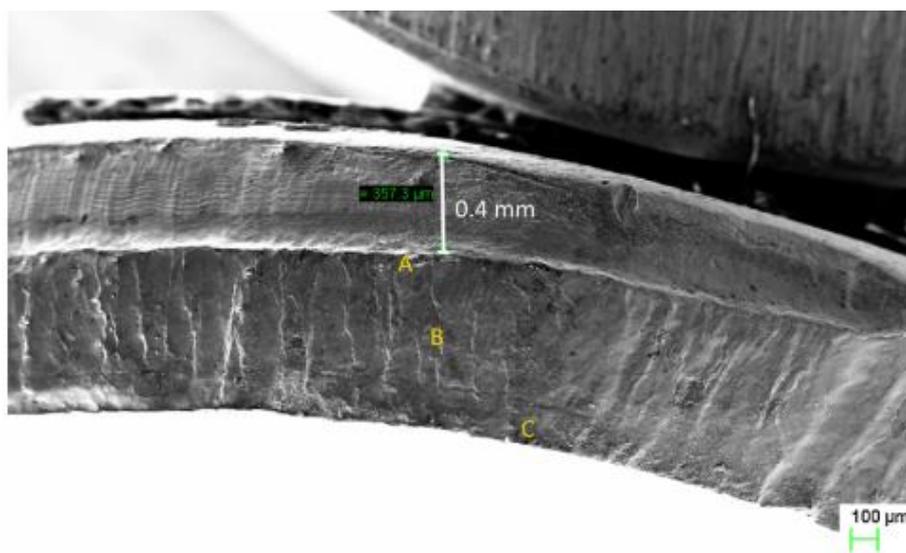


Fonte: Adaptado de Long (2016).

Por meio de inspeção visual, foi constatado que todas as trincas ocorreram dentro de 10 mm da região soldada. A superfície das fraturas nos tubos era perpendicular à direção axial. Os tubos foram avaliados utilizando um estereomicroscópio, MEV e EDS. Destas técnicas de análise experimental, concluiu-se que a fratura ocorreu sem deformação plástica óbvia; que tanto a área externa da superfície do tubo, quanto a parte interna apresentavam alguma corrosão, porém não foi observada corrosão por *pitting*; confirmou-se a composição química próxima à falha e que não há presença de agentes corrosivos como cloro e enxofre; constatou-se que a superfície fraturada se divide em duas zonas distintas: a região inferior, próxima à face interior do tubo, onde ocorrem as trincas; e a região superior, onde o defeito de

fusão insuficiente entre tubo e placa é observado. A interface entre essas áreas apresentou alta concentração de tensão e foi onde se originou a trinca. As zonas marcadas como A, B e C na Figura 16 correspondem à região inicial, zona de propagação e zona final da trinca – respectivamente.

Figura 16 – Região soldada com baixa magnificação.



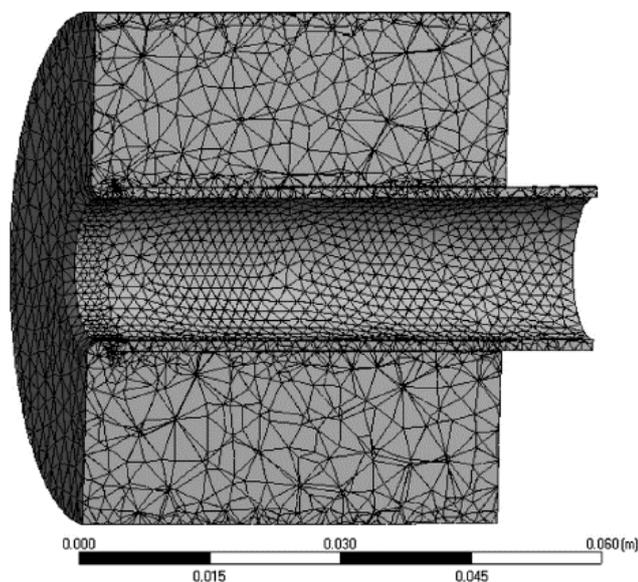
Fonte: Long (2016).

A difração de raios X e espectroscopia na região do infravermelho (ou Fourier Transform Infrared Spectroscopy) comprovaram que não havia modificação na composição do metal da região de falha. Para os testes metalográficos, a fim de avaliar a microestrutura do material, uma amostra do cordão de solda com a presença de falha e uma amostra do cordão de outra parte do trocador intacta foram preparadas. Ensaio mecânico de tração foram realizados em tubos com falhas e propriedades de limite de resistência à tração (tensão máxima, no diagrama tensão-deformação de engenharia), e a tensão de escoamento convencionalizada no valor limite de 0,2% de deformação e deformação máxima foram consistentes com o padrão do material. Entretanto, valores para propriedades mecânicas foram maiores que o padrão, o que pode significar que o material está endurecido e desta forma mais frágil para resistir à esta aplicação.

Segundo Long (2016), tanto defeitos de soldagem quanto processos de expansão severos podem causar concentração de tensões em juntas. Para confirmar

o ponto de maior concentração de tensão, o autor realiza uma análise de elementos finitos, cuja malha pode ser observada na Figura 17.

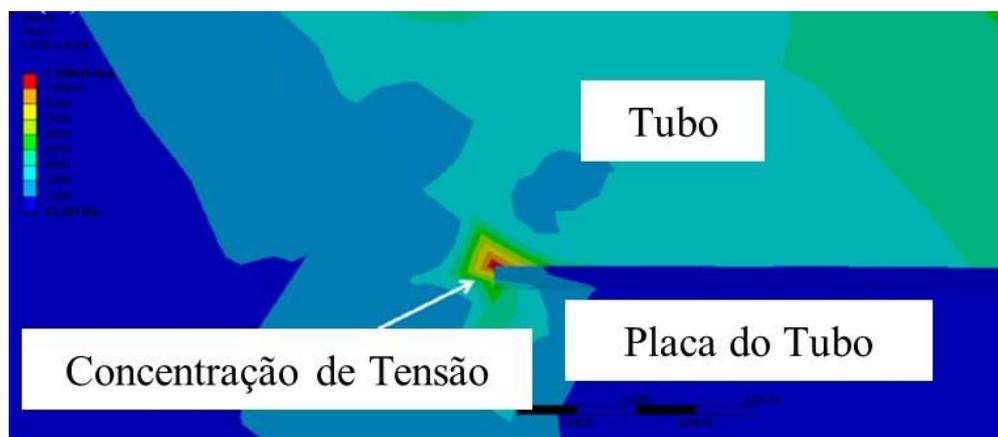
Figura 17 – Distribuição da malha para o modelo da junta soldada.



Fonte: Long (2016).

O resultado da simulação está exposto na Figura 18 e demonstra, por meio da distribuição de tensões de Von-Mises, que o ponto de maior concentração coincide com a região de formação das trincas.

Figura 18 – Distribuição de Tensão de Von-Mises resultante do modelo.



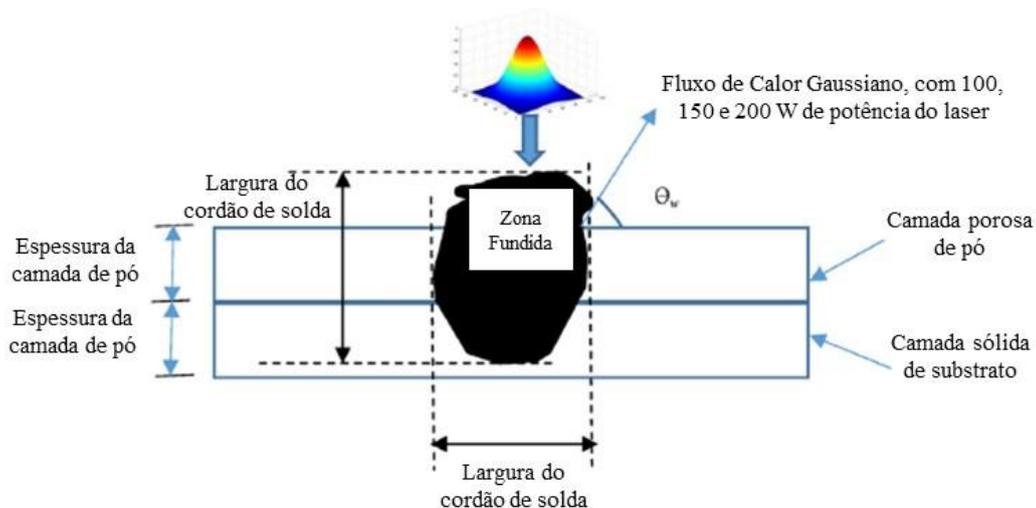
Fonte: Adaptado de Long (2016).

O trabalho realizado por Long (2016) coletou evidências que sugerem que o mecanismo de falha na região estudada se deve ao processo de fadiga estabelecido por cargas periódicas durante a operação do equipamento. O autor conclui que uma solda mal feita, em conjunto com um posicionamento incorreto da região de expansão dos tubos nas placas dos tubos, colaboraram para a formação das trincas.

Em 2013, a tecnologia de soldagem a laser era bem desconhecida no setor de fabricação de trocadores de calor, conforme Vandewynckéle (2013). Este autor discute sobre a introdução desta tecnologia a trocadores casco e tubos. Vale ressaltar que a principal característica e vantagem da soldagem a laser é a capacidade de focalizar a energia entregue à solda com elevada precisão. Isto é, esse processo possibilita obter altos valores de fluxo de calor em uma região de 0,2 a 0,6 mm. Como resultado, observa-se uma estreita zona de fusão e baixa energia de soldagem. Estes resultados correspondem a uma redução em operações de retrabalho, o que também significa menores custos de manutenção e reparos nas regiões soldadas (VANDEWYNCKÉLE, 2013).

Como mencionado anteriormente, durante a pesquisa foi dado enfoque ao titânio grau 1 e ao aço 316L. Isso se deve ao fato de serem materiais largamente empregados na fabricação das placas corrugadas soldadas do trocador PSHE. Antony (2014) elaborou um trabalho que pode servir como base para a definição de certos parâmetros de soldagem a laser em aço inoxidável austenítico, com metal de adição. O autor realizou investigações numéricas e experimentais na fundição por laser do aço inoxidável 316L na forma de pó, sobre uma camada de substrato do mesmo metal. O projeto pode ser mais bem compreendido com o auxílio da Figura 19.

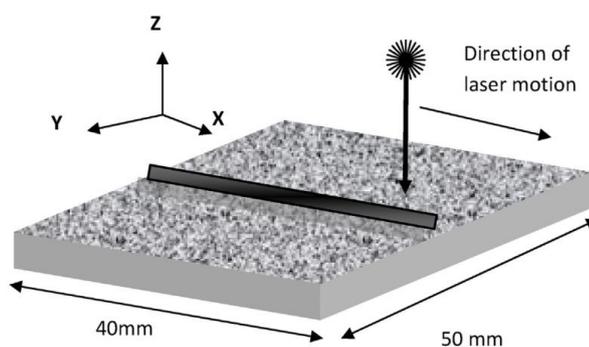
Figura 19 – Diagrama do processo de soldagem a laser.



Fonte: Adaptado de Antony (2014).

O tipo de laser utilizado foi Nd:YAG. Este será a fonte de energia focalizada no topo da superfície, mantendo o modo TEM<sub>00</sub>, enquanto percorre a direção  $x$  à uma velocidade constante, uma representação do processo pode ser observada na Figura 20.

Figura 20 – Diagrama do Processo.



Fonte: Adaptado de Antony (2014).

A intensidade do laser pode ser descrita por uma distribuição Gaussiana, conforme a Equação 1. Onde  $P$  é a potência do laser,  $r$  é o raio do feixe do laser,  $v$  é a velocidade do raio laser e  $t$  é o tempo de percurso.

$$I(x, y, t) = \frac{P}{\pi r^2} e \left[ -\frac{(x - vt)^2 + y^2}{r^2} \right] \quad (1)$$

Os parâmetros do laser Nd:YAG foram ajustados com a intenção de elevar a área exposta do pó a uma temperatura suficiente para que as partículas se fundam umas com as outras e formem uma camada densa. Os efeitos destes parâmetros na geometria, morfologia e homogeneidade de um processo de soldagem com passo único foram analisados por ferramentas e técnicas de caracterização como: analisador de tamanho de partículas laser, inspeção macro e microscópica, microscopia eletrônica de varredura, difração de raios X e espectroscopia infravermelho. Neste mesmo artigo, um modelo de elementos finitos para transferência de calor foi desenvolvido com a finalidade de determinar a distribuição de temperaturas em uma camada única de pó. Este modelo foi utilizado para entender o efeito dos parâmetros de soldagem nas características geométricas da peça final, tal como a espessura do cordão de solda.

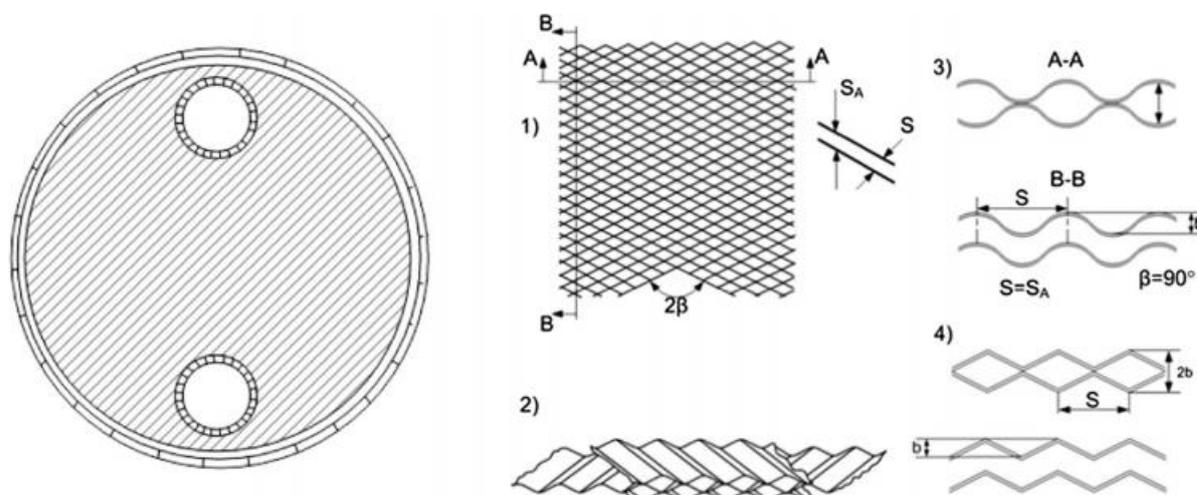
Como foi ressaltado por Antony (2014), os resultados de seu artigo podem auxiliar no processo de tomada de decisão para a produção de cordões de solda sinterizados de melhor qualidade – sem distorções térmicas.

### 4.3 CONTRIBUIÇÕES PARA A ÁREA DE PESQUISA

Neste ponto do trabalho, serão destacados alguns artigos com contribuições para o campo de pesquisa estabelecido.

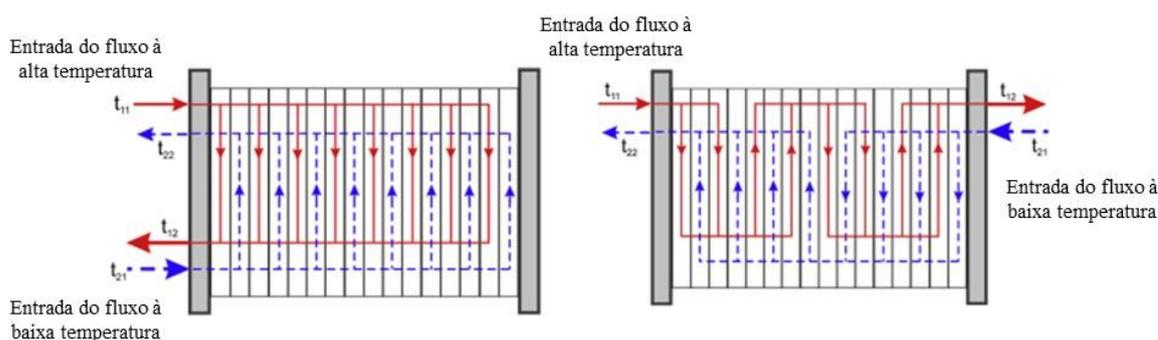
O primeiro permutador casco-placas foi comercialmente produzido pela empresa Vahterus na década de 90 (VAHTERUS, 2017) e agora é produzido por todas as maiores produtoras de trocadores do tipo placa. A configuração básica deste trocador foi apresentada na Figura 2. As possíveis formas de ondulações nas placas deste tipo de permutador são discutidas por Arsenyeva (2016), assim como as possíveis organizações de caminhos no interior do trocador de calor. A Figura 21 e a Figura 22 ilustram esses arranjos. Esta autora trata dos desenvolvimentos da teoria no design de trocadores de placa soldados e estabelece uma comparação entre trocadores casco-placas e *compabloc* (outro tipo de trocador de placas soldado).

Figura 21 – Esquema de uma placa e quatro possíveis formas de ondulações.



Fonte: Retirado de Arsenyeva (2016).

Figura 22 – Possíveis arranjos de caminhos num trocador de placas.

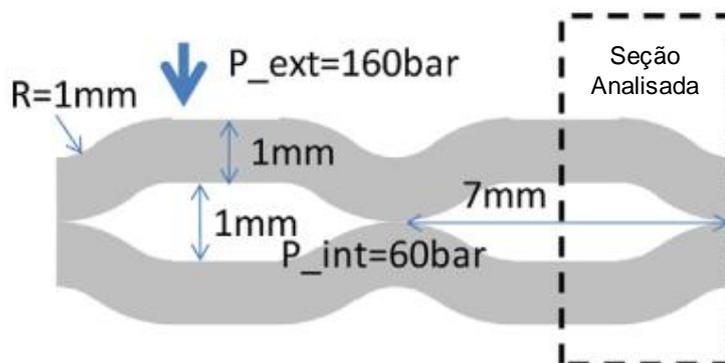


Fonte: Adaptado de Arsenyeva (2016).

Vale citar aqui o trabalho realizado por Freire (2014), que investiga a aplicabilidade de um PSHE em uma planta de reatores nucleares na área naval. O autor ressalta que, para esta aplicação, necessariamente, consideram-se limitações em volume e peso para o equipamento, o que reafirma o uso deste tipo de tecnologia mais compacta pela indústria *offshore*.

Freire (2014) propõe uma técnica que pode ser utilizada para investigar, por meio de elementos finitos, os esforços sustentados pela região de solda de duas placas onduladas conforme a Figura 23.

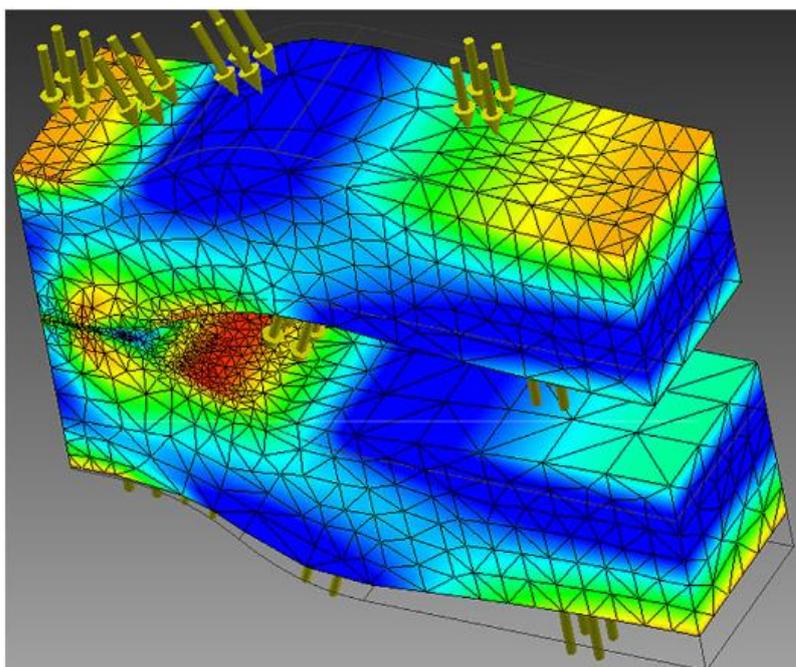
Figura 23 – Vista de corte da seção de duas placas corrugadas soldadas.



Fonte: Freire (2014).

O modelo de malha estudado é dado pela Figura 24. O autor analisou se as tensões mecânicas, causadas pela pressão entre as placas, são aceitáveis de acordo com a norma ASME correspondente. No modelo numérico, aplicou-se uma pressão externa de 166 bar e uma pressão interna de 64,5 bar. Condições de contorno de simetria foram aplicadas a todas as outras superfícies do modelo. A malha utilizada teve um total de 61,139 nós e 377,778 elementos. Os resultados dessa simulação numérica não revelaram pontos nos quais o estresse máximo superasse o permitido, considerando a pressão interna conveniente ao projeto do autor, isto é, 140 Mpa.

Figura 24 – Distribuição da malha na seção analisada.



Fonte: Freire (2014).

Uma extensa revisão bibliográfica sobre trocadores do tipo placa foi realizada por Abu-Khader (2012). Dentre os artigos levantados, destaca-se o trabalho desenvolvido por Chopard (1997), que ilustra o desenvolvimento da compacta tecnologia de placas soldadas e brasadas. Outro destaque, mais recente, é dado ao trabalho realizado por Jeong (2009). Este autor estudou a capacidade de transferência de calor e perda de carga, características de um trocador de placas soldadas, através de dinâmica de fluidos computacional (CFD); e demonstrou que, para certas aplicações, uma placa de formato elíptico apresentou melhores resultados do que uma placa com formato *chevron*.

Um ponto importante não discutido, somente citado, durante a apresentação dos estudos de casos, é o problema da incrustação em trocadores. Conforme a fabricante Vahterus (2017), o trocador casco-placas apresenta baixa taxa de incrustação. Entretanto, essa deposição de substâncias em suspensão nos fluidos (ou precipitação de sólidos dissolvidos, os quais podem vir a se tornar sólidos insolúveis devido ao aumento da temperatura) ainda é observada e deve variar conforme as condições de operação do equipamento.

A incrustação em trocadores de placa dá-se em função da geometria e velocidade do fluido (ABU-KHADER, 2012). Também Kho (1999) observou que o processo de incrustação ocorria a diferentes taxas em condições de operação idênticas. O autor atribuiu esse fato ao efeito da distribuição do escoamento no canal de placas. Grandgeorge (1998) realizou um estudo experimental da formação de particulados em fase líquida em um trocador de placas fabricadas em aço inoxidável.

## 5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Esse trabalho se propôs à descrição de pesquisas no campo de trocadores de calor, com foco nos modelos de caracterização química e mecânica (estrutural) empregados. Para tal, realizou-se um levantamento teórico com vistas à identificação de pesquisas que trouxeram, por sua vez, discussões em torno dos seguintes temas: trocadores de calor, comportamento mecânico, análise de materiais, processo de soldagem a laser e aço inoxidável.

Em relação aos objetivos desta pesquisa, acredita-se que se pôde estabelecer um embasamento teórico de possíveis soluções aplicáveis a trocadores, cujos modos de falha estejam relacionados a processos corrosivos ou à concentração de tensões. Com a metodologia aplicada, agregou-se material para a avaliação de futuras tomadas de decisão.

### 5.1 CONCLUSÃO

Após a proposição da metodologia de pesquisa bibliográfica com os estudos de casos envolvendo trocadores de calor, podemos apresentar, nos parágrafos finais, as principais conclusões a seguir.

Panahi (2017) apresenta um conjunto de soluções para seu caso de estudo que consiste em mudar o material (mais recessivo), reduzir a corrosividade do meio de operação e reduzir fontes externas de tensão. Estudos de caso, envolvendo corrosão, se concentraram em avaliar os mesmos pontos de interesse durante as respectivas análises de falha.

Conforme Long (2016), tanto defeitos de soldagem quanto processos de expansão severos podem causar concentração de tensões em juntas de trocadores de calor.

Vandewynckéle (2013) comentou que uma estreita zona de fusão e baixa energia de soldagem resultam do processo de soldagem a laser. Assim, o emprego desta técnica na união das placas dos trocadores de calor pode reduzir custos com operações de retrabalho, como, por exemplo, a necessidade de tratamento térmico da estrutura, manutenção e reparos nas regiões soldadas.

Observados os objetivos da pesquisa bibliográfica, passa-se a analisar a metodologia adotada para a escolha de palavras-chave e consequente seleção de publicações, a respeito de conceitos e técnicas de análise aplicados ao trocador PSHE.

Quanto à metodologia, cabe citar que a proposta de se filtrar os resultados por artigos mais recentes tem por objetivo obter dados atualizados e estudos de casos realizados com base nas técnicas de análise atualmente empregadas pelos pesquisadores da área. Entretanto, durante o desenvolvimento do trabalho, ao se avaliar as referências utilizadas pelos autores estudados, foi possível observar que, para certos conjuntos de palavras-chave, havia artigos relevantes para as discussões realizadas que foram publicados antes de 2006. Em outras palavras, a filtragem de resultados, considerando artigos publicados nos últimos 10 anos, pode restringir o alcance do conteúdo desenvolvido.

Neste sentido, eu penso que o critério adotado foi suficiente para a realização deste trabalho, porque permitiu o conhecimento de um conjunto de pesquisas realizadas na última década.

Admite-se, por fim, a existência de outras plataformas de pesquisa que devem ser contempladas em caso de necessidade de se ampliar dados de revisão bibliográfica.

## 5.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Durante a metodologia deste trabalho, foi estabelecido um foco sobre o processo de soldagem a laser. Como proposta futura, uma avaliação crítica pode ser realizada quanto à aplicação de soldagem a laser no processo de fabricação de trocadores. Outra proposta está em realizar uma pesquisa similar - através de estudos de casos em outras classes de trocadores - apontando para parâmetros de análise de outros processos de soldagem que possam ser aplicados às placas corrugadas.

Esperava-se, finalmente, obter resultados em relação à aplicação do Titânio, na fabricação de placas e em estudos de caso sobre trocadores utilizando este material. Contudo, nos limites do levantamento teórico feito neste trabalho, nada tão específico foi encontrado nas plataformas pesquisadas. E é o que justifica a realização de uma pesquisa acerca do tema.

## REFERÊNCIAS

ABU-KHADER, M. M. **Plate heat exchangers: recent advances**. Renewable and sustainable energy reviews 16.4 (2012): 1883-1891.

ANTONY, K. ARIVAZHAGAN, N. & SENTHILKUMARAN, K. **Numerical and experimental investigations on laser melting of stainless steel 316L metal powders**. Journal of Manufacturing Processes 16.3 (2014): 345-355.

ARSENYEVA, O. P., et al. **Two types of welded plate heat exchangers for efficient heat recovery in industry**. Applied Thermal Engineering 105 (2016): 763-773.

ASKELAND, D. R., & PHULÉ, P. P. **Ciência e engenharia dos materiais**. 1ª. ed. São Paulo: Cengage Learning, 2008. p. 404.

ASM. **Titanium Grade 1**. Disponível em: <<http://asm.matweb.com/search/SpecificMaterial.asp?bassnum=mtu010>>. Acesso em: 16 set. 2017.

BRANDI, S. D., WAINER, E., & MELLO, F. D. H. **Soldagem: processos e metalurgia**. São Paulo: Edgar Blucher, 1992.

CALLISTER, William D. **Fundamentos da ciência e engenharia de materiais: uma abordagem integrada**. 7ª. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2008.

ÇENGEL, Y. A.; BOLES, M. A. **Termodinâmica**. 5ª. ed. São Paulo: MCGraw-Hill, 2006.

CHOPARD F., et al. **Welded and totally accessible advanced plate heat exchanger – the choice for integration of compact exchanger**. International Conference on Compact Heat Exchangers for the Process Industries, June 22–27. 1997. p. 591–5.

DNV-GL. **Subsea facilities – technology developments, incidents and future trends**. Disponível em: <[http://www.ptil.no/getfile.php/PDF/Seminar%202014/Undervassanlegg/Report%20No%20%2018IM1UH-4\\_2014.pdf](http://www.ptil.no/getfile.php/PDF/Seminar%202014/Undervassanlegg/Report%20No%20%2018IM1UH-4_2014.pdf)>. Acesso em: 26 set. 2016.

EBRAHIMI, H. Z. & HANGHIGHI, M. R. G. **Estimation of heat flux and mechanical loads on laminated functionally graded plate**. Acta Mechanica 227.8 (2016): 2075-2097.

FREIRE, L. O., & ALVES DE ANDRADE, D. **On applicability of plate and shell heat exchangers for steam generation in naval PWR**. Nuclear Engineering and Design 280 (2014): 619-627.

FORT WAYNE METALS. **Resource library - CP Titanium**. Disponível em: <<http://www.fwmetals.com/services/resource-library/unalloyed-commercially-pure-cp-titanium1/>>. Acesso em: 10 nov. 2016.

GRANDGEORGE S., et al. **Particulate fouling of corrugated plate heat exchangers**. Global kinetic and equilibrium studies. Chem Eng Sci. 1998; 53(17):3050–71.

HESSELGREAVES, J. E., LAW, R., and REAY, D. **Compact heat exchangers: selection, design and operation**. Butterworth-Heinemann, 2016.

HIBBELER, R. C. **Resistência dos materiais**. 7<sup>a</sup>. ed. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2004.

HUTTUNEN-SAARIVIRTA, E., et al. **Microbiologically influenced corrosion (MIC) in stainless steel heat exchanger**. Applied Surface Science 258.17 (2012): 6512-6526.

INCROPERA, F. P. et al. **Fundamentos de transferência de calor e de massa**. 7<sup>a</sup>.ed. Rio de Janeiro: LTC, 2014.

KAKAÇ, S. et al. **Heat exchangers: selection, rating, and thermal design**. 3<sup>a</sup>. ed. Boca Raton: CRC Press, 2012.

KALANTIDOU, A., et al. **Preliminary study on the mechanical behaviour of heat exchanger pile in physical model**. Géotechnique 62.11 (2012): 1047.

KHO, T. & MULLER-STEINHAGEN H. **An experimental and numerical investigation of heat transfer fouling and fluid flow in flat plate heat exchangers**. Chem Eng Res Des 1999; 77(2):124–30.

KLOECKNER METALS. **Manual técnico de aço inoxidável**. Disponível em: <<http://www.kloecknermetals.com.br/pdf/3.pdf>>. Acesso em: 30 de out. de 2017.

KRISHNAN, J., et al. **An experimental investigation into tube to tube-plate welding using the impactor method**. Journal of materials processing technology 22.2 (1990): 191-201.

LEYENS, Christoph; PETERS, Manfred. **Titanium and Titanium Alloys: Fundamentals and Applications**. Weinheim: Wiley-VCH, 2003.

LOPES, F. W. B. **Dessulfurização do Gás Natural Utilizando Sistemas Microemulsionados**. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química. Natal/RN, Brasil. 2003.

LONG, L., et al. **Failure analysis of tube-to-tubesheet welded joints in a shell-tube heat exchanger**. Case Studies in Engineering Failure Analysis 7 (2016): 32-40.

MARCONI, M. D. A., & LAKATOS, E. M. (2002). **Técnicas de pesquisa**. 7a. ed. São Paulo: Atlas, 2013.

MARQUES, P.V., MODENESI, P.J., BRACARENSE, A.Q. **Soldagem: Fundamentos e Tecnologia**. 1<sup>a</sup>. ed. Belo Horizonte: UFMG, 2005.

NAGATANI, T., SAITO S., SATO, M.; YAMADA, M. Development of an ultra high resolution scanning electron microscope by means of a field emission source and in-lens system. **Scanning Microscopy**. v.11, 901-909, 1987.

PANAHI, H., et al. **Failure analysis of type 304 stainless steel amine exchanger sheets in a gas sweetening plant**. Case Studies in Engineering Failure Analysis (2017).

PIVETA, Ana Cláudia Gabrielli, et al. Análise metalográfica do titânio puro submetido à soldagem laser Nd: YAG e TIG. **Rev Odontol UNESP**, São Paulo, 42.1 (2013): 1-6.

RICHARD, **Marine**. **Market outlook on the deepwater subsea sector**. SUBSEA EXPO 2014. Aberdeen, 2014. *Anais...* Subsea UK: National Subsea Research Initiative, 2014. Disponível em: <<http://www.subseauk.com/documents/presentations/marine%20richard.pdf>>. Acesso em: 26 set. 2016.

SEO, J. W., et al. **Thermal characteristics of a primary surface heat exchanger with corrugated channels**. Entropy 18.1 (2015): 15.

SINGH, R. **Applied welding engineering: processes, codes, and standards**. Butterworth-Heinemann, 2012.

SPIRAX-SARCO. **"Plates & Shell" Heat Exchangers, New PSHE series**. Disponível em: <[http://www.spiraxsarco.com/global/italy/Products/Documents/E%20-%20Scambiatori%20di%20calore%20a%20piaste%20e%20mantello%20PSHE\\_.pdf](http://www.spiraxsarco.com/global/italy/Products/Documents/E%20-%20Scambiatori%20di%20calore%20a%20piaste%20e%20mantello%20PSHE_.pdf)>. Acesso em: 25 de out. de 2017.

VANDEWYNCKÉLE, A., et al. **Laser welding head tailored to tube-sheet joint requirements for heat exchangers manufacturing**. Physics Procedia 41 (2013): 144-152.

VAHTERUS. **Plate & Shell Heat Exchanger**. Disponível em: <[www.vahterus.com/en/node/528](http://www.vahterus.com/en/node/528)>. Acesso em: 20 de out. de 2017.

VAHTERUS. **PSHE 3 D - Intercambiador de placas soldadas y carcasa VAHTERUS, para aplicaciones donde la temperatura o la presión son muy elevadas**. 27/10/2014. Vídeo YouTube BR. (1'). Disponível em: <<https://www.youtube.com/watch?v=hWdlZ0dk9FY>>. Acesso em: 14 set. 2016.

XU, S., WANG, C. & WANG, W. **Failure analysis of stress corrosion cracking in heat exchanger tubes during start-up operation**. Engineering Failure Analysis 51 (2015): 1-8.

XU, S., & WANG W. **Numerical investigation on weld residual stresses in tube to tube sheet joint of a heat exchanger**. International Journal of Pressure Vessels and Piping 101 (2013): 37-44.

YANG, J. **On the mechanical analysis of a tube heat exchanger**. International journal of pressure vessels and piping 74.3 (1997): 161-164.