



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

DAMYLLE CRISTINA XAVIER DONATI

**ANÁLISE NUMÉRICA DA INTERAÇÃO FLUIDO-ESTRUTURA DE
TROCADORES DE CALOR DO TIPO PSHE**

JOINVILLE

2019

Damylle Cristina Xavier Donati

**ANÁLISE NUMÉRICA DA INTERAÇÃO FLUIDO-ESTRUTURA EM TROCADORES
DE CALOR DO TIPO PSHE**

Trabalho apresentado como requisito para obtenção do título de bacharel no Curso de Graduação em Engenharia Aeroespacial do Centro Tecnológico de Joinville da Universidade Federal de Santa Catarina.

Orientadora: Profa. Dra. Talita Sauter Possamai

Coorientador: Prof. Dr. Marcos Alves Rabelo

Joinville

2019

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

Donati, Damylle Cristina Xavier
ANÁLISE NUMÉRICA DA INTERAÇÃO FLUIDO-ESTRUTURA EM
TROCADORES DE CALOR DO TIPO PSHE / Damylle Cristina Xavier
Donati ; orientadora, Talita Sauter Possamai,
coorientador, Marcos Alves Rabelo, 2019.
66 p.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) -
Universidade Federal de Santa Catarina, Campus Joinville,
Graduação em Engenharia Aeroespacial, Joinville, 2019.

Inclui referências.

1. Engenharia Aeroespacial. 2. FSI. 3. FEA. 4. CFD. 5.
PSHE. I. Possamai, Talita Sauter. II. Rabelo, Marcos
Alves. III. Universidade Federal de Santa Catarina.
Graduação em Engenharia Aeroespacial. IV. Título.

Damylle Cristina Xavier Donati

**Análise Numérica da Interação Fluido-Estrutura em Trocadores de Calor do
Tipo PSHE**

O presente trabalho em nível de graduação foi avaliado e aprovado por banca
examinadora composta pelos seguintes membros:

Profa. Talita Sauter Possamai, Dra.
Universidade Federal de Santa Catarina

Prof. Sergio Junichi Idehara, Dr.
Universidade Federal de Santa Catarina

Prof. Ernane Silva, Dr.
Universidade Federal de Santa Catarina

Certificamos que esta é a **versão original e final** do trabalho de conclusão que foi
julgado adequado para obtenção do título de bacharel em Engenharia Aeroespacial.

Prof. Dr. Rafael Gigena Cuenca
Coordenador do Curso

Profa. Dra. Talita Sauter Possamai
Orientador(a)

Joinville, 26 de novembro de 2019.

Este trabalho é dedicado a todos que me ajudaram a continuar.

AGRADECIMENTOS

Agradeço à FEESC, à PETROBRAS e à ANP pelos recursos oferecidos durante o período do presente trabalho.

Agradeço meus pais pelo dom da vida e por todo o esforço que despenderam para que eu trilhasse meu próprio caminho e à minha irmã por sempre ter sido meu modelo e minha inspiração.

Agradeço a todas as minhas famílias escolhidas, Elite, Balaco, Catan, LCC e LabFen, por terem sido cruciais nas minhas escolhas pessoais e profissionais.

Agradeço aos meus orientadores, Profa. Dra. Talita Sauter Possamai e Prof. Dr. Marcos Alves Rabelo e aos professores Dr. Renato Oba e Dr. Kleber Vieira de Paiva por todo o apoio e orientação neste trabalho.

Agradeço a Bruna Larissa Tascheck, por ter sido a melhor mestranda, colega e amiga que eu poderia ter ganho nessa trajetória.

E por fim, a Thais Baena Moura e Rodrigo Silveira de Santiago, por terem sido tudo o que precisei nos melhores e nos piores momentos.

RESUMO

Com o consumo intenso de combustíveis fósseis no mundo, indústrias petroquímicas e de apoio investem cada vez mais em pesquisa e desenvolvimento de produtos e processos com o objetivo de aumentar a produção e facilitar a manutenção de aparelhos já existentes. Junto a isso, a necessidade do controle de temperatura nos diversos processos que englobam a manipulação dos insumos torna os trocadores de calor peças fundamentais na indústria. Em especial, trocadores de calor do tipo casco e placas, ou PSHE, são preferíveis em diversos aspectos, dentre eles, o tamanho compacto, as condições de operação elevadas e a eficiência térmica elevada. O presente trabalho desenvolveu resoluções numéricas para os problemas termo-fluidodinâmico e estrutural de forma acoplada, a fim de determinar campos de tensão e deslocamento, definir a hierarquia de influência das cargas térmica e mecânica e analisar seus respectivos comportamentos. Os resultados obtidos foram de que a maior contribuição nas tensões é a carga mecânica, com diferença de ordem de grandeza nas tensões de aproximadamente 100 vezes. Já a carga térmica se mostrou influenciada grandemente pela diferença de temperaturas dos domínios sólido e fluido, tendo um aumento de aproximadamente 0,40 MPa por consequência de um aumento de 25°C na diferença de temperaturas entre os domínios.

Palavras-chave: PSHE. CFD. FEA. FSI.

ABSTRACT

With the intense consumption of fossil fuels worldwide, petrochemical and support industries are increasingly investing in product and process research and development to increase production and facilitate the maintenance of existing appliances. In addition, the need for temperature control in the various processes that encompass the handling of inputs makes heat exchangers a key part of the industry. In particular, shell and plate heat exchangers, or PSHE, are preferable in a number of ways, including compact size, high operating conditions and high thermal efficiency. The present work developed numerical resolutions for the thermo-fluiddynamic and structural problems in a coupled way, in order to determine stress and displacement fields, define the influence hierarchy of thermal and mechanical loads and analyze their respective behaviors. The results obtained were that the largest contribution in the stresses is the mechanical load, with an order of magnitude difference in the stresses of approximately 100 times. The thermal load was strongly influenced by the temperature difference of the solid and fluid domains, increasing by approximately 0.40 MPa as a consequence of a 25°C increase in the temperature difference between the domains.

Keywords: PSHE. CFD. FEA. FSI.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Configurações de escoamento.....	19
Figura 2 – Simulação numérica de escoamento em permutador de calor do tipo casco e tubos.....	20
Figura 3 – Permutador de calor de placas gaxetadas	21
Figura 4 – Funcionamento do permutador de calor de casco e placas	22
Figura 5 – Conjunto de placas interno	22
Figura 6 – Configurações de casco	23
Figura 7 – Abordagens de interação fluido-estrutural	24
Figura 8 – Discretização em elementos	26
Figura 9 – Perfil com flutuações e média das propriedades	30
Figura 10 - Hierarquia dos modelos atuais de turbulência	32
Figura 11 - Representação da diferença na solução de um mesmo ponto fixo de um escoamento turbulento em regime permanente através dos modelos DNS, LES e RANS	33
Figura 12 – Geometria e campo de velocidades resultante de Liu et al (2015)	35
Figura 13 – Geometrias analisadas em Luan et al (2017)	36
Figura 14 – Domínio computacional.....	37
Figura 15 – Campo de velocidades graficado em um plano situado entre as placas.....	38
Figura 16 – Contornos de tensão do exterior do PCHE.	40
Figura 17 – Ilustração esquemática da metodologia de cálculo	41
Figura 18 – Dimensões da placa	43
Figura 19 – Vista explodida	43
Figura 20 – Visualização da montagem dos domínios	44
Figura 21 – Superfícies de condição de contorno do domínio fluido	49
Figura 22 – Superfícies de condição de contorno do domínio sólido	49
Figura 23 – Distribuição de pressão no escoamento para os casos 1, 2 e 3	52
Figura 24 – Distribuição de deslocamentos (von-Mises) devido ao carregamento mecânico para os casos 1, 2 e 3	53

Figura 25 – Distribuição de deslocamentos (direcional) devido ao carregamento mecânico para o caso 1	54
Figura 26 – Localização dos pontos de concentração de tensão de von-Mises devido ao carregamento mecânico para os casos 1, 2 e 3.	54
Figura 27 - Pontos de concentração de tensão de von-Mises devido ao carregamento mecânico para os casos 1, 2 e 3: detalhe da região de entrada de fluido.	55
Figura 28 - Distribuição de tensão de von-Mises devido ao carregamento mecânico para os casos 1, 2 e 3	56
Figura 29 - Distribuição de deslocamentos (von-Mises) devido ao carregamento térmico para os casos 1, 2 e 3.	57
Figura 30 - Distribuição de tensão de von-Mises devido ao carregamento térmico para os casos 1, 2 e 3.	57
Figura 31 – Distribuição de deslocamento e tensão para o caso 5	59

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Propriedades da água	45
Tabela 2 – Propriedades mecânicas	46
Tabela 3 – Condições de contorno	48
Tabela 4 – Casos de análise	50

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

PSHE	Plate Shell Heat Exchanger
T2F	Thermal Fluid Flow Group
UFSC	Universidade Federal de Santa Catarina
FSI	Interação Fluido- Estrutura
MEF	Método dos Elementos Finitos
MVF	Método dos Volumes Finitos
WUDS	Weighted Upstream Differencing Scheme
SUDS	Skew Upstream Differencing Scheme
SIMPLE	Semi-Implicit Method for Pressure Linked Equations
SIMPLEC	Semi-Implicit Method for Pressure Linked Equations-Consistent
DNS	Direct Numerical Simulation
LES	Large Eddy Simulation
RANS	Reynolds Average Numerical Simulation
PCHE	Trocador de Calor Compacto
TIG	Gás Inerte de Tungstênio
HAZ	Zona Termicamente Afetada

LISTA DE SÍMBOLOS

L	Comprimento [m]
A	Seção transversal [m ²]
E_s	Módulo de elasticidade [Pa]
F	Carregamento axial [N]
l	Comprimento da seção [m]
N_i	I-ésimo nó da malha
ρ	Massa específica [kg/m ³]
t	Variável tempo [s]
u_i	Componente i da velocidade [m/s]
u_j	Componente j da velocidade [m/s]
x_j	Coordenada espacial do sistema cartesiano [m]
P_1	Pressão [Pa]
μ	Viscosidade do fluido [Pa·s]
S^{u_i}	Termo fonte relativo a cada componente de velocidade
T	Temperatura [K]
k	Condutividade térmica [W/m·K]
c_p	Calor específico do fluido a pressão constante [J/kg·K]
ϕ	Propriedade qualquer dentro de um problema convectivo
u	Velocidade [m/s]
Re	Número de Reynolds
Re_{crit}	Número de Reynolds crítico
$\bar{\phi}$	Média temporal da propriedade
$\phi'(t)$	Componente de flutuação da propriedade
η	Menor escala de comprimento (comprimento de Kolmogorov) [m]
ℓ	Maior escala de comprimento [m]
τ	Menor escala de tempo [s]
T_{max}	Maior escala de tempo [s]
v_{min}	Menor escala de velocidade [m/s]
v	Maior escala de velocidade [m/s]
Re_ℓ	Número de Reynolds avaliado na maior escala de comprimento
ν	Viscosidade cinemática [m ² /s]

ε Taxa de dissipação de energia [m^2/s^3]
 $k - \varepsilon$ Modelo de turbulência
 $k - \omega$ Modelo de turbulência
 β Ângulo de Chevron [rad]
 ε_s Deformação causada pela carga nominal [m/m]
 σ Tensão de resistência à tração [Pa]
 \dot{m} Vazão mássica [kg/s]
 Nu Número de Nusselt
 Pr Número de Prandtl
 h_{conv} Coeficiente de transferência de calor por convecção [$\text{W}/\text{m}^2 \cdot \text{K}$]
 LE_{316L} Limite de escoamento do aço 316L [Pa]
 RUT_{316L} Resistência última à tração para o aço 316L [Pa]

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	15
1.1	OBJETIVOS	16
1.1.1	Objetivo Geral	16
1.1.2	Objetivos Específicos	16
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	18
2.1	PERMUTADORES DE CALOR	18
2.1.1	PSHE	21
2.2	INTERAÇÃO FLUIDO-ESTRUTURA (FSI).....	23
2.3	MODELAGEM MATEMÁTICA E COMPUTACIONAL	25
2.3.1	Método dos Elementos Finitos (MEF)	25
2.3.2	Método dos Volumes Finitos (MVF)	28
2.3.2.1	Turbulência.....	29
3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	34
4	METODOLOGIA	41
4.1	DOMÍNIOS DE ANÁLISE	42
4.2	MALHAS DE RESOLUÇÃO E CRITÉRIO DE CONVERGÊNCIA	46
4.3	DURAÇÃO DA SOLUÇÃO	47
4.4	CONDIÇÕES DE CONTORNO	47
5	RESULTADOS E DISCUSSÕES	51
5.1	VERIFICAÇÃO DO CAMPO DE PRESSÃO NO DOMÍNIO FLUIDO.....	Erro!
	Indicador não definido.	
5.2	CARREGAMENTO MECÂNICO.....	51
5.3	CARREGAMENTO TÉRMICO.....	56
5.4	CARREGAMENTO ACOPLADO	58
6	CONCLUSÕES	59
7	REFERÊNCIAS	61

1 INTRODUÇÃO

Segundo a Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (2018a), em estudo realizado com dados acumulados de 2008 a 2017, o Brasil detém a 15ª posição no ranking de reservas provadas de petróleo, no âmbito mundial, com 12,8 bilhões de barris no ano de 2017. Estes, estão distribuídos em 29 bacias sedimentares que compreendem uma área de 7,175 milhões de quilômetros quadrados, apesar de apenas uma pequena parcela estar sob exploração atualmente (AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIOCOMBUSTÍVEIS, 2018b).

Com a produção de petróleo e gás natural, os cofres públicos arrecadam recursos em participações governamentais oriundas dos contratos de concessões resultantes das licitações (bônus de assinatura, royalties e participações especiais). Parte destes recursos alimenta a formação de recursos humanos e o desenvolvimento de pesquisas que permitem novos saltos exploratórios para a indústria (AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIOCOMBUSTÍVEIS, 2018c, p.1).

A grande importância econômica do setor petrolífero justifica o investimento extensivo em pesquisa e desenvolvimento de produtos e processos para o aumento da produção, a diminuição dos custos, a manutenção dos sistemas existentes e a busca por modelos eficientes.

Durante os processos de extração e destilação fracionada do petróleo, por exemplo, o controle de temperatura das substâncias é necessário para o desenvolvimento dos mesmos, seja no transporte da matéria-prima, seja no refino da mesma. Na etapa de extração, ainda nas plataformas de extração oceânicas (plataformas offshore), utilizam-se amplamente equipamentos nomeados permutadores de calor - ou trocadores de calor - para resfriamento ou aquecimento do óleo.

Os permutadores de calor mencionados permitem, em resumo, o processo de troca de calor entre dois fluidos que estão a diferentes temperaturas e se encontram separados por uma parede sólida (INCROPERA et al., 2007).

Permutadores dos tipos de placas (PHE, do inglês, plate heat exchanger) e casco-placas (PSHE, do inglês, plate-shell heat exchanger) são os mais compactos e, portanto, preferíveis nas plataformas offshore devido ao alto custo da área útil das mesmas.

Estando sob a influência de campos oscilantes de pressão e temperatura, os permutadores de calor são solicitados ciclicamente, dando brechas para falhas por fadiga (mecânica e térmica) em suas estruturas. Abordagens experimentais e analíticas são bem difundidas na indústria de permutadores de calor, e a vertente numérica vem expandindo-se entre os pesquisadores da área.

Análises numéricas de dinâmica de fluidos, estrutural e térmica serão realizadas no estudo aqui desenvolvido, em regimes de acoplamento e realimentação.

O permutador analisado será o PSHE, de casco e placas, objeto de trabalho do grupo de pesquisa Thermal Fluid Flow Group (T2F) da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC). Para a validação deste estudo, dados experimentais providos por membros colaboradores do grupo de pesquisa serão utilizados.

1.1 OBJETIVOS

Para estudar a problemática de falhas em permutadores de calor do tipo casco-placas, propõe-se neste trabalho os seguintes objetivos.

1.1.1 Objetivo Geral

Análise numérica da interação fluido-estrutura presente no funcionamento dos permutadores de calor, com foco na análise de um par de placas do conjunto.

1.1.2 Objetivos Específicos

- Obter numericamente os campos de temperatura e pressão para um par de placas;
- Encontrar as resultantes tensões térmicas e mecânicas para tais carregamentos;

- Analisar o comportamento dessas resultantes frente à variação da condição de temperatura das placas;
- Analisar o comportamento dessas resultantes frente à variação da condição de vazão do fluido.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Antes da implementação de uma solução para a problemática apresentada, duas etapas são necessárias: o entendimento físico e matemático do problema e das ferramentas de solução e o estudo dos trabalhos já realizados na área por outros autores.

Para a primeira etapa, foram destacados três tópicos:

1 - O funcionamento do dispositivo estudado: a teoria física do funcionamento de permutadores de calor, passando por diferentes configurações e classificações;

2 - O cenário físico do problema a ser investigado: as teorias física e matemática da interação fluido-estrutura;

3- A ferramenta escolhida para o desenvolvimento da análise: os métodos numéricos aplicados a cada domínio estudado.

Para a segunda etapa, os três tópicos da fundamentação teórica são revisitados na busca por estudos já realizados, de forma a encontrar abordagens alternativas e dados comparativos.

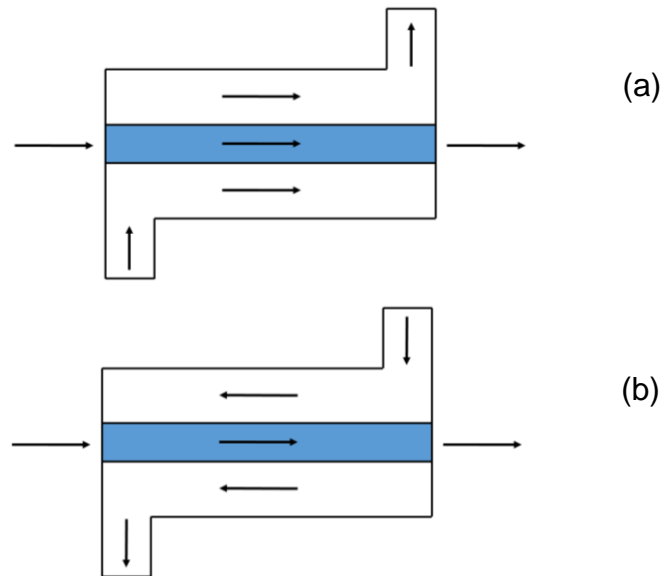
Por fim, a metodologia de aplicação da ferramenta escolhida pode ser discutida, descrevendo o passo-a-passo realizado neste trabalho.

2.1 PERMUTADORES DE CALOR

Como exposto anteriormente, os permutadores de calor são utilizados a fim de atingir temperaturas-alvo em processos que requerem o controle fino da mesma. De modo objetivo, serão abordados neste trabalho os permutadores de calor de transferência direta, isto é, permutadores nos quais há presença de uma superfície separadora entre as correntes quentes e frias através da qual a transferência de calor ocorre.

Segundo Incropera et al. (2007), os permutadores são tipicamente classificados em função da configuração do escoamento e do tipo de construção. Dada a configuração de escoamento, este pode ser definido como paralelo ou contracorrente. No primeiro caso, os fluidos de trabalho se desenvolvem pelo aparelho em sentidos iguais, sendo que no segundo caso, se desenvolvem em sentidos contrários. A figura 1 exemplifica a diferença.

Figura 1 – Configurações de escoamento. a) Configuração de escoamento paralelo; b) Configuração de escoamento contracorrente. Cada cor simboliza um fluido distinto.

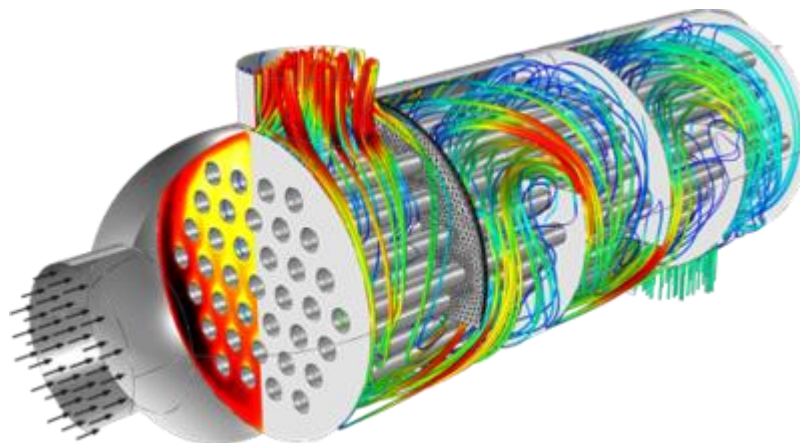


Fonte: Autora (2019).

Abordando a classificação por construção, é possível evidenciar três tipos principais: casco e tubos, de placas e casco e placas. A construção de casco e tubos consiste em um feixe de tubos envolto por uma carenagem, de modo que o primeiro fluido de trabalho escoa por dentro de cada tubo e o segundo por fora, limitado pelo casco. O feixe de tubos pode atravessar o casco de forma reta ou fazer curvas, também chamadas de passes, de forma a aumentar o tempo de permanência do fluido de trabalho dentro do casco (INCROPERA et al., 2007).

Um hábito usual é o da inserção de chincanas – placas de apoio – no feixe de tubos, utilizadas tanto para promover turbulência no escoamento, aumentando assim a troca de calor, como para a própria sustentação do feixe, garantindo a integridade estrutural do conjunto (INCROPERA et al., 2007). A figura 2 mostra um exemplo de tal configuração. Pode-se observar os sentidos dos fluidos do casco e dos tubos, bem como as chincanas.

Figura 2 – Simulação numérica de escoamento em permutador de calor do tipo casco e tubos

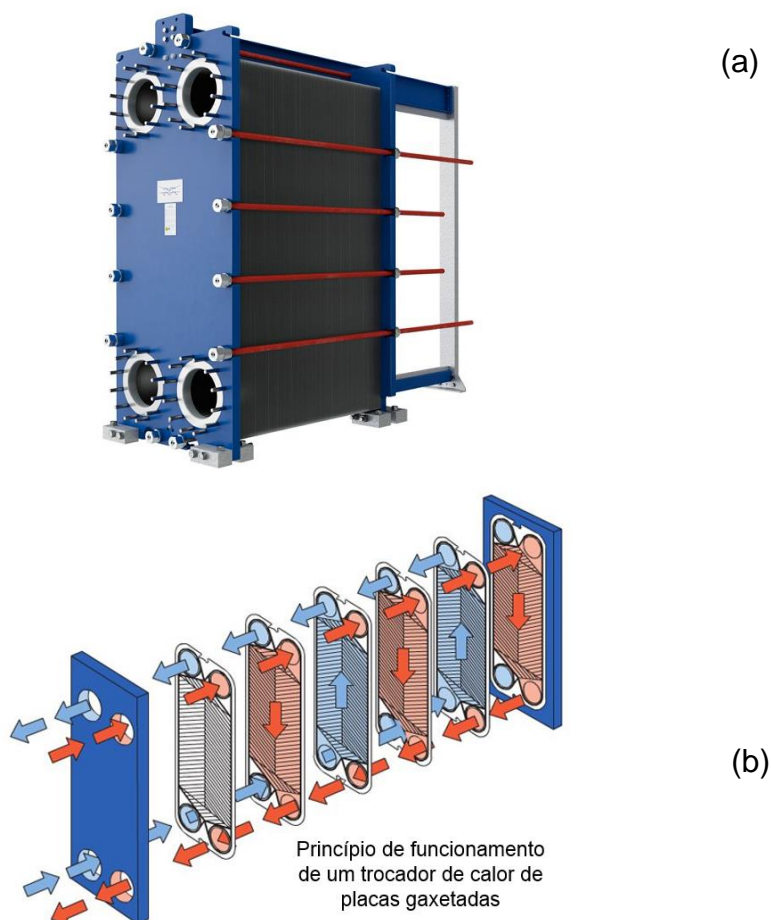


Fonte: COMSOL (2018).

Os permutadores de placas têm funcionamento diferente. Placas corrugadas retangulares são montadas em pacotes, de modo que a angulação dos canais – conhecida como ângulo de Chevron – forme galerias por onde o fluido escoará. Tais placas detêm furos nos cantos, que, ao serem comprimidos nos pacotes de placas, formam canais tubulares por onde os fluidos entrarão nas galerias (KAKAÇ; LIU; PRAMUANJAROENKIJ, 2012).

Tomando a visão isolada de apenas uma placa, que funcionará como meio sólido para a transferência de calor, um lado desta entrará em contato com o fluido quente e o outro com o fluido frio. É importante, também, destacar que a construção de placas é subdividida de acordo com o tipo de ligação utilizado entre as placas: por gaxetas, por embrasamento ou por solda. A figura 3-a mostra a montagem geral do permutador de placas gaxetadas, enquanto a figura 3-b ilustra o escoamento do mesmo.

Figura 3 – Permutador de calor de placas gaxetadas. a) Permutador montado; b) Funcionamento do permutador.



Fonte: Adaptado de Alfa Laval (2018).

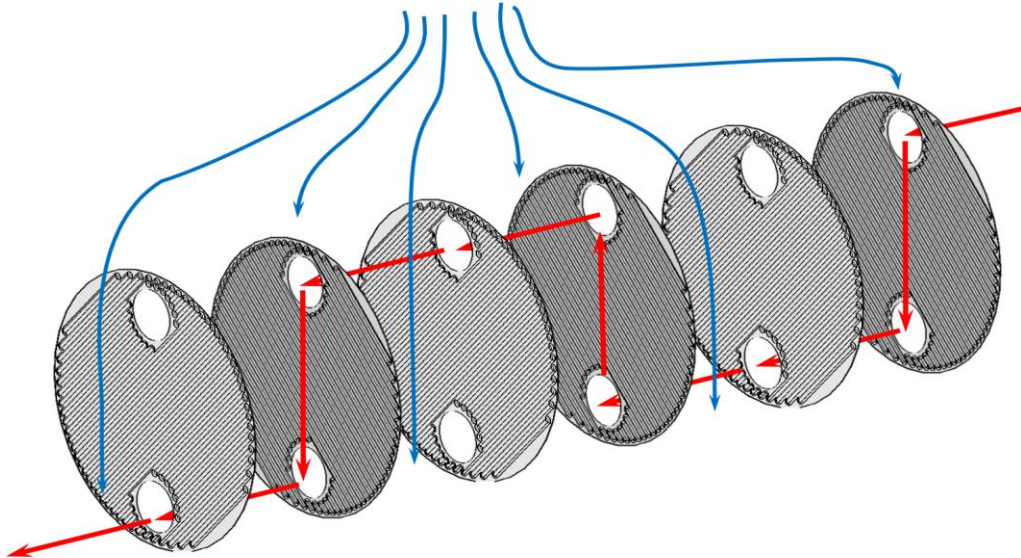
Um terceiro tipo de permutador é o de casco e placas, ou PSHE, objeto de estudo deste trabalho a ser detalhado na subseção a seguir.

2.1.1 PSHE

O permutador casco-placas soldadas foi patenteado pela empresa Vahterus em 2002 (KONTI, 2002). Este permutador é composto por um pacote de placas corrugadas circulares soldadas, com orifícios para entrada e saída do fluido. O diâmetro das placas pode variar entre 200 a 1500 mm. Geralmente as placas são fabricadas em titânio ou em aço inoxidável 316 L com espessura entre 0,6 e 0,9 mm.

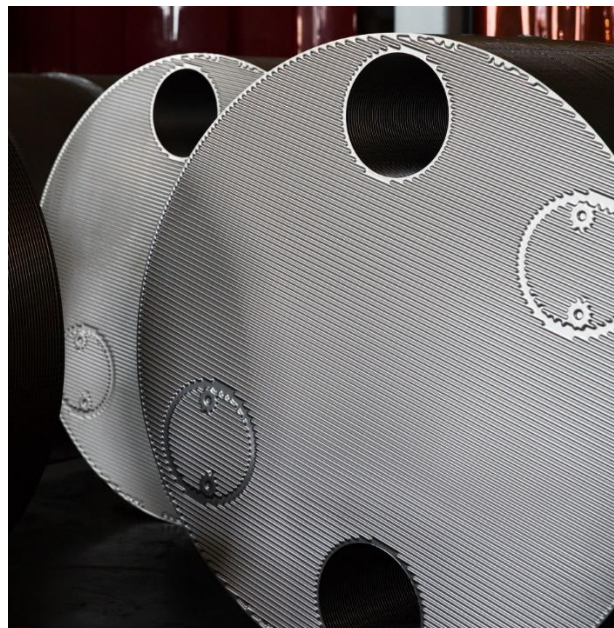
A figura 4 mostra a configuração montada. Outra singularidade deste modelo é o formato circular das placas, como exemplificado na figura 5.

Figura 4 – Funcionamento do permutador de calor de casco e placas: As setas vermelhas representam o caminho percorrido pelo fluido interno às placas e as linhas de corrente azuis representam o caminho do fluido externo, provindos do escoamento no casco.



Fonte: Autora (2019).

Figura 5 – Conjunto de placas interno

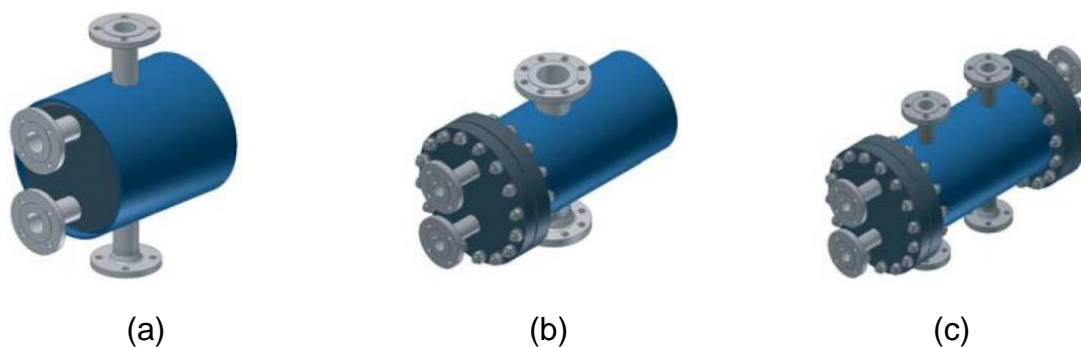


Fonte: Vahterus (2018).

No permutador PSHE um dos fluidos entra nas galerias das placas através do escoamento do casco e, em contracorrente, o outro entra por bocais soldados aos furos das placas. As placas são soldadas em pares adjacentes em seus perímetros, constituindo um volume isolado para um dos fluidos. Cada par de placas é então soldado a outro conjunto, formando assim um recheio (*plate pack*).

O casco pode ser encontrado de forma totalmente soldada, com uma e com duas extremidades parafusadas, como mostrado nas figuras 6-a, 6-b e 6-c respectivamente. A última opção oferece maior flexibilidade para manutenção, limpeza e inspeção.

Figura 6 – Configurações de casco. a) Extremidades soldadas; b) Uma extremidade parafusada; c) Extremidades parafusadas.



Fonte: Protherma (2018).

O casco cilíndrico promove maior tolerância a altas pressões em comparação aos trocadores de placas (FREIRE; ANDRADE, 2014) e o conjunto de placas é mais compacto que feixes de tubos, requerendo menor espaço de trabalho, além de promover maior rendimento térmico do que os permutadores de casco e tubos.

2.2 INTERAÇÃO FLUIDO-ESTRUTURA (FSI)

Estruturas em contato com escoamentos, sejam naturais (por exemplo, correntes de vento e oceânicas) ou feitos pelo homem, estão inevitavelmente sujeitas a forças e vibrações induzidas por tais escoamentos. De folhas de plantas a sinais de trânsito, a estruturas mais substanciais, como decks de pontes e tubos de permutadores de calor. Essas vibrações podem ser de pequena ou grande amplitude e

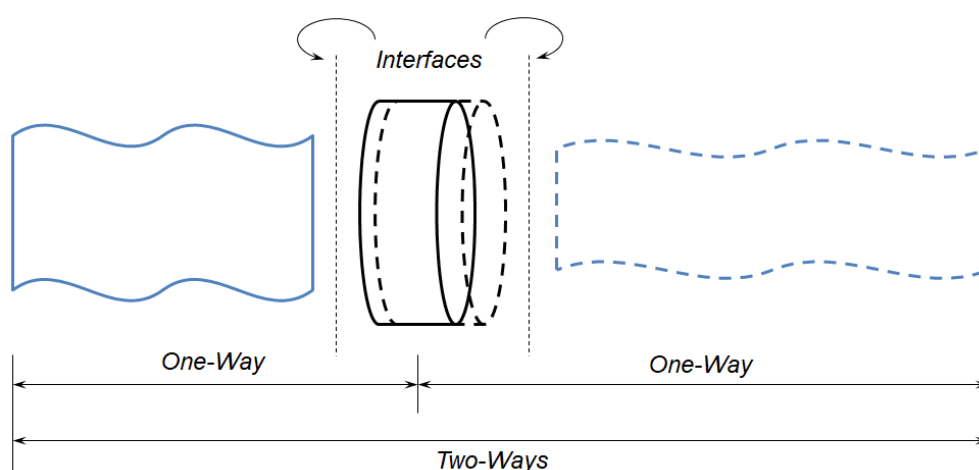
podem tanto ser irrelevantes como de preocupação leve ou até graves (PAÏDOUSSIS; PRICE; LANGRE, 2011, p. ix, tradução nossa).

Tal reação de estruturas sólidas à influência de escoamentos fluidos descrita por Païdoussis, Price e Langre (2011) é chamada de interação fluido-estrutural. A recíproca da excitação também é abordada, bem como a excitação mútua. A figura 7 ilustra o acoplamento entre os domínios fluido (em azul) e sólido (em preto). À esquerda, em linha preenchida, representa-se o estado não excitado no fluido e do sólido. Uma vez que o fluido atinge a interface (exageradamente deslocada dos domínios para melhor visualização), este excita o sólido, fazendo-o ser deslocado ao estado tracejado. Esta interação direta, do fluido com o sólido ou do sólido com o fluido, é chamada de via única (do inglês, one way).

Uma vez que o estado excitado do sólido continua a se deslocar, certa perturbação é causada no domínio fluido. A abordagem que considera também esta recíproca do sólido para o fluido é chamada de análise de duas vias (do inglês, two ways).

Interações que apresentam grandes campos de tensão e deslocamento são analisadas em regime de realimentação em duas vias. Porém, a análise em via única é menos custosa temporalmente e computacionalmente.

Figura 7 – Abordagens de interação fluido-estrutural



Fonte: Autora (2019). Em preto: domínio sólido; Em azul: domínio fluido; Linha preenchida: estado não perturbado; Linha tracejada: estado perturbado.

O presente trabalho abordará a metodologia de via única, na qual apenas as excitações provindas do fluido, térmica e mecânica, que resultam em campos de tensões e deslocamentos no sólido são avaliadas. O domínio fluido é caracterizado como o escoamento interno nas placas do PSHE e o domínio sólido é o descrito como o par de placas analisado.

2.3 MODELAGEM MATEMÁTICA E COMPUTACIONAL

Três abordagens são comumente utilizadas no estudo de problemas físicos: analítica, experimental e numérica. Permutadores de calor bem consolidados na literatura apresentam extensas correlações analíticas e semi-empíricas para a obtenção de parâmetros importantes para sua operação. São exemplos os permutadores de casco-e-tubos e os de placas. Uma vez que os permutadores do tipo PSHE são de aplicação recente, as referências de estudos analíticos são escassas, dificultando o trabalho com tal abordagem. Por sua vez, testes experimentais são custosos, tanto financeiramente como em tempo, o que limita sua aplicação.

Por tais motivos, optou-se por utilizar a abordagem numérica para o presente estudo. Nas subseções seguintes, são apresentadas as teorias de análise numérica para resolução dos domínios fluido e sólido, o método dos elementos finitos e o método dos volumes finitos, respectivamente. Tais métodos baseiam-se na discretização das equações que regem o problema físico de cada domínio.

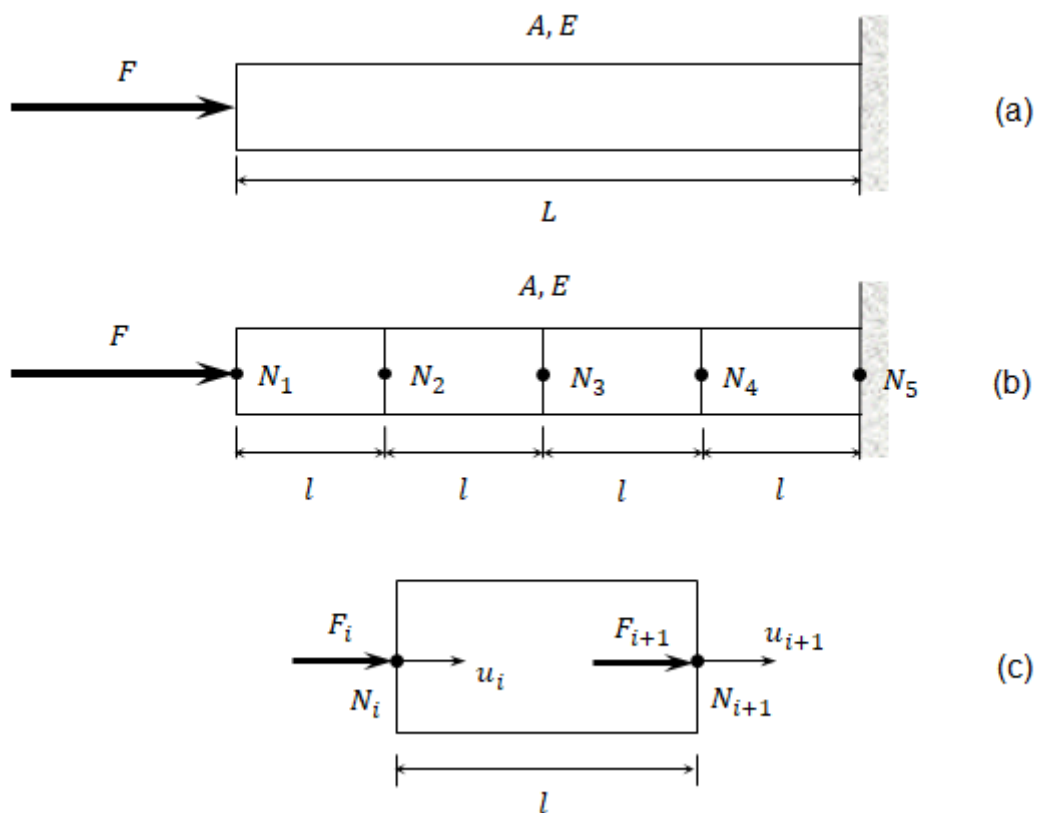
2.3.1 Método dos Elementos Finitos (MEF)

O método de Elementos Finitos (MEF) consiste na discretização do modelo contínuo, a aplicação do equacionamento nas seções e suas conexões e a resolução do sistema global com base neste conjunto de equações. Neste âmbito, as seções são chamadas de elementos e as conexões de nós.

A figura 8a ilustra uma viga engastada de comprimento L , área de seção transversal A e módulo de elasticidade E_s sofrendo carregamento axial F . Ela é então seccionada em quatro elementos (figura 8b) de comprimento $l = L/4$, sem alteração

em A , E_s e F . As equações do estado de carregamento uniaxial não são mais descritas para toda a viga, mas para cada um dos elementos, nos nós N_i ($i = 1, \dots, 5$). O sistema de equações é linear e resolvido matricialmente de modo a encontrar a matriz de rigidez global.

Figura 8 – Discretização em elementos. a) Viga com carregamento axial; b) Discretização da viga; c) Deslocamentos do elemento.



Fonte: Autora (2019).

A figura 8c evidencia os deslocamentos internos no i -ésimo elemento da estrutura. Alves Filho (2000) cita que “a configuração deformada da estrutura é determinada por intermédio dos deslocamentos dos nós, qualquer que seja a forma da estrutura e o tipo de carregamento”. O autor ainda comenta que os deslocamentos nodais são chamados de variáveis de estado, pois governam e descrevem o estado de equilíbrio da estrutura e por meio deles é possível determinar as tensões internas.

O método não se limita à mecânica dura, podendo ser aplicado em problemas de dinâmica de fluidos, transferência de calor e eletromagnetismo. No contexto da

mecânica dos sólidos, são quatro as principais hipóteses simplificativas utilizadas no desenvolvimento da modelagem (e discretização) de elementos finitos: regime linear elástico, pequenas deformações, material isotrópico e pequenos deslocamentos.

As três primeiras hipóteses estão ligadas ao material utilizado. Considera-se que a solicitação aplicada não força o material além do regime elástico, portanto, o material não apresenta deformação plástica (irreversível). Junto a isso, as deformações presentes são pequenas em relação às dimensões iniciais do sólido, o que simplifica a análise para materiais de rigidez relativamente elevada (elastômeros, por exemplo, são excluídos por esta hipótese e devem ser modelados de forma mais robusta).

A hipótese de material isotrópico exclui o tratamento de sólidos que apresentam reação à solicitação de forma não homogênea ao considerar o plano de atuação, como, por exemplo, compósitos. Já a hipótese de pequenos deslocamentos está ligada à definição do número de deslocamento, que define a proporção entre os deslocamentos causados pelos carregamentos externos e o comprimento nominal do sistema (PAÏDOUSSIS; PRICE; LANGRE, 2011).

No que tange a precisão do método, o resultado numérico tende a se aproximar assintoticamente do resultado real à medida que o número de elementos é aumentado. Este desvio presente é resultado do erro de discretização associado à diferença de graus de liberdade dos elementos entre os modelos físicos e matemáticos – que apresentam infinitos graus de liberdade por se tratarem de análises contínuas – e os modelos numéricos – com graus de liberdade finitos pela abordagem discreta. A quantidade de elementos é ditada pelo erro máximo objetivado pelo usuário, bem como a robustez da análise e de suas aproximações.

Cook (1995) evidencia em sua obra que a escolha dos elementos para a malha de resolução é relativa à complexidade e à geometria do sólido. Elementos mais complexos tendem a apresentar resultados melhores, porém com custo computacional elevado. Elementos triangulares se adaptam melhor a geometrias curvas, como esferas, cilindros e elipses. Portanto, cabe ao usuário definir a melhor configuração de resolução.

No presente estudo, o conjunto de hipóteses básicas é respeitado e, por se tratar de geometrias complexas e com predominância de formas curvilíneas, elementos do tipo plano triangular com deformações lineares é predominante.

2.3.2 Método dos Volumes Finitos (MVF)

Assim como em elementos finitos, o método dos volumes finitos visa a linearização das equações diferenciais que regem o problema físico fluidodinâmico e térmico para a resolução computacional.

Maliska (2017) cita dois métodos equivalentes de obtenção das equações da conservação aproximadas no método de volumes finitos: o balanço das propriedades investigadas no volume de fluido infinitesimal e a integração das equações conservativas (diferenciais) neste volume.

As equações 1, 2 e 3 evidenciam as equações da conservação de massa, quantidade de movimento linear e de energia, respectivamente (BEJAN, 2013 apud MALISKA, 2017, p. 12).

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho u_j) = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho u_i) + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho u_j u_i) = \frac{\partial P_1}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\mu \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right) + S^{u_i} \quad (2)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho T) + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho u_j T) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{k}{c_p} \frac{\partial T}{\partial x_j} \right) + S^T \quad (3)$$

Nas equações acima, os termos apresentados com índices i e j fazem referência às coordenadas cartesianas x , y e z , por meio de notação indicial. As variáveis presentes nas equações 1-3 são as seguintes:

- ρ Densidade do fluido;
- t Variável tempo;

x_i, x_j	Coordenadas espaciais do sistema cartesiano;
u_i, u_j	Componentes de velocidade vetor $\vec{u} = (u_x, u_y, u_z) = (u, v, z)$;
P_1	Força de superfície (pressão);
μ	Viscosidade do fluido;
S^{u_i}	Termo fonte relativo a cada componente de velocidade;
T	Temperatura do fluido;
k	Condutividade térmica do fluido;
c_p	Calor específico do fluido (pressão constante);
S^T	Termo fonte relativo ao balanço de energia.

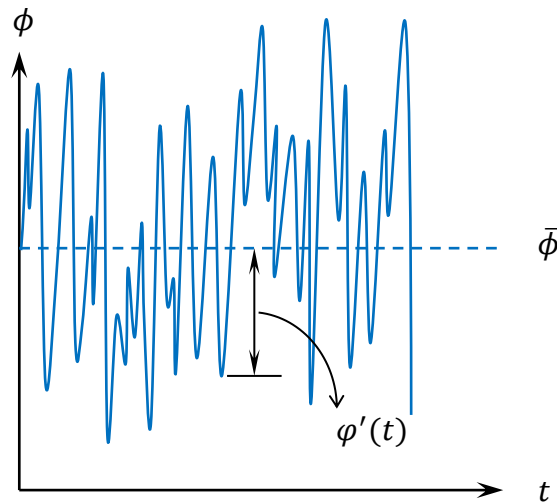
Os problemas aqui descritos seguem as hipóteses de fluido incompressível (ρ constante), viscoso ($\mu \neq 0$), sem fontes ou sumidouros de momentum linear e de energia ($S^{u_i} = S^T = 0$), com propriedades constantes (c_p, k constantes) e sem a presença de forças de campo (campos gravitacionais ou eletromagnéticos, por exemplo).

2.3.2.1 Turbulência

Versteeg e Malalasekera (2007) definem turbulência como o regime após o número de Reynolds crítico, Re_{crit} , no qual o fluido deixa de ter características ordenadas e toma comportamento instável, mesmo com a imposição de condições de contorno constantes, e as propriedades variam de modo aleatório e caótico.

Tal comportamento gera perfis de propriedades como o da figura 9, com características oscilatórias. De modo a modelar a turbulência, a propriedade é descrita tal como a equação 4, na qual $\bar{\phi}$ é a média temporal dos valores e $\phi'(t)$ é a componente de flutuação dos mesmos, chamada de decomposição de Reynolds.

Figura 9 – Perfil com flutuações e média das propriedades



Fonte: Autora (2019).

$$\phi(t) = \bar{\phi} + \phi'(t) \quad (4)$$

Versteeg e Malalasekera (2007) salientam que independentemente da dimensão espacial do problema, flutuações turbulentas sempre apresentarão características tridimensionais. Os autores ainda desenvolvem discussão acerca das estruturas rotacionais do problema de turbulência, chamados de vórtices turbulentos, e de suas escalas. De modo geral, uma formulação robusta acerca da natureza, do comportamento e da modelagem de escoamentos turbulentos pode ser encontrada na obra dos autores.

Versteeg e Malalasekera (2007) definem três razões de escalas para o problema: razão de escala de comprimento, de velocidade e de tempo (equações 5, 6 e 7, respectivamente). Fazendo uso dessas escalas, é possível estimar a magnitude dos vórtices criados no escoamento e definir qual a melhor abordagem numérica para sua modelagem.

$$\frac{\eta}{\ell} = Re_{\ell}^{-3/4} \quad (5)$$

$$\frac{\tau}{T_{max}} = Re_{\ell}^{-1/4} \quad (6)$$

$$\frac{v_{min}}{\mathbb{V}} = Re_{\ell}^{-1/4} \quad (7)$$

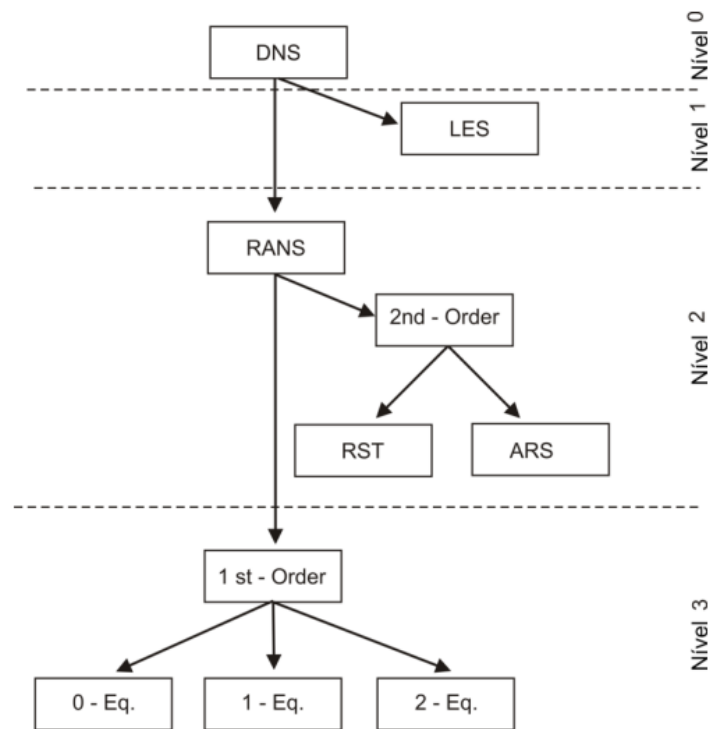
As variáveis presentes nas equações 5-7 são as seguintes:

- η Menor escala de comprimento (comprimento de Kolmogorov);
- ℓ Maior escala de comprimento;
- τ Menor escala de tempo;
- T_{max} Maior escala de tempo;
- v_{min} Menor escala de velocidade;
- \mathbb{V} Maior escala de velocidade;
- Re_{ℓ} Número de Reynolds avaliado na maior escala de comprimento.

Através da teoria de Kolmogorov para microescalas, uma única escala pode ser deduzida a partir das equações 5-7, esta, dada na equação 8, onde ν é a viscosidade cinemática e ε é a taxa de dissipação de energia. Ao que cabe a este estudo, o fluxograma ilustrado na figura 10 mostra as abordagens utilizadas para cada escala de turbulência.

$$\eta = \left(\frac{\nu^3}{\varepsilon} \right)^{1/4} \quad (8)$$

Figura 10 - Hierarquia dos modelos atuais de turbulência. Abreviações: DNS = Direct Numerical Simulation; LES = Large Eddy Simulation; RANS = Equações da Conservação Média de Reynolds; 1st order = fechamento da turbulência de primeira ordem; 2st order = fechamento da turbulência de segunda ordem; RST = Modelos de transporte da Tensão de Reynolds; ARS = Modelos algébricos da Tensão de Reynolds; 0-, 1-, 2-Eq = Modelos de zero, uma e duas equações.



Fonte: Adaptado de Blazek (2001) apud Possamai (2014).

O método DNS (Direct Numerical Simulation) leva em consideração pequenas escalas de vórtices; o método LES (Large Eddy Simulation) trata os vórtices de maior escala e o método RANS (Reynolds Average Numerical Simulation) modela o escoamento com base na média de Reynolds aplicada às flutuações.

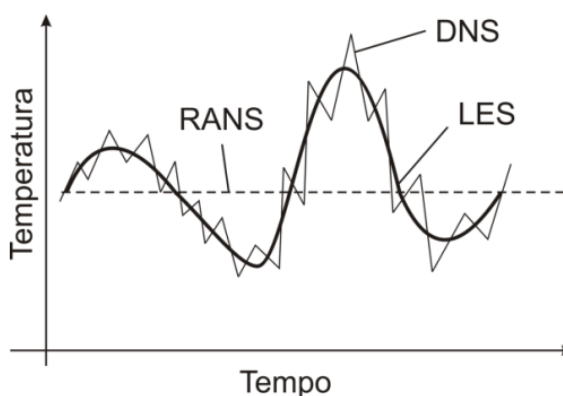
Na figura 10, a indicação dos níveis à direita demonstra o decréscimo do aprofundamento na resolução da turbulência, sendo o nível 3 o menos aprofundado. Neste nível, estão indicados os modelos chamados de primeira ordem, representados pelo modelo algébrico (0 equações) e o modelo de uma ou duas equações. São resolvidos pelo método RANS e baseados na hipótese de Boussinesq. Os modelos $k - \varepsilon$ e $k - \omega$ sst (ou SST) são exemplos de modelos de duas equações: o modelo $k - \varepsilon$ avalia bem as médias de flutuações e tende a convergir mais rápido, porém não consegue calcular com tanta precisão o comportamento da camada limite próxima a

anteparos sólidos. Para tanto, o modelo SST é preferível pois, em detrimento do custo computacional, os resultados no limite sólido-fluido têm maior exatidão (VERSTEEG; MALALASEKERA, 2007).

No nível 2 encontram-se os modelos de segunda ordem, onde a hipótese de Boussinesq pode ser aplicada novamente, bem como a resolução de uma equação de transporte para o tensor de Reynolds.

No primeiro nível, os métodos LES e DNS são utilizados, respectivamente, resolvendo-se as equações da conservação com e sem filtro de escalas de vórtices. A figura 11 ilustra a abordagem de cada método diante de um perfil de temperatura hipotético.

Figura 11 - Representação da diferença na solução de um mesmo ponto fixo de um escoamento turbulento em regime permanente através dos modelos DNS, LES e RANS.



Fonte: Possamai (2014).

Tascheck (2019) desenvolve a análise numérica comparativa com os modelos de turbulência $k - \varepsilon$ e $k - \omega$ sst e evidencia as faixas de regime turbulento em que cada um é aceitável para o caso de duas placas de PSHE abordado neste estudo. Uma vez que as análises estão prontas, os resultados para o modelo $k - \omega$ sst serão utilizados para a análise FSI neste trabalho. O modelo térmico será adicionado ao escoamento com o auxílio da ferramenta Ansys CFX, que o resolve por volumes finitos.

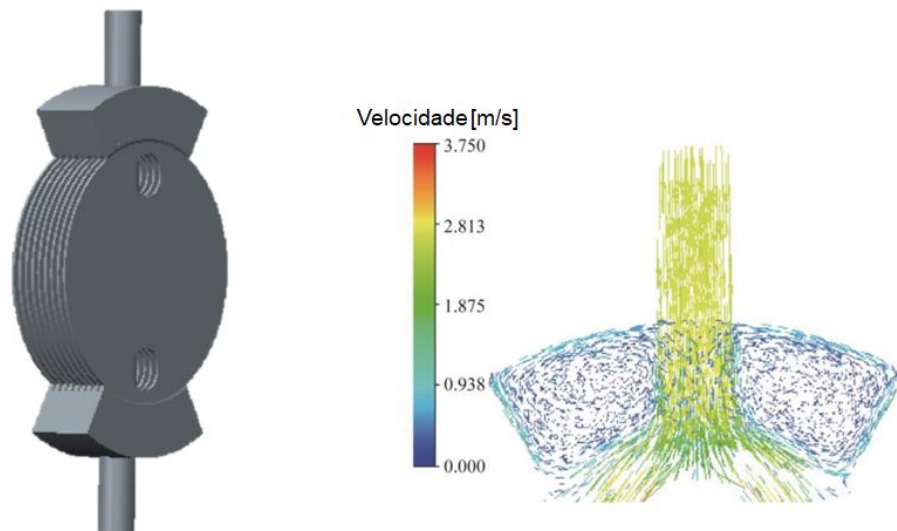
3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Por se tratar de uma patente recente, os estudos em permutadores de calor do tipo PSHE são escassos, tanto na área experimental como na área numérica. Todavia, permutadores dos tipos casco e tubo e de placas já foram amplamente estudados, fornecendo dados para comparação.

Monteiro e Mello (2012) utilizam uma versão simplificada de um permutador de placas e aletas, desprezando os efeitos de entrada e saída e empregando condição de periodicidade nas partes inferior e superior da seção escolhida para análise de temperatura. A condição de operação do permutador variava entre 200°C e 1000°C.

Liu et al (2015) desenvolveram um estudo numérico para determinar a distribuição de fluido dentro de um permutador do tipo PSHE, focando no bocal de entrada de fluido do casco. O aparelho era formado por seis placas de 257mm de diâmetro com onze canais e apêndices semi-circulares na entrada e na saída de fluido. Tais apêndices foram adicionados para promover maior uniformidade ao escoamento. A faixa de escoamento analisada fora de $Re = 715$ até $Re = 4092$, com resultados satisfatórios quanto ao acoplamento dos apêndices em relação à uniformidade na distribuição do fluido no PSHE e à diminuição na queda de pressão. As figuras 12a e 12b ilustram a geometria utilizada e o campo de velocidades resultante.

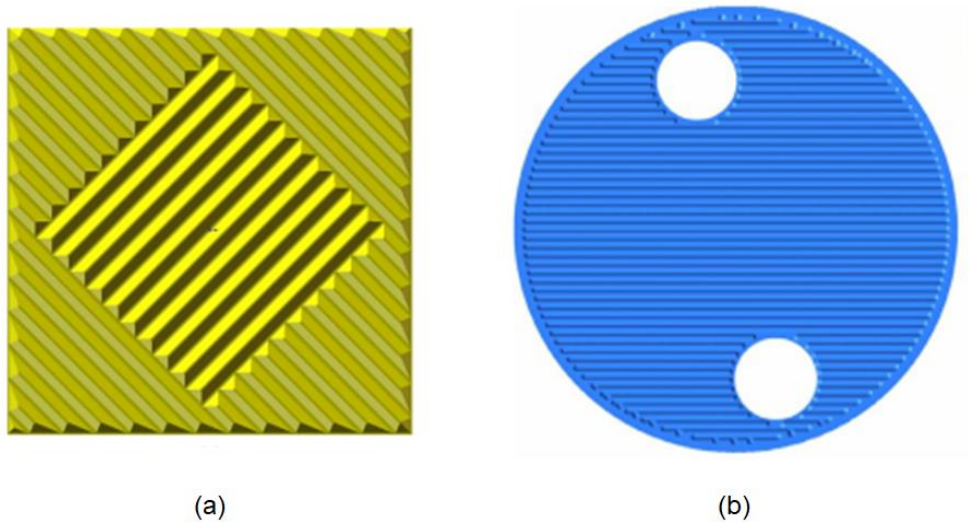
Figura 12 – Geometria e campo de velocidades resultante de Liu et al (2015)



Fonte: Adaptado de Liu et al (2015).

Luan et al (2017) analisaram dois tipos de permutadores: um permutador de placas em bloco (célula unitária isolada do permutador) de ângulo de Chevron de 45° e dimensões de corte de aproximadamente 440 mm x 440 mm e um PSHE com $\beta = 75^\circ$ e diâmetro de 440 mm. A figura 13 mostra as geometrias avaliadas. Tanto o escoamento do casco como o da placa foram avaliados na geometria do PSHE e a faixa de Reynolds para ambos fora de $300 < Re < 10000$. Evidencia-se também que foram aplicadas medidas de refino de malha localizado para melhor análise dos pontos de contato.

Figura 13 – Geometrias analisadas em Luan et al (2017). a) bloco do permutador de placas; b) PSHE.

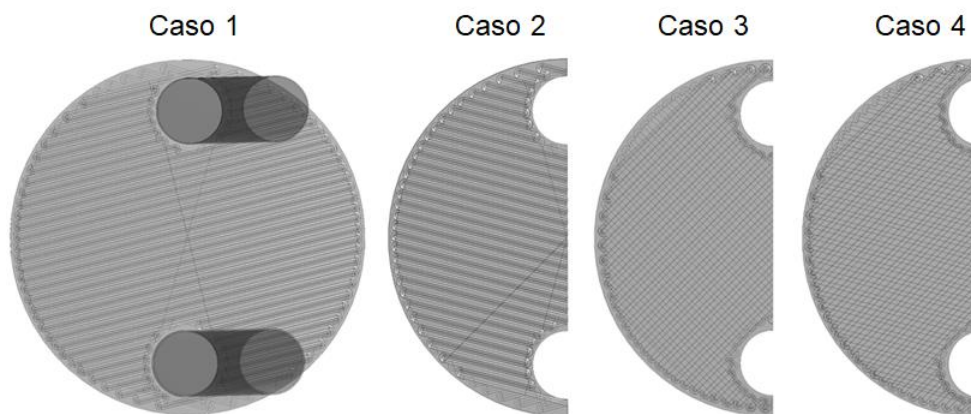


Fonte: Adaptado de Luan et al (2017).

Testes experimentais foram desenvolvidos para validação dos resultados numéricos. Para o domínio do escoamento interno às placas, o desvio do fator de transferência de calor de Colburn entre o as análises numérica e experimental fora de $\pm 15\%$ para $300 < Re < 7000$. Os autores também concluem que existe um limite para a influência do aperto entre as placas no desvio dos resultados entre as análises experimental e numérica

Tascheck (2019) desenvolveu a análise do escoamento interno de placas de permutares PSHE para três ângulos de Chevron diferentes: $\beta = 15^\circ \times 15^\circ$, $\beta = 45^\circ \times 45^\circ$ e $\beta = 15^\circ \times 45^\circ$. Todos os três tipos de placas detinham diâmetro de 300 mm. Após estudo de viabilidade, a condição de vazão fora imposta como perpendicular à superfície cilíndrica de entrada e as placas apresentavam condição de simetria. A placa de ângulo 15° também fora analisada sem a condição de simetria para comparação. A validação do estudo fora feita com base no trabalho de Beckedorf et al (2019). A figura 14 mostra as geometrias analisadas.

Figura 14 – Domínio computacional: Caso 1: placa corrugada com tubos acoplados aos bocais de entrada e saída para $\beta = 15^\circ \times 15^\circ$; Caso 2: metade de uma placa corrugada para $\beta = 15^\circ \times 15^\circ$; Caso 3: metade de uma placa corrugada para $\beta = 45^\circ \times 45^\circ$; Caso 4: metade de uma placa corrugada para $\beta = 45^\circ \times 15^\circ$

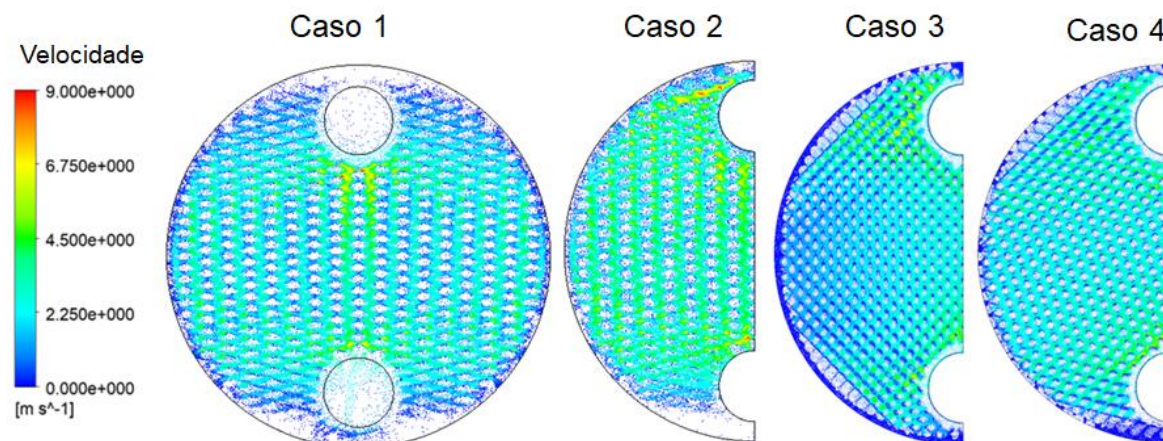


Fonte: Adaptado de Tascheck (2019).

A comparação entre os modelos de turbulência $k-\omega$ SST e $k-\varepsilon$ fora desenvolvida e demonstrou melhor desempenho do SST para malhas mais refinadas e do $k-\varepsilon$ para malhas mais grosseiras. A queda de pressão para as configurações $45^\circ \times 45^\circ$ e $15^\circ \times 45^\circ$ demonstraram bom desempenho quanto ao desvio em relação ao trabalho de Beckedorf et al (2019) – cerca de 15% - enquanto a configuração de $15^\circ \times 15^\circ$ mostrou divergência de resultados.

Já o comportamento fluidodinâmico mostra que há predominância do escoamento na vertical (sentido da linha de centro dos furos de entrada e saída), com presença de vórtices na saída e pequenas variações de velocidade na seção transversal dos canais para a maioria dos casos. A figura 15 mostra os resultados para o campo de velocidades.

Figura 15 – Campo de velocidades graficado em um plano situado entre as placas: Caso 1 (M22, SST - $Re = 4451$), Caso 2 (M4, SST - $Re = 4451$), Caso 3 (M21, SST - $Re = 4643$) e Caso 4 (M21, SST - $Re = 4005$). Bocal de entrada está localizado no lado superior da placa.



Fonte: Adaptado de Tascheck (2019).

Já nas análises de elementos finitos, trabalhos relativos ao problema de fadiga, térmica e mecânica, estão indicados na sequência

Em uma continuação do trabalho de Monteiro e Mello (2012), Mello et al. (2017) fazem a análise estrutural de um permutador de calor de placas e aletas ar-água. Utilizando os perfis de temperatura e pressão do primeiro estudo – em análise simplificada com condições periódicas – como condição de contorno, desenvolve a solução em elementos finitos para fadiga térmica e mecânica, dessa vez, do modelo completo.

Patil e Anand (2017) simplificam a influência térmica apenas com a inserção de temperatura nas fronteiras aliada à condução do sólido. Um ciclo linear entre os picos de operação, ignorando o transiente real do sistema. Os valores máximos encontrados para o ciclo foram de 260°C para o ramal quente e 22°C para o ramal frio, com pressões de 6 MPa a 0,1 MPa. Já para os valores mínimos, obtiveram 200°C para o ramal quente e 160°C para o ramal frio, com pressões de 6 MPa a 2 MPa. Também nos resultados, a análise cíclica mostrou que a influência do campo de temperaturas é mais aparente do que o de pressões para o problema apresentado.

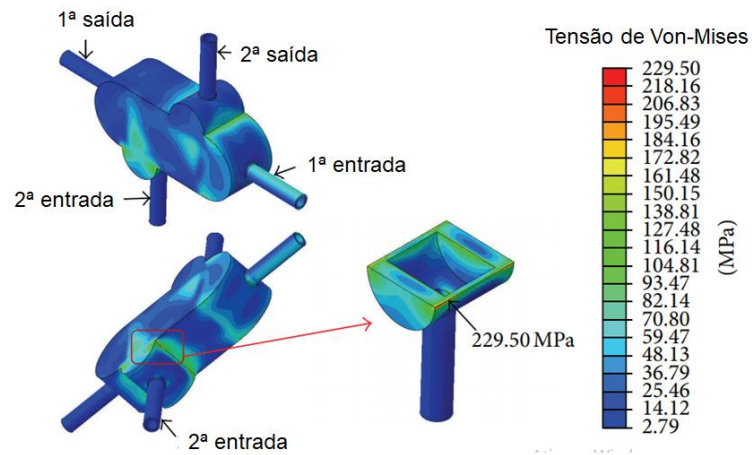
Song, Hong e Park (2012) trabalham com um permutador PHE de pequeno porte gás-gás, adicionando também condições de contorno prescritas de temperatura, não resolvendo o problema fluidodinâmico. A convergência resultou em pressões de 3 MPa e 0,1 MPa para os ramais e temperaturas de operação com máximo em 850°C

e mínimo em 450°C. Tal abordagem é amplamente utilizada em trabalhos que objetivam os resultados globais do sistema, mas acabam deixando de lado dados de concentração de tensões térmica e mecânica, bem como o problema de má-distribuição do fluido encontrado em permutadores de calor, que acarreta no desvio da hipótese de homogeneidade do escoamento e por consequência nos perfis de temperatura e pressão.

Dentro da análise estrutural, outro ponto passível de dedicação são os pontos de contato dos sólidos. Em estruturas complexas como as placas do PSHE, pontos de contato podem ser modificados à medida em que o permutador é submetido a cargas cíclicas, gerando tensões deslocadas e mudanças no escoamento. Freire e Andrade (2014) analisaram os pontos de contato de placas de PSHE, de maneira simplificada, com condições de pressão (166 bar para um lado da placa e 64,5 bar para o outro) e temperatura prescritas, com o objetivo de verificar se a junção suportaria as cargas impostas.

Song e Hong (2013) investigaram as características estruturais macroscópicas de um protótipo em escala de laboratório de um trocador de calor compacto (PCHE) feito de aço 316l. Modelagem em elementos finitos, análise térmica e análise estrutural sob alta temperatura foram desenvolvidas. A figura 16 mostra os contornos de tensão nas superfícies externas do PCHE resultantes da análise. Em adição aos testes em bancada, os autores determinaram experimentalmente as propriedades do material e da solda aplicada, dados estes que serão revisitados no presente estudo.

Figura 16 – Contornos de tensão do exterior do PCHE.



Fonte: SONG; HONG, 2013.

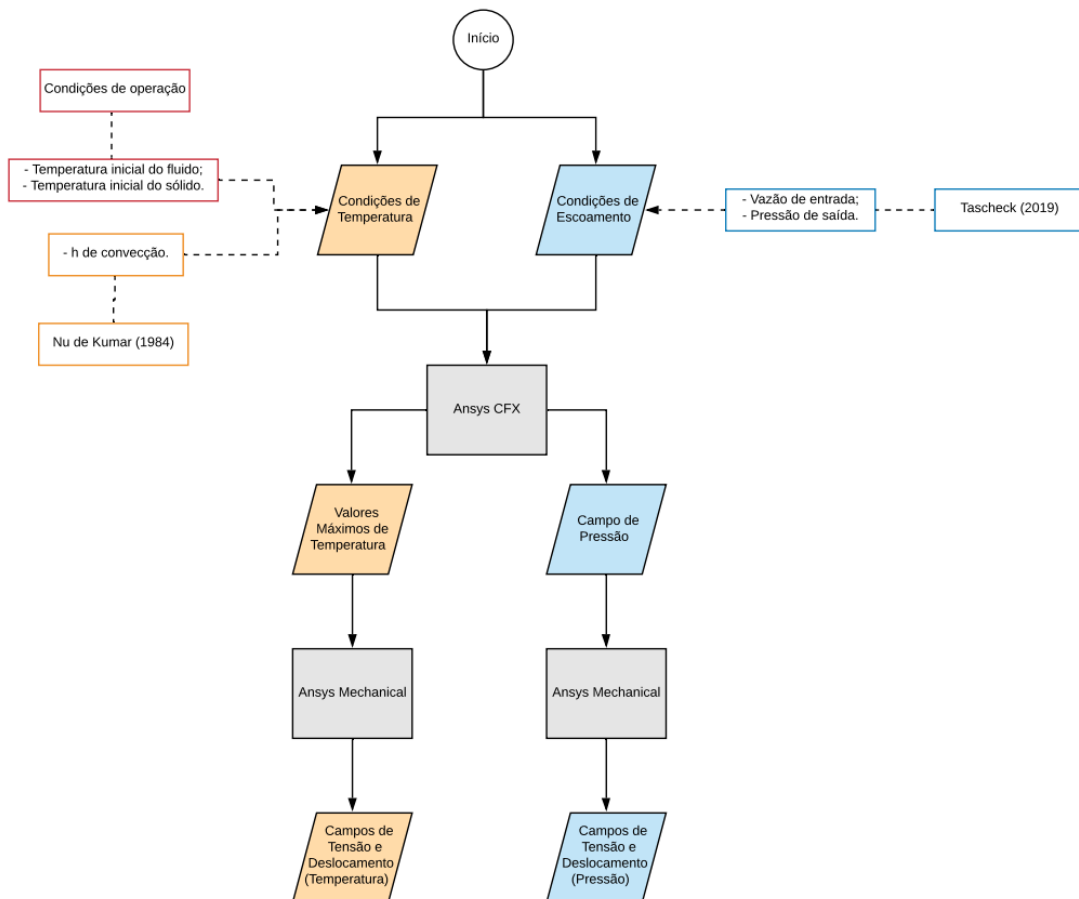
O presente trabalho contribui para a área, uma vez que análises de tensões térmicas e mecânicas providas de escoamento, bem como o acoplamento dos dois carregamentos, para permutadores de calor do tipo PSHE não são encontradas na literatura atual.

4 METODOLOGIA

O presente estudo desenvolveu-se com o auxílio de ferramentas numéricas comerciais de forma acoplada, para que o fenômeno físico fosse abrangido em sua totalidade – salvo hipóteses simplificativas. A figura 17 ilustra a metodologia de abordagem numérica.

As ferramentas computacionais utilizadas foram: Ansys Design Modeler e Solid Works para a modelagem da geometria; Ansys Meshing para o cálculo da malha de resolução; Ansys CFX para a resolução do escoamento e Ansys Static Structural para a resolução das tensões e deslocamentos no sólido.

Figura 17 – Ilustração esquemática da metodologia de cálculo



Fonte: Autora (2019).

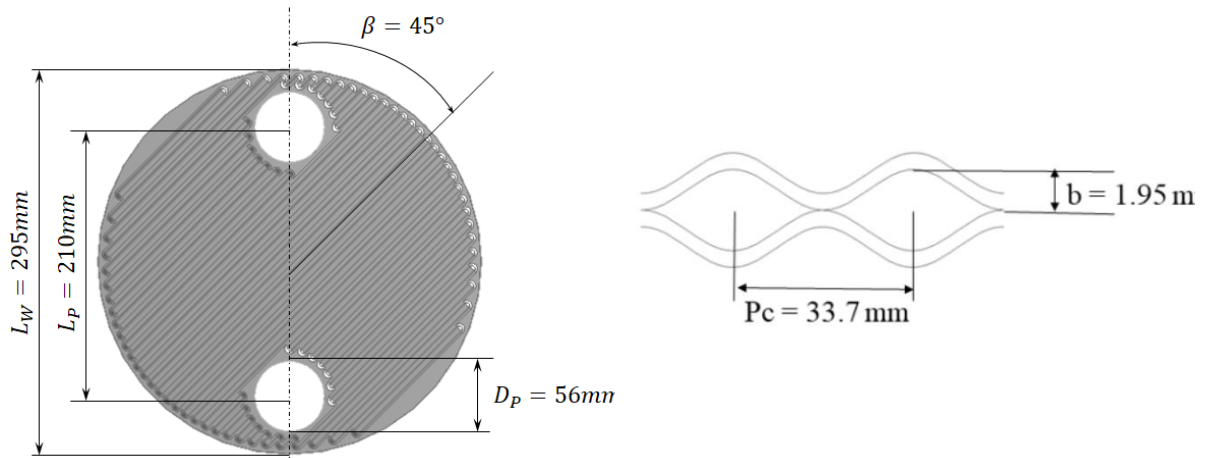
Na figura 17, ainda, elencam-se as fontes de dados utilizadas para modelar as condições de contorno. As condições de vazão de escoamento na entrada, pressão de saída e a geometria de análise foram retiradas de Tascheck (2019). Os limites de temperatura foram baseados na condição de operação do permutador de calor e coeficiente de convecção utilizado na interface fluido-sólido fora obtido por meio da correlação de número de Nusselt para permutadores do tipo PHE com ângulo de Chevron $\beta = 45^\circ$ descrita em Kumar et al (1984).

A descrição dos domínios fluido e sólido, da malha de resolução de cada um deles e das condições de contorno é mostrada nas subseções a seguir. É notável evidenciar que a problemática analisada demonstrou-se demasiadamente complexa para o desenvolvimento de análises analíticas ou experimentais. Desse modo, os resultados aqui obtidos serão tratados como projeções dos reais, sendo avaliadas as ordens de grandeza e os comportamentos qualitativos, guardadas suas devidas simplificações.

4.1 DOMÍNIOS DE ANÁLISE

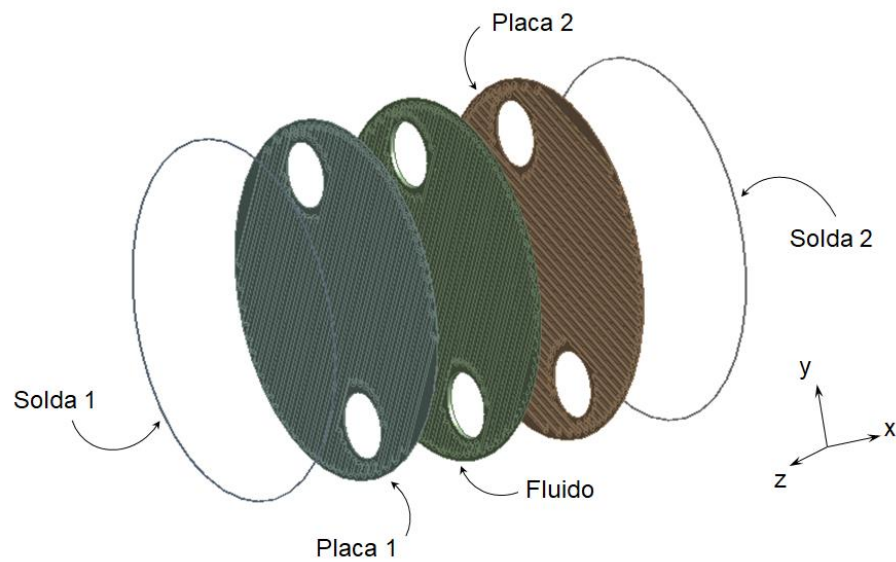
O objeto de análise é formado por um par de placas corrugadas de permutador de calor do tipo PSHE – ambas com ângulo de Chevron $\beta = 45^\circ$ – e do volume de fluido formado por este par. A junção das placas é modelada como dois aros de seção retangular unidos por condições de contato com restrição de movimento, simulando a solda. A zona termicamente afetada não fora modelada separadamente por motivos de simplificação do problema. A figura 18 mostra as dimensões gerais da placa. A figura 19 ilustra a disposição do domínio de solução numérica em forma de vista explodida.

Figura 18 – Dimensões da placa



Fonte: Autora (2019).

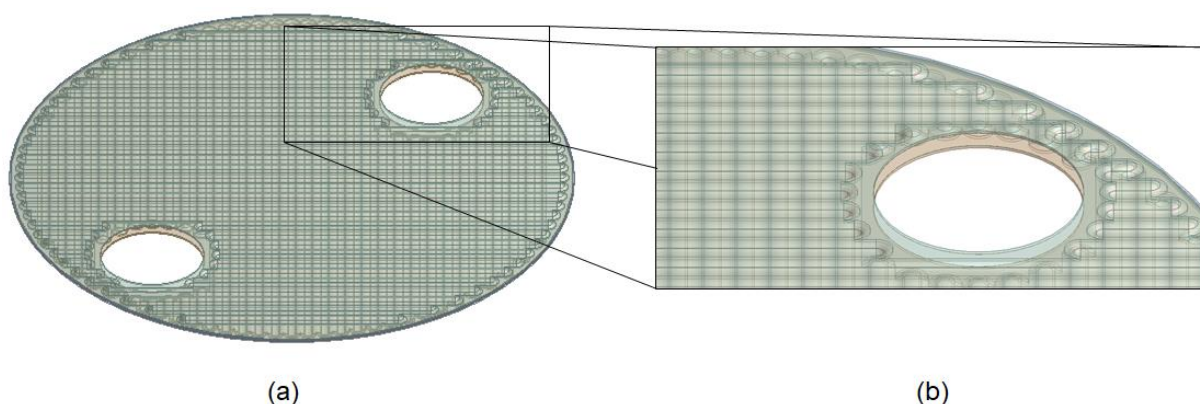
Figura 19 – Vista explodida



Fonte: Autora (2019).

As figuras 20a e 20b ilustram, respectivamente, a montagem dos domínios com ênfase na galeria de fluido resultante (malha perpendicular) e o detalhe da vista interna da superfície de entrada.

Figura 20 – Visualização da montagem dos domínios. a) Domínios agrupados; b) Detalhe da entrada de fluido



Fonte: Autora (2019)..

Como hipótese simplificativa, o domínio fluido é formado por água líquida (monofásico) e as placas são feitas de aço 316L. Os valores inseridos inicialmente, para cada caso, para os números de Nusselt e Prandtl e para o coeficiente de transferência de calor por convecção são expostos na tabela 1 e foram calculados de acordo com as correlações de Kumar et al. (1984).

Uma vez que o processo de soldagem altera as propriedades mecânicas do material, decidiu-se por utilizar os dados obtidos no trabalho de Song e Hong (2013). Nota-se que a referência pode ser considerada como uma continuação do trabalho de Song, Hong e Park (2012), no qual as definições do método de soldagem são descritas e o mesmo coincide com o utilizado no presente estudo – método TIG (gás inerte de tungstênio). Os valores indicados por Song e Hong (2013) são normalizados em relação às propriedades do material não afetado. A proporção entre os módulos de elasticidade do aço e da solda fora considerada como a mesma que existe entre seus limites de escoamento, uma vez que a região linear é regida pela equação 9 (lei de Hooke), e a variação da segunda propriedade é pequena. E é o módulo de elasticidade, σ é a tensão de resistência à tração e ε é a deformação causada pela carga nominal.

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} \quad (9)$$

As propriedades do 316L, da solda e da zona termicamente afetada (HAZ) são mostradas na tabela 2. Os valores utilizados neste estudo baseiam-se numa média entre os avaliados às temperaturas de 20°C e 100°C. O valor de massa específica utilizado fora de 8,00 g/cm³ (MATWEB, 2019) e o de coeficiente de expansão térmica fora de 1,62·10⁻⁵ °C⁻¹.

Tabela 1 – Propriedades da água

Propriedade	T _{int} T _{ext}	Valor
<i>ṁ = 0,14786 kg/s</i>		
Nu	90°C 30°C	47,096
Pr	90°C 30°C	0,9826
<i>h_{conv}</i>	90°C 30°C	3,6483 [W/m ² K]
Nu	90°C 62,5°C	46,730
Pr	90°C 62,5°C	0,9826
<i>h_{conv}</i>	90°C 62,5°C	3,620 [W/m ² K]
Nu	90°C 75°C	46,3716
Pr	90°C 75°C	0,9826
<i>h_{conv}</i>	90°C 75°C	3,178 [W/m ² K]
<i>ṁ = 0,344475 kg/s</i>		
Nu	90°C 30°C	36,743
Pr	90°C 30°C	9,93E-01
<i>h_{conv}</i>	90°C 30°C	2,907 [W/m ² K]
Nu	90°C 62,5°C	38,2608
Pr	90°C 62,5°C	0,9933
<i>h_{conv}</i>	90°C 62,5°C	3,0277 [W/m ² K]
Nu	90°C 75°C	39,6530
Pr	90°C 75°C	0,9933
<i>h_{conv}</i>	90°C 75°C	3,1378 [W/m ² K]

Fonte: Autora (2019).

Tabela 2 – Propriedades mecânicas

Propriedades 316L		
<i>Propriedade</i>	<i>Avaliado em</i>	<i>Valor</i>
Condutividade Térmica [W/m.°C]	20°C	13,94
Coeficiente de Poisson	20°C	0,30
Módulo de Elasticidade [GPa]	20°C	192,00
Condutividade Térmica [W/m.°C]	100°C	15,08
Coeficiente de Poisson	100°C	0,30
Módulo de Elasticidade [GPa]	100°C	186,00
Propriedades da Solda		
<i>Propriedade</i>	<i>Valor</i>	
Limite de Escoamento do 316L (LE_{316L})	1,000	
Limite de Escoamento da Solda	$0,929 \cdot LE_{316L}$	
Limite de Escoamento da HAZ	$0,969 \cdot LE_{316L}$	
Resistência Última a Tração do 316L (RUT_{316L})	1,000	
Resistência Última a Tração da Solda	$1,159 \cdot RUT_{316L}$	
Resistência Última a Tração da HAZ	$1,040 \cdot RUT_{316L}$	

Fonte: Adaptado de Song e Hong (2013).

As propriedades mecânicas utilizadas foram as avaliadas em 20°C, uma vez que as análises não excederam uma temperatura nominal de 75°C.

4.2 MALHAS DE RESOLUÇÃO E CRITÉRIO DE CONVERGÊNCIA

A quantidade de elementos utilizada para a resolução dos domínios fluido e sólido foram 22.567.934 e 1.092.550, respectivamente.

Ambas fizeram uso de elementos tetraédricos pela adaptabilidade do elemento e são estruturadas e colocadas. Por falta de valores experimentais para comparação, a análise de independência de malha desenvolveu-se de forma a atingir o limite do desempenho computacional disponível.

Inicialmente, optou-se por um critério de convergência para a simulação do escoamento de erro residual máximo nas equações de conservação, sendo definido em $1 \cdot 10^{-6}$. A inserção da equação de energia no problema acarretou em um comportamento periódico das equações de conservação de quantidade de movimento linear, levando estas a terem seu critério reduzido para $1 \cdot 10^{-3}$. Portanto, o critério de parada fora modificado para o tempo de simulação, para que as mesmas não ultrapassassem dois dias.

4.3 DURAÇÃO DA SOLUÇÃO

Uma vez que todo o processo de análise numérica é seccionado e leva em consideração um período de interferência humana para modelagem da geometria e adequação da solução, o tempo aproximado de análise para cada etapa mostrou-se da seguinte maneira:

- Modelagem da geometria: 1 semana;
- Cálculo da malha de solução do escoamento: 24 horas;
- Análise do escoamento considerando a equação da energia: 48 horas;
- Interferência humana para transferência dos carregamentos para a ferramenta de análise estrutural: 2 horas;
- Cálculo da malha de solução da estrutura: 2 horas;
- Análise FSI com carregamento mecânico: 3 horas;
- Análise FSI com carregamento térmico: 3 horas;
- Análise FSI com carregamento acoplado (mecânico + térmico): 4 horas.

Cada caso analisado necessitou de modificação a partir da malha de solução do escoamento, portanto, a duração estimada para cada caso fora de 86 horas.

4.4 CONDIÇÕES DE CONTORNO

A análise deste trabalho fora dividida em nove combinações de condições de contorno. Duas vazões de entrada foram extraídas do trabalho de Tascheck (2019) e

dadas as condições de operação do permutador de calor, três temperaturas de interface foram escolhidas. As combinações foram escolhidas de forma a não haver mudança de fase no fluido de trabalho (água).

As cinco condições são mostradas na tabela 3, bem como as condições de parede para o caso hidrodinâmico. A terceira coluna se refere à superfície onde a condição de contorno fora aplicada, sendo estas mostradas nas figuras 21 (fluido) e 22 (sólido). A superfície externa do domínio sólido é complementar à interna e dita adiabática, uma vez que a temperatura do sólido é modelada como a mesma da condição de operação para o fluido externo às placas, por simplificação.

A temperatura de operação do fluido interno às placas neste tipo de permutador é de aproximadamente 180°C , uma vez que o caso real considera o fluido interno como óleo (a mudança de fluido de trabalho fora definida baseada no custo computacional necessário para a modelagem e resolução de um escoamento com alta viscosidade). Dada a hipótese simplificativa de mudança de fluido de trabalho, a temperatura de entrada fora reduzida, para que a condição de escoamento monofásico se mantivesse verdadeira e mantida constante, para se assemelhar ao comportamento real.

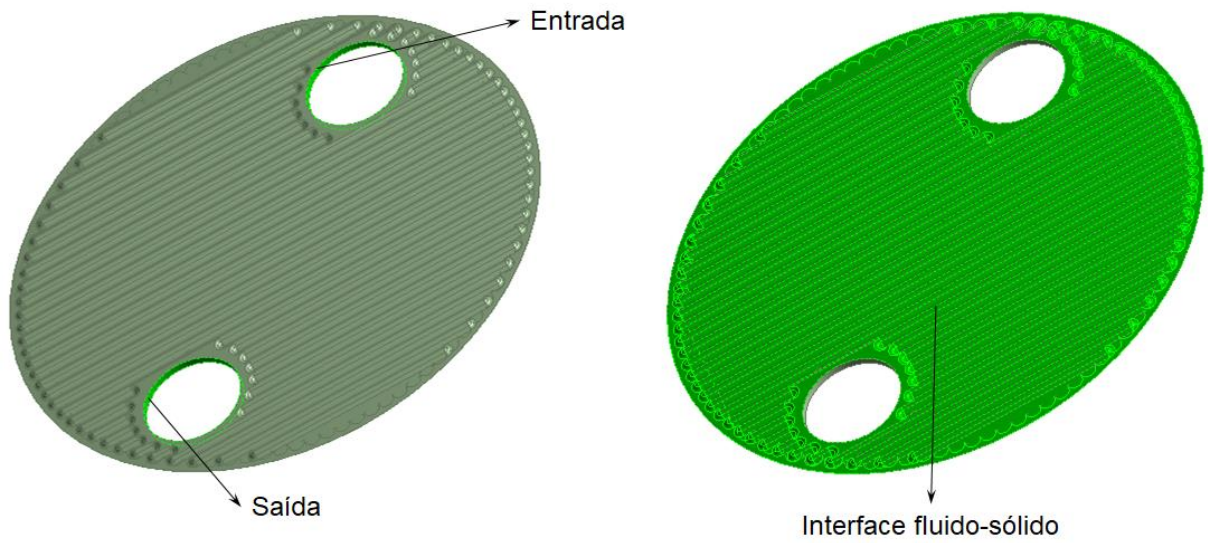
A condição de troca de calor na interface é modelada como convecção, de modo que os valores de coeficiente de transferência de calor por convecção podem ser vistos na tabela 1.

Tabela 3 – Condições de contorno

Tipo de Condição	Nome/Valor	Superfície
<i>Análise termo-fluidodinâmica</i>		
Temperatura do fluido	90 °C	Entrada
Vazão de entrada	0,344475 kg/s	Entrada
Saída (Pressão)	Ambiente	Saída
Condição de parede	Sem atrito	Interface fluido-sólido
Temperatura do sólido	30,0 °C	Interface fluido-sólido
	62,5 °C	Interface fluido-sólido
	75,0 °C	Interface fluido-sólido
<i>Análise fluido-estrutura (solicitação mecânica)</i>		
Restrição do sólido (Suporte Cilíndrico)	Livre na direção axial	Superfície de entrada (sólido)
	Livre na direção axial	Superfície de saída (sólido)
	Livre na direção radial	Solda
Contato	Soldado	Entre Solda 1 e Placa 1
	Soldado	Entre Solda 2 e Placa 2
	Soldado	Entre Solda 1 e Solda 2
Pressão Interna	Resultado da análise termo-fluidodinâmica	Interface fluido-sólido
<i>Análise fluido-estrutura (solicitação térmica)</i>		
Restrição do sólido (Suporte Cilíndrico)	Livre na direção axial	Superfície de entrada (sólido)
	Livre na direção axial	Superfície de saída (sólido)
	Livre na direção radial	Solda
Contato	Soldado	Entre Solda 1 e Placa 1
	Soldado	Entre Solda 2 e Placa 2
	Soldado	Entre Solda 1 e Solda 2
Temperatura Interna	Resultado da análise termo-fluidodinâmica	Interface fluido-sólido
Temperatura Inicial	30,0 °C	Domínio Sólido (corpo)
	62,5 °C	Domínio Sólido (corpo)
	75,0 °C	Domínio Sólido (corpo)
Troca de calor com o ambiente	Adiabático	Superfície externa da placa

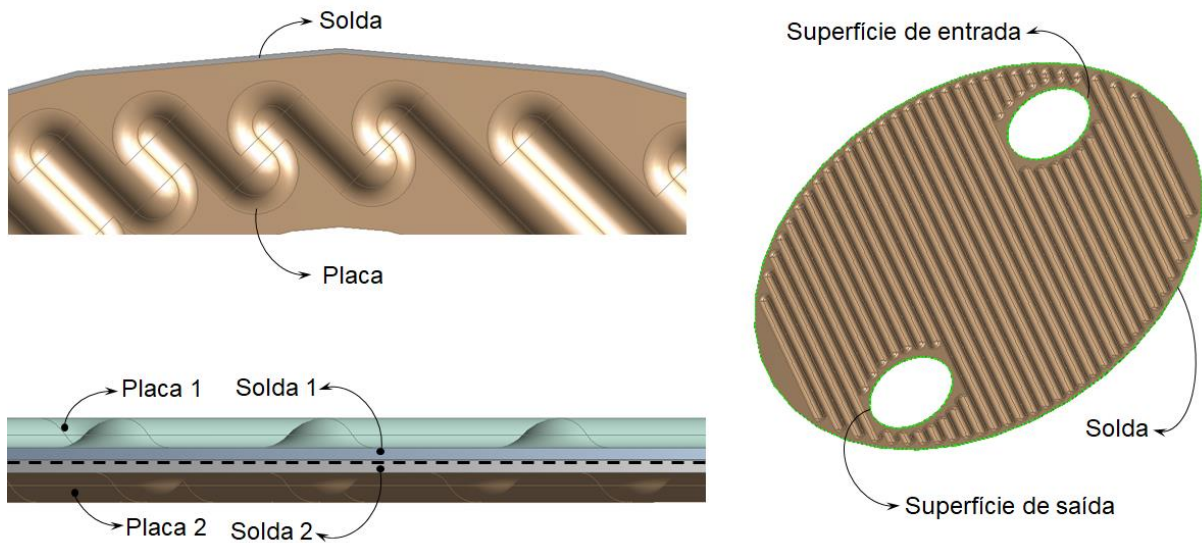
Fonte: Autora (2019).

Figura 21 – Superfícies de condição de contorno do domínio fluido



Fonte: Autora (2019).

Figura 22 – Superfícies de condição de contorno do domínio sólido



Fonte: Autora (2019).

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os resultados aqui discutidos serão divididos em casos nomeados de 1 a 4. A tabela 4 detalha as diferenças de cada caso. Os casos do tipo isolado são aqueles em que as distribuições de tensão e deslocamento devido ao carregamento mecânico são analisadas separadamente às provindas do carregamento térmico. Já no caso acoplado, ambos os carregamentos são analisados ao mesmo tempo.

Tabela 4 – Casos de análise

Caso	Tipo de Carregamento	Vazão de Entrada	Temperatura de Entrada do Fluido	Temperatura do Sólido
1	Isolado	0,344475 kg/s	90°C	30°C
2	Isolado	0,344475 kg/s	90°C	62,5°C
3	Isolado	0,344475 kg/s	90°C	75°C
4	Acoplado	0,344475 kg/s	90°C	62,5°C

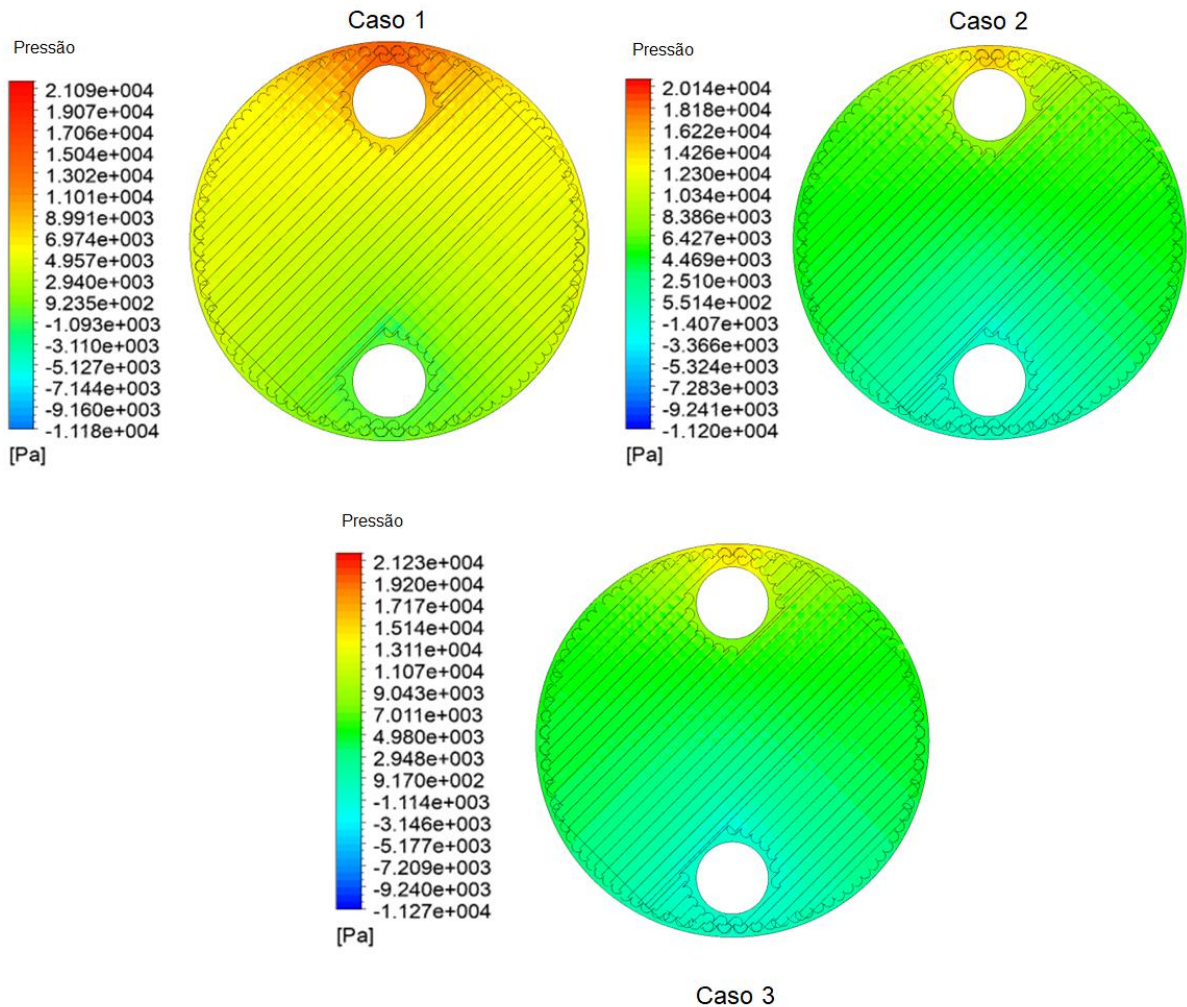
Fonte: Autora (2019).

5.1 CARREGAMENTO MECÂNICO

A figura 23 apresenta os resultados para o carregamento mecânico nos casos 1, 2 e 3. É possível notar um padrão de comportamento nos casos, com pequena variação no valor máximo de pressão de acordo com o aumento de temperatura do sólido.

A maior concentração de pressão é encontrada na entrada do domínio fluido e existe perda de carga no caminho até a saída, onde se encontra a zona de menor pressão, causadora de vórtices no escoamento (TASCHECK, 2019).

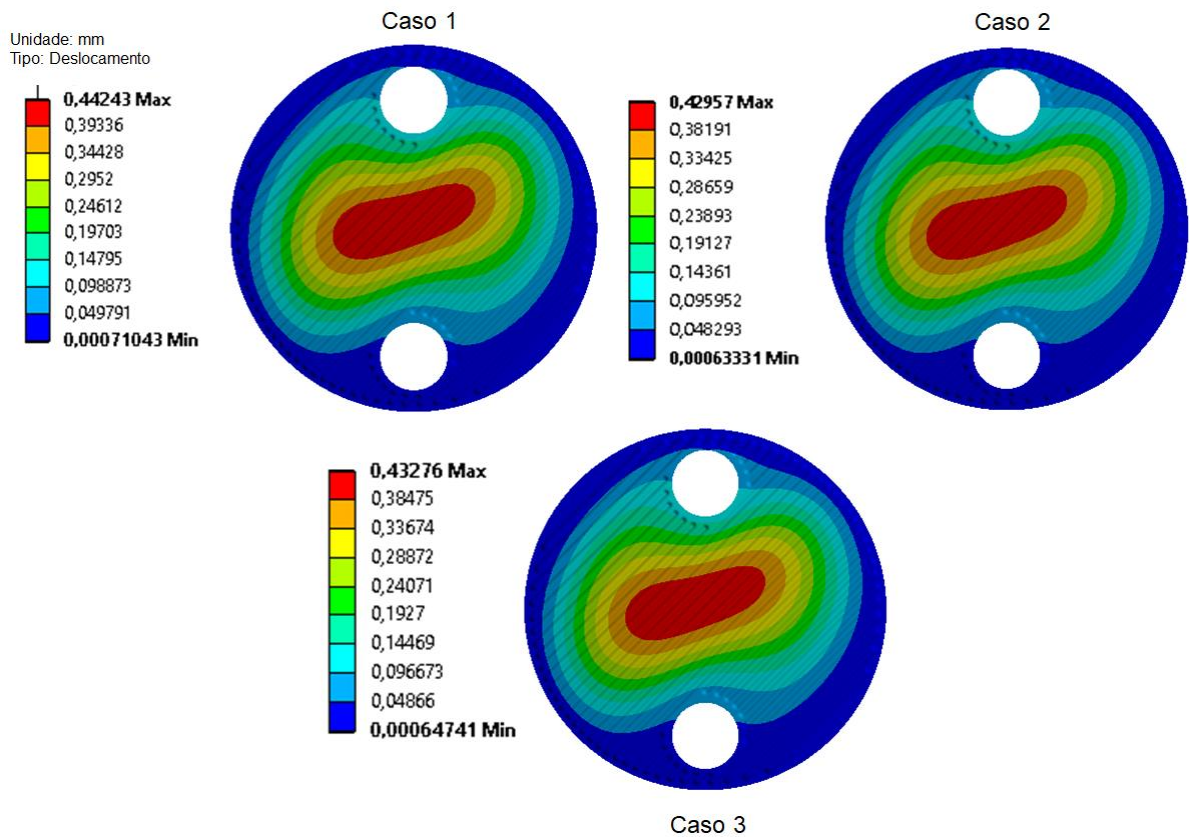
Figura 23 – Distribuição de pressão no escoamento para os casos 1, 2 e 3. Caso 1:
0,344475 kg/s



Fonte: Autora (2019).

A figura 24 apresenta a distribuição de deslocamento associada ao carregamento da figura 23, para os casos 1, 2 e 3.

Figura 24 – Distribuição de deslocamentos (von-Mises) devido ao carregamento mecânico para os casos 1, 2 e 3.



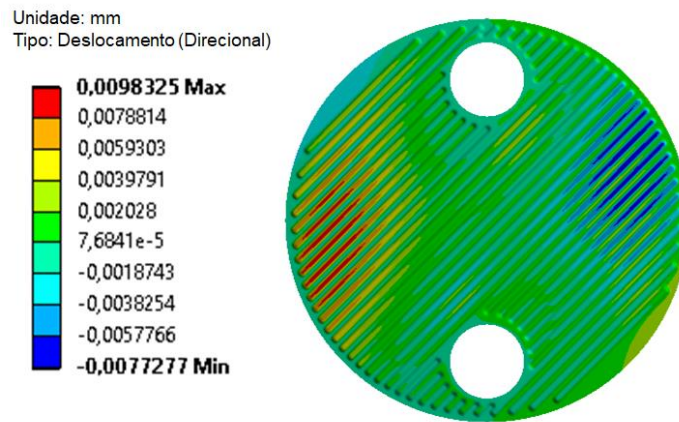
Fonte: Autora (2019).

Na figura acima é possível notar a influência da diferença de temperatura entre domínio sólido e escoamento na distribuição de deslocamentos. O caso 1, de condição de temperatura de 30°C, apresenta maior tensão máxima, em detrimento dos casos 2 e 3, que resultam em valores de pico menores.

Cabe evidenciar que o comportamento da distribuição indica a tendência de deslocamento na direção axial dos canais, no sentido do escoamento (descendente). De modo a comprovar tal tendência, a figura 25 apresenta o resultado para o deslocamento direcional do caso 1.

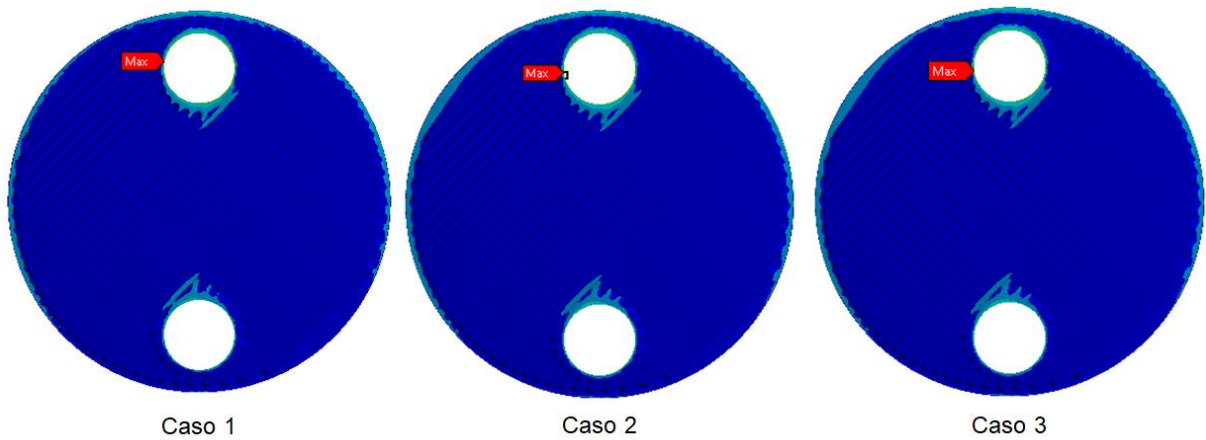
As figuras 26 e 27 mostram em detalhe a região de concentração de tensão nas placas, na entrada do escoamento.

Figura 25 – Distribuição de deslocamentos (direcional) devido ao carregamento mecânico para o caso 1.



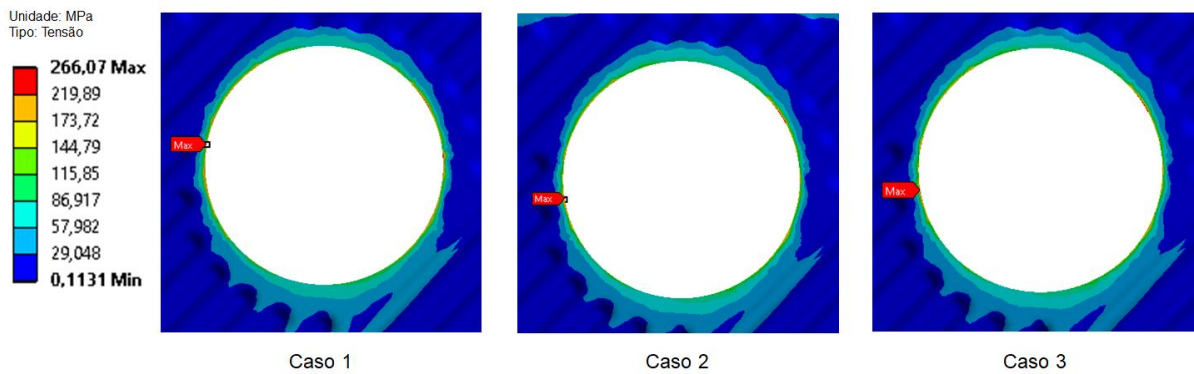
Fonte: Autora (2019).

Figura 26 – Localização dos pontos de concentração de tensão de von-Mises devido ao carregamento mecânico para os casos 1, 2 e 3.



Fonte: Autora (2019). A etiqueta vermelha indica o ponto de concentração máxima de tensão.

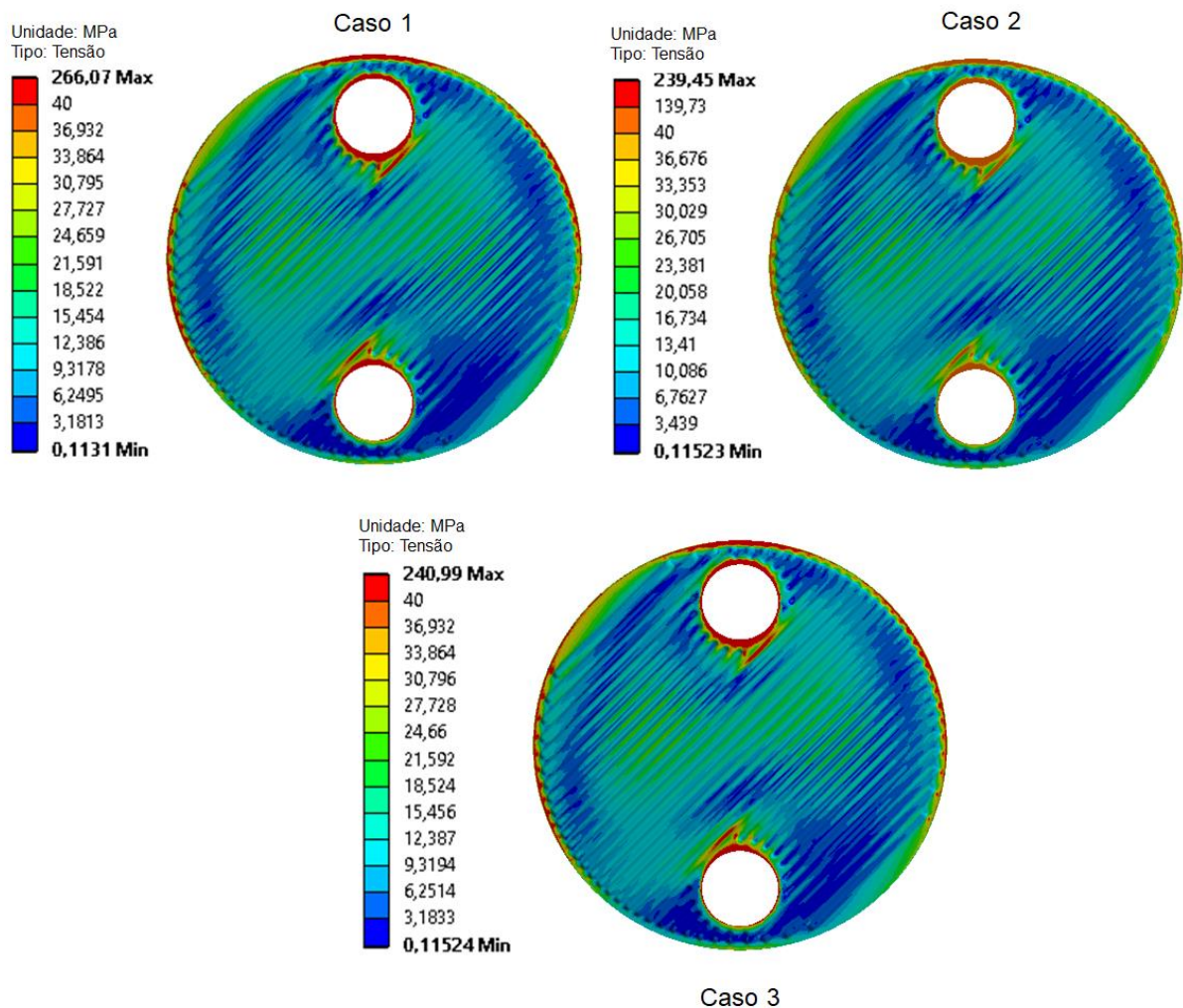
Figura 27 - Pontos de concentração de tensão de von-Mises devido ao carregamento mecânico para os casos 1, 2 e 3: detalhe da região de entrada de fluido.



Fonte: Autora (2019).

De modo a melhorar a visibilidade da distribuição de tensão nas placas, os pontos de concentração de tensão foram isolados, resultando no mapa de tensões apresentado na figura 28. O comportamento da tensão é perceptivelmente proporcional ao do deslocamento.

Figura 28 - Distribuição de tensão de von-Mises devido ao carregamento mecânico para os casos 1, 2 e 3



Fonte: Autora (2019).

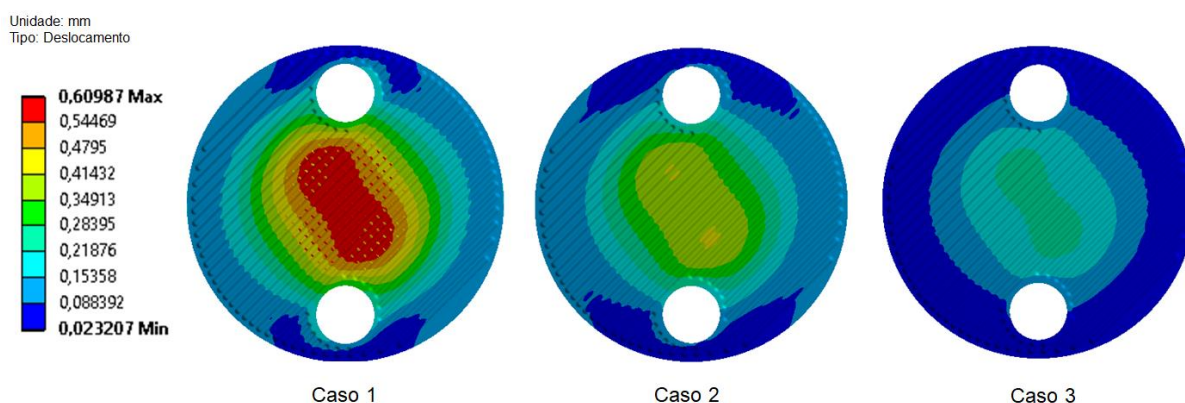
É perceptível a existência de concentração de tensão na região da solda, porém, dada a restrição da modelagem a um par de placas, os bocais de entrada e saída apresentam maior interferência neste caso. Cabem modificações futuras para adequar o modelo aumentando o conjunto de placas.

5.2 CARREGAMENTO TÉRMICO

As figuras 29 e 30 mostram as distribuições de deslocamento e tensão, respectivamente, para a carga térmica nos três casos. Uma significativa influência da diferença de temperatura entre sólido e escoamento pode ser notada: quanto maior

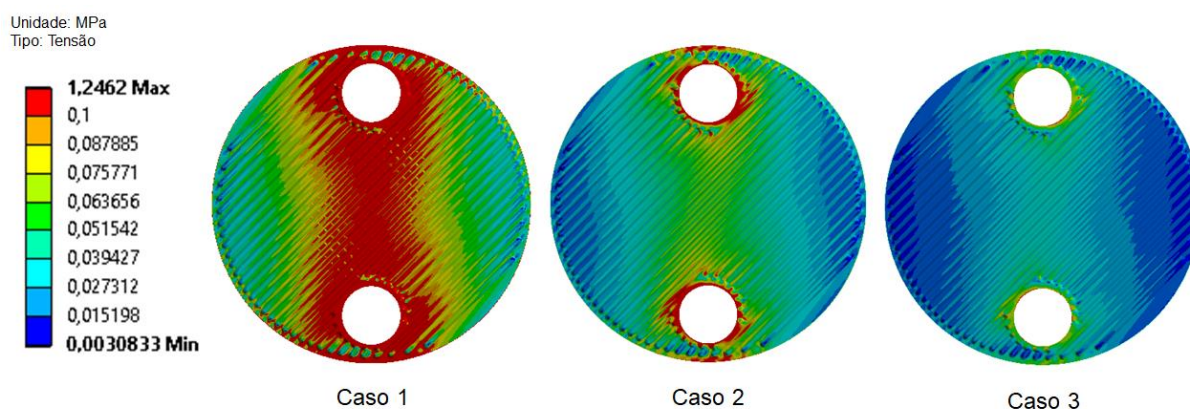
essa diferença, maiores são as tensões resultantes e por consequência, seus deslocamentos.

Figura 29 - Distribuição de deslocamentos (von-Mises) devido ao carregamento térmico para os casos 1, 2 e 3.



Fonte: Autora (2019).

Figura 30 - Distribuição de tensão de von-Mises devido ao carregamento térmico para os casos 1, 2 e 3.



Fonte: Autora (2019).

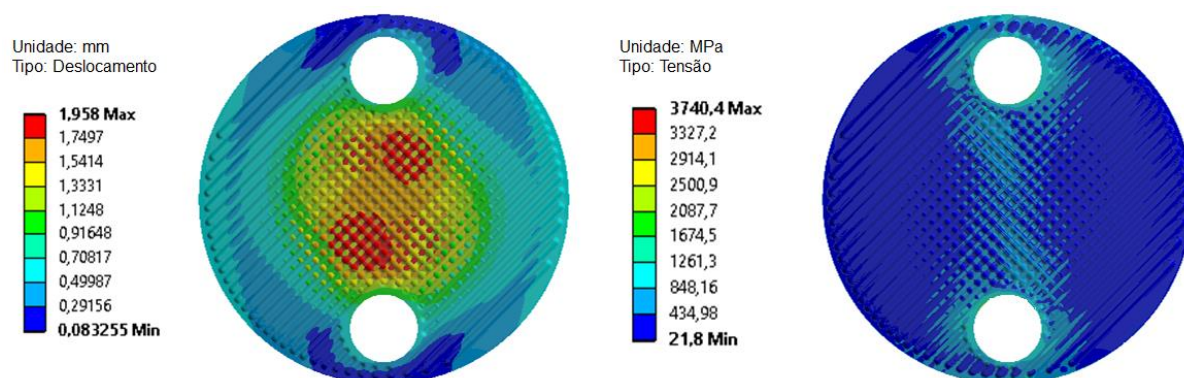
Ainda, é importante perceber que as tensões geradas pelo carregamento térmico são 100 vezes menores que as provindas do carregamento mecânico, evidenciando uma restrição de projeto importante. Tal diferença pode ser resultado da menor uniformidade da distribuição de pressão, devido à perda de carga, em relação

à distribuição de temperatura. Porém, ambos os deslocamentos têm a mesma ordem de grandeza.

5.3 CARREGAMENTO ACOPLADO

Dada sua distribuição homogênea de tensões e deslocamentos para a carga mecânica e seu comportamento intermediário para a térmica, optou-se por avaliar o caso 2 mais a fundo, acoplando os carregamentos – caso 4. A figura 31 apresenta os resultados para deslocamento e tensão desta análise.

Figura 31 – Distribuição de deslocamento e tensão para o caso 4



Fonte: Autora (2019).

Percebe-se a presença de regiões cruzadas no centro da placa – em ambas as grandezas – devido à perpendicularidade das ações das cargas mecânica e térmica que agem, respectivamente, axialmente e transversalmente ao canal, como notado anteriormente. Tanto a visualização como os dados gerados acusam grandes deslocamentos nos pontos de contato das placas, causando certo achatamento nos mesmos, uma vez que a carga combinada apresenta valores mais elevados de tensão.

Nota-se que os resultados apresentados na figura 31 são maiores que a soma para os fenômenos desacoplados, que seria o esperado. Cabe uma melhor investigação desta evidência, bem como a execução de validação experimental.

6 CONCLUSÕES

A interação fluido-estrutura em trocadores de calor é um fenômeno físico de análise crítica para a manutenção da vida útil dos aparelhos. O presente estudo analisa cinco configurações de condição de contorno de temperatura de parede e vazão de fluido para o caso específico de um par de placas com ângulo de Chevron de 45 graus.

A comparação dos resultados de tensão e deslocamento para os carregamentos térmico e mecânico evidenciaram maiores valores de tensão para o segundo carregamento, em detrimento do primeiro, devido à menor uniformidade do escoamento (perda de carga) em relação à temperatura, ambos avaliados em regime permanente. Os resultados mostraram que a área de maior concentração de tensão, para ambos os casos, é a superfície de entrada de fluido, informação esta que acentua a necessidade de modelagem e análise do conjunto de placas inteiro, futuramente. O carregamento mecânico apresentou maiores valores de tensão nas regiões de concentração.

Também fora avaliada a influência da diferença de temperatura entre o sólido e o fluido, que mostrou-se um ponto de sensibilidade na carga térmica, com a variação diretamente proporcional à magnitude da tensão.

Sugere-se que as seguintes adaptações sejam aplicadas à análise de modo que a modelagem se aproxime ao caso real e resultados mais robustos sejam adquiridos:

- Analisar o comportamento do sistema para o acoplamento de vários pares de placas;
- Modelar a geometria da solda com a seção transversal adequada;
- Adicionar geometria referente à zona termicamente afetada;
- Aferir as propriedades mecânicas e térmicas dos materiais;
- Analisar o escoamento de óleo no domínio interno às placas;
- Variar a temperatura de entrada do fluido;

- Aumentar os pontos de análise tanto para a temperatura do escoamento externo (e conseqüentemente para as placas) como para as vazões de entrada do escoamento interno;
- Analisar os comportamentos mecânico e térmico do casco;
- Analisar o sistema para diferentes ângulos de Chevron;
- Avaliar com maior profundidade os carregamentos desacoplados;
- Desenvolver ensaios experimentais para as condições estudadas.

7 REFERÊNCIAS

AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIOCOMBUSTÍVEIS. **Anuário Estatístico 2017**. [S.l.: s.n.]. Disponível em: <<http://www.anp.gov.br/publicacoes/anuario-estatistico/anuario-estatistico-2017>>. Acesso em: 10 set. 2018a.

AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIOCOMBUSTÍVEIS. **Anuário Estatístico 2018**. [S.l.: s.n.]. Disponível em: <<http://www.anp.gov.br/publicacoes/anuario-estatistico/anuario-estatistico-2018>>. Acesso em: 10 set. 2018b.

AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIOCOMBUSTÍVEIS. **Exploração e produção de óleo e gás**. Disponível em: <<http://www.anp.gov.br/exploracao-e-producao-de-oleo-e-gas>>. Acesso em: 10 set. 2018c.

ALFA LAVAL. **Industrial gasketed plate heat exchangers**. Disponível em: <<https://www.alfalaval.co.uk/microsites/gasketed-plate-heat-exchangers/types/industrial/>>. Acesso em: 14 nov. 2018.

ALVES FILHO, A. **Elementos Finitos: A Base da Tecnologia CAE**. São Paulo: Editora Érica, 2000.

BECKEDORFF, L. et al., Flow statistics in plate and shell heat exchangers measured with PTV. **International Journal of Heat and Fluid Flow**. Joinville, ago. 2019.

COMSOL. **Shell-and-Tube Heat Exchanger**. Disponível em: <<https://br.comsol.com/model/shell-and-tube-heat-exchanger-12685>>. Acesso em: 13 nov. 2018.

COOK, R. D. **Finite Element Modeling for Stress Analysis**. New York: John Wiley & Sons, Inc., 1995.

INCROPERA, F. et al. **Fundamentos de Transferência de Calor e Massa**. 6. ed. [s.l.]: John Wiley & Sons, 2007.

FREIRE, L.; ANDRADE, D. On Applicability Of Plate And Shell Heat Exchangers For Steam Generation In Naval Pwr. **Nuclear Engineering And Design**, São Paulo, 30 Out. 2014.

KAKAÇ, S.; LIU, H.; PRAMUANJAROENKIJ, A. **Heat Exchanger: Selection, Rating And Thermal Design**. 3.Ed. Boca Raton: Crc, 2012.

KONTI, M.K.; JUHA, S.U.; **Welded Heat Exchanger with Plate Structure**, US patent - US007204300B2, 2002.

KUMAR H., The plate heat exchanger: construction and design, in: Institute of Chemical Engineering Symposium Series, 1984, pp. 1275–1288.

LANGRE, E. de; DOARÉ, O.; AMANDOLESE, X. **Fundamentos das interações fluido/sólido**. Disponível em: <<https://www.coursera.org/learn/fluid-solid-interaction>>. Acesso em: 01 mar. 2019.

LIU, J. et al., Numerical simulation and optimization on fluid flow distribution performance of plate and shell heat exchanger's shell-side. **Chemical Industry And Engineering Progress**. Guangdong, p. 3569-3576. 2015.

LUAN H. B. et al., CFD analysis of two types of welded plate heat exchangers. **Numerical Heat Transfer, Part A: Applications: An International Journal of Computation and Methodology**. Sweden, p. 250-269. fev. 2017.

MALISKA, C. R.. **Transferência de Calor e Mecânica dos Fluidos Computacional: Fundamentos e Coordenadas Generalizadas**. 2. ed. Florianópolis: LTC, 2017.

MATWEB. **AISI Type 316L Stainless Steel, annealed sheet**. Disponível em: <<http://www.matweb.com/search/DataSheet.aspx?MatGUID=1336be6d0>>. Acesso em: 17 out. 2019.

MELLO, P. E. B.; VILLANUEVA, H. H. S.; SCOUTTO, S.; DONATO, G. H. B.; ORTEGA, F. S. Heat transfer, pressure drop and structural analysis of a finned plate ceramic heat exchanger. **Energy**. V.120, p.597-607, 2017.

MONTEIRO, D. B.; MELLO, P. E. B. Thermal performance and pressure drop in a ceramic heat exchanger evaluated using CFD simulations. **Energy**. V.45, p.489-496, 2012.

PAÏDOUSSIS, M. P.; PRICE, S. J.; LANGRE, E. de. **Fluid Structure Interactions: Cross-Flow-Induced Instabilities**. New York: Cambridge University Press, 2011.

PATIL, R.; ANAND S. Thermo-structural fatigue analysis of shell and tube type heat exchanger. **International Journal of Pressure Vessels and Piping**.v.135, p.35-42, 2017.

POSSAMAI, T. S. **ANÁLISE TÉRMICA E MODELAGEM NUMÉRICA DE UM FORNO DE FUSÃO DE MATERIAL VÍTREO A GÁS NATURAL**. 2014. 156 f. Tese

(Doutorado) - Curso de Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2014.

PROTHERMA. **Plate-Shell Heat Exchangers**. Disponível em: <<https://protherma.co.id/gesmex-plate-shell-heat-exchangers>>. Acesso em: 20 fev. 2018.

SONG, K.; HONG, S.; PARK, H. High-temperature structural analysis of a small- scale PHE prototype under the test condition of a small-scale gas loop. **Science and technology of nuclear installations**. P.1-10, 2012.

SONG, K; HONG, S. Evaluation of Elastic Structural Integrity of a 70 kW Class Lab-Scale PCHE Prototype under the Test Conditions of HELP. **Key Engineering Materials**, Daejeon, v. 2013, n. 1, p.1-1, set. 2013.

TASCHECK, B. **L. NUMERICAL ANALYSIS OF HYDRODYNAMIC CHARACTERISTICS OF A PLATE AND SHELL HEAT EXCHANGER (PSHE)**. 2019. 102 f. Tese (Doutorado) - Curso de Programa de Pós-graduação em Engenharia e Ciências Mecânicas, Universidade Federal de Santa Catarina, Joinville, 2019.

VAHTERUS. **Plate & Shell Heat Exchanger Technology**. Disponível em: <<https://vahterus.com/products/>>. Acesso em: 13 nov. 2018.

VERSTEEG, H. K.; MALALASEKERA, W.. **An Introduction to Computational Fluid Dynamics: The Finite Volume Method**. 2. ed. Essex: Pearson Education Limited, 2007.